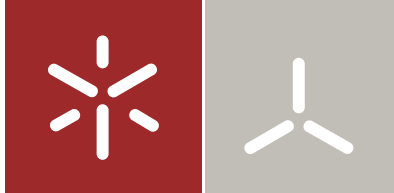


Universidade do Minho
Escola de Arquitectura, Arte e Design

António Francisco Nogueira Morais

Métodos e Desafios para a Integração de
Sistemas de Fabricação Robótica na
Arquitetura e Construção

António Francisco Nogueira Morais Métodos e Desafios para a Integração de Sistemas de Fabricação
Robótica na Arquitetura e Construção



Universidade do Minho
Escola de Arquitectura, Arte e Design

António Francisco Nogueira Morais

Métodos e Desafios para a Integração de Sistemas de Fabricação Robótica na Arquitetura e Construção

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Arquitectura
Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Declaração de Utilização

Nome. António Francisco Nogueira Morais

Endereço eletrónico. antoniofrans19@gmail.com

Telefone. 968934053

Bilhete de identidade / cartão de cidadão. 14942789

Título da Dissertação. Métodos e Desafios para a Integração de Sistemas de Fabricação Robótica na Arquitetura e Construção

Equipa de orientação.

Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Ano de conclusão. 2022

Mestrado em Arquitetura

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do Repositório UM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial
CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Universidade do Minho, 31 de janeiro de 2022

Assinatura.

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 31 de janeiro de 2022

Assinatura.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'António Morais', is written over a light gray rectangular background.

Agradecimentos

Manifesto o meu especial agradecimento às pessoas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a apresentação final desta dissertação.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo, por toda a paciência, empenho, entusiasmo e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho e em muitos outros durante o mestrado.

À minha namorada, Lara, pela força e apoio que me deu ao longo dos últimos anos, no curso e na elaboração desta dissertação.

A todos os amigos por me apoiarem e acompanharem ao longo deste ano.

Aos meus pais, pelo apoio e compreensão de sempre.

Resumo

Considerando a disseminação de novas tecnologias de fabrico Robótico aplicadas à Arquitetura e Construção, vive-se hoje uma mudança de paradigma no processo da conceção e construção do projeto, permitindo aproximar as tradicionalmente autónomas fases de projeto e construção.

Atendendo aos desafios atuais da Arquitetura e Construção, no que diz respeito à sustentabilidade e à digitalização, vivem-se hoje momentos de transição, onde a aposta em novos métodos de desenho e processos de fabrico começam a ser perceptíveis em vários contextos. Os métodos de desenho e fabrico digital que começaram a ser implementados na década de 1990 têm sofrido constantes evoluções, primeiro com os softwares de CAD, com a sua articulação com processos de trabalho CAM, para processos de manufatura produzido através de máquinas CNC, permitindo assim introduzir uma revolução nos processos de fabrico e prototipagem.

A integração de tecnologias de fabrico Robótico na Arquitetura e Construção não é uma ideia recente, já que no Japão nas décadas de 1980 e 1990, ocorreram várias experiências de implementação de sistemas que visavam automatizar a construção, tentando assim combater a falta de mão de obra. Mais recentemente, no início do século XXI, com a disseminação de novos softwares de desenho computacional, a integração de tecnologias de fabricação Robótica na Arquitetura tem-se vindo a intensificar, permitindo a criação de projetos inovadores que tiram partido destas tecnologias.

Esta dissertação divide-se em duas partes. A primeira dá enquadramento à: história, utilização e funcionamento do braço Robótico, o tipo de Robot mais utilizado na Arquitetura e Construção; a contextualização destes processos de fabrico em Arquitetura; e a pertinência do desenho computacional na mediação destes processos. Com base nestes conhecimentos, a segunda parte foca-se no desenvolvimento de um caso de estudo que consiste na montagem, transformação e controlo de um mini braço Robótico, e ainda no desenvolvimento do projeto de um pavilhão a partir do conceito de “Estrutura sequencial” de madeira, desenhado com recurso a modelos paramétricos para fabricação Robótica e com utilização do mini braço.

Palavras-chave: digitalização, fabrico Robótico, pré-fabricação, Prototipagem rápida, discretização.

Abstract

Considering the dissemination of new Robotic manufacturing technologies applied to Architecture and Construction, today there is a paradigm shift in the design and construction process of the project, allowing the traditionally autonomous phases of design and construction to be brought together.

Given the current challenges of Architecture and Construction, with regard to sustainability and digitization, there are moments of transition, where the bet on new design methods and manufacturing processes begin to be noticeable in various contexts. The digital design and manufacturing methods that began to be implemented in the 1990s have undergone constant evolution, first with CAD software, with its articulation with CAM work processes, for manufacturing processes produced through CNC machines, thus allowing introduce a revolution in manufacturing and prototyping processes.

The integration of Robotic manufacturing technologies in Architecture and Construction is not a recent idea, since in Japan in the 1980s and 1990s there were several experiences of implementing systems that aimed to automate construction trying to combat the lack of manpower. More recently, from the beginning of the 21st century, with the dissemination of new computer design software, the integration of Robotic manufacturing technologies in Architecture has been intensified, allowing the creation of innovative projects that take advantage of these technologies.

This dissertation is divided into two parts. The first provides a framework for: history, use and functioning of the anthropomorphic robotic arm - the type of Robot most used in Architecture and Construction; the contextualization of these manufacturing processes in architecture; and the relevance of computational design in the mediation of these processes. Based on this knowledge, the second part focuses on the development of a case study that consists of the assembly, transformation and control of a Robotic mini arm, and also on the development of a pavilion project based on the concept of “Sequential Structure” of wood, designed using parametric models for Robotic manufacturing using the mini arm.

Keywords: digitalization, Robotic fabrication, pre-fabrication, rapid prototyping, discretization.

Índice

1. Introdução. 001

- 1.1. Tema. 003
- 1.2. Motivação e Objetivos. 005
- 1.3. Estrutura. 007
- 1.4. Metodologia. 009

2. Digitalização na Arquitetura e Construção. 011

- 2.1. Enquadramento. 012
- 2.2. Desafios da Arquitetura. 015
- 2.3. Digitalização da Arquitetura. 018
- 2.4. Projeto e fabrico digital. 021
- 2.5. Discretização e automação. 027

3. Fabricação Robótica. 033

- 3.1. Enquadramento. 035
- 3.2. Origem e evolução dos Robots. 037
- 3.3. Sistemas Robóticos em Arquitetura e Construção. 041
- 3.4. Tipos de Robots. 049
- 3.5. O Robot Antropomórfico. 051
 - 3.5.1. O controlador. 052
 - 3.5.2. O manipulador. 053
 - 3.5.3. Ferramentas. 055
- 3.6. Comunicação entre o utilizador e o Robot.
 - 3.6.1. Programação on-line. 059
 - 3.6.2. Programação off-line. 060
 - 3.6.3. Softwares e linguagens na programação off-line. 060
 - 3.6.4. Linguagem Kuka KRL. 061
- 3.7. Ferramentas de controlo paramétrico. 063
 - 3.7.1. Kuka Prc. 065
 - 3.7.2. Furobot. 069
 - 3.7.3. Uso misto. 072
- 3.8. Porquê usar Robots na Arquitetura. 075

4. Montagem, transformação e controlo de um mini braço Robótico. 077

- 4.1. Contextualização e objetivos. 079
- 4.2. O tinkerkit Braccio mini Robot. 081
 - 4.2.1. Características. 081
 - 4.2.2. Controlo. 082
- 4.3. Modificações. 084
 - 4.3.1. Modificações de Hardware. 084
 - 4.3.2. Modificações do método de controlo. 086
- 4.4. Caracterização do mini braço Robótico. 090

5. Caso prático. 095

- 5.1. Contextualização e objetivos. 097
- 5.2. A estrutura sequencial. 099
 - 5.2.1. Definição do modelo computacional. 101
- 5.3. Fabrico e montagem. 103
 - 5.3.1. Desconstrução da estrutura principal. 104
 - 5.3.2. Simulação do fabrico e montagem através de métodos Robóticos. 108
 - 5.3.3. Montagem do protótipo com o mini braço Robótico. 115

6. Conclusão. 123

7. Bibliografia. 127

8. Anexos. 133

- 8.1. Atlas de Investigações. 134
- 8.2. Outros. 159

Índice de figuras

Figura 1.0.1. Esquema representativo das várias fases de estudo com o objetivo de demonstrar a metodologia de trabalho.

Figura 2.2.1. Figura representativa dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pela ONU. Fonte: <https://news.un.org/pt/story/2015/09/1524861-novos-objetivos-de-desenvolvimento-sustentave>

Figura 2.2.2. Tabela de comparação dos níveis de digitalização por indústria. Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Global-industry-digitisation-index-McKinsey-Global-Institute_fig3_325402968

Figura 2.2.3. Gráfico da comparação da produtividade da indústria no todo com a produtividade da construção na OCDE, Baseado nas estatísticas da Organização para Co-Operação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) Fonte: <https://www.verazaffari.com.br/mercado/a-urgencia-da-transformacao-digital-na-construcao-civil/-desenvolvimento-sustentavel>

Figura 2.3.1. Cronologia das principais revoluções industriais

Figura 2.4.1. Exemplo de ambiente de trabalho de um software BIM, Revit. Fonte: <https://engenhariadigital.com/revit-e-bim-significam-a-mesma-coisa/>

Figura 2.4.2. Exemplo de ambiente de trabalho de uma API, Grasshopper com o software CAD Rhinoceros . Fonte: <https://www.grasshopper3d.com/photo/gh-kangaroo-ssi-gsa-finite-element-analysis?overrideMobileRedirect=1>

Figura 2.4.3. Exemplo do uso de uma CNC equipada com uma fresa a recortar peças de uma placa de contraplacado para o projeto Wikihouse. Fonte: <http://spacecraft.co.nz/wikihouse-in-other-countries>

Figura 2.4.4. Exemplo de impressão 3D do desafio TECLA, construído pela Wasp em colaboração com MC A - Mario Cucinella Architects, através do uso de uma “Crane Wasp”, uma impressora 3d de grande formato . Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>

Figura 2.4.4. Exemplo de impressão 3D do desafio TECLA, construído pela Wasp em colaboração com MC A - Mario Cucinella Architects, através do uso de uma “Crane Wasp”, uma impressora 3d de grande formato . Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>

Figura 2.4.5. Exemplo de um Robot controlado por CNC equipado com uma fresadora a esculpir pedra para a obra Sagrada Família em Barcelona. Fonte: <https://www.interempresas.net/FrontPage/Articles/51641-La-robotica-entra-en-la-Sagrada-Familia.html>

Figura 2.5.1. Vista geral do projeto Kodama do arquiteto Kengo Kuma, 2018. Fonte: <https://www.archilovers.com/projects/232926/kodama.html>

Figura 2.5.2. Esquema de montagem das diferentes peças discretas que permitem construir um módulo utilizado no projeto. Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/969657/pavilhao-block-west-automated-architecture-auar-labs>

Figura 2.5.3. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/969657/pavilhao-block-west-automated-architecture-auar-labs>

Figura 2.5.4. Figura da série de imagens com o nome “En L’An 2000”, desenhadas na década de 1990, onde se pretendia refletir sobre como seria o futuro no ano de 2000. Fonte: <https://amusearte.hypotheses.org/6425>

Figura 2.5.5. Robots a executarem a montagem de um dos módulos através das tarefas de posicionamento e fixação com recurso a uma pistola de pregos. Fonte: <https://woodtech.events/robotic-fabrication-using-plywood-building-blocks/>

Figura 3.1.1. Linha de montagem automóvel Robotizada. Fonte: <https://www.razaoautomovel.com/2017/07/hyundai-automoveis-modernos>

Figura 3.2.1. Uma das primeiras linhas de montagem automóvel da Ford Motor company em 1913. Fonte: www.logisticadescomplicada.com

Figura 3.2.2. Robot Unimate, o primeiro componente mecânico-eletrónico capaz de auxiliar nos processos fabris, nomeadamente na fabrica automóvel da General Motors em 1969. Fonte: <https://blog.eletragate.com/o-que-e-robotica-conceito-historia-e-evolucao/>

Figura 3.2.3. T3 Robot, o primeiro Robot comercializado que era controlado por um microcomputador. Fonte: <https://ifr.org/robot-history>

Figura 3.2.4. Gráfico comparativo do número de Robots em uso no mundo inteiro por tipo de indústria ao longo da última década. Fonte: OCDE

Figura 3.2.5. Gráfico comparativo do número de Robots em operação ao longo da última década por Continente. Fonte: OCDE.

Figura 3.3.1. Robot japonês, Boardman-100 a dar apoio à colocação de placas numa construção. Fonte: Mason, Molly. (2015)

Figura 3.3.2. Vista geral do Serpentine Pavilion em 2005; Fonte: <https://divisare.com/projects/288650-alvaro-siza-vieira-cecil-balmond-eduardo-souto-de-moura-duccio-malagamba-serpentine-pavilion-2005>

Figura 3.3.3. Pormenor das ligações de madeira do Serpentine Pavilion; Fonte: <http://www.balmondstudio.com/work/serpentine-pavilion-2005.php>

Figura 3.3.4. Pormenor de fresagem dos elementos de madeira, num estudo realizado pelo DFL, FAUP EM 2015. Fonte: <https://dfl.arq.up.pt/serpentine-structure/>

Figura 3.3.6. Pormenor da colocação da argamassa no tijolo, 2006; Fonte: <https://divisare.com/projects/260919-gramazio-kohler-ralph-feiner-gantenbein-vineyard-facade>

Figura 3.3.7. Fotografia do projeto: “The Endless Wall, ETH Zurich, 2011”, de Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, Fonte: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/216.html>

Figura 3.3.8. Imagem do Projeto de investigação “Flight Assembled Architecture” do grupo Gramazio & Kohler com Raffaello D’Andrea em cooperação com ETH Zurich. Fonte: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/209.html>

Figura 3.3.9. Imagem do pavilhão “Bug Wood Pavilion”, CD/ITKE, Universidade de Estugarda. Fontes: <http://www.achimmmenges.net/?p=20987>

Figura 3.3.10. Robots a fabricar os módulos para a construção do “Bug Wood Pavilion”, ICD/ITKE, Universidade de Estugarda. Fonte: <http://www.achimmmenges.net/?p=2098>

Figura 3.4.1. Exemplo de uma coluna impressa com um Robot industrial. Fonte: Fab clay, <https://fabbots.wordpress.com/2012/12/09/fabclay-2/>

Figura 3.4.1. Exemplo de uma coluna impressa com um Robot industrial. Fonte: Fab clay, <https://fabbots.wordpress.com/2012/12/09/fabclay-2/>

Figura 3.4.2. Impressão de casa 3D no âmbito do projeto C3PO com a participação da empresa especialista em impressão 3d kampC em Antuérpia, Bélgica, 2020. Fonte: <https://www.kampc.be/>

Figura 3.4.3. Exemplo de uma fresadora de corte CNC. Fonte: <https://www.adverts.ie/other/8x4-cnc-router/21588680>

Figura 3.5.1. Esquema de funcionamento de um Sistema Robótico, com os seus componentes básicos

Figura 3.5.2. Representação da unidade de controlo de um Robot

Figura 3.5.3. Esquema Cinemático de um Robot industrial antropomórfico de 6 eixos

Figura 3.5.4. Exemplo de um Robot colaborativo da Universal Robots a lixar uma peça de mobiliário, 2021 . Fonte: <https://www.universal-robots.com/blog/robots-sanding-furniture-no-way/>

Figura 3.5.5. Montagem de uma estrutura de madeira com a utilização de dois braços Robóticos Kuka acoplados num pórtico, no laboratório de Robótica Federal da Suíça, 2018. Fonte: <https://phys.org/news/2018-03-robotic-collaboration-timber.ht>

Figura 3.5.6. Robot “Sam” (Semi-Automated Mason), a construir uma parede em tijolos e argamassa em apresentação no evento “ World of concrete” em 2015. Fonte: <https://pqinsel.com/pq/nuevas-tecnologias-en-la-industria-la-construccion/>

Figura 3.5.7. Tabela de correlação entre métodos de manufatura , principais técnicas de trabalho e materiais que podem ser executados com um braço Robótico

Figura 3.5.8. Fresagem de poliestireno expandido para o departamento de Arte do estúdio Badelsberg GmbH, com recurso a um Robot Kuka equipado com uma fresadora. Fonte: <https://www.kuka.com/pt/ramos-de-atividade/banco-de-dados-de-solu%C3%A7%C3%B5es/2018/01/rob%C3%B4-de-fresagem-kuka-no-studio-babelsberg>

Figura 3.5.9. Impressão de um elemento de fachada com recurso a um Robot Quantec para a empresa de construção Belga “Besix Group”..2021. Fonte: <https://www.kuka.com/en-us/company/press/news/2021/05/besix-3d>

Figura 3.5.10. Corte de madeira em bruto com auxílio de um braço Robótico Kuka equipado com uma serra de fita. Fonte: Larsen, 2020, disponível em https://www.researchgate.net/publication/341743804_Robotic_processing_of_crooked_sawlogs_for_use_in_architectural_construction

Figura 3.5.11. Imagem da ponte desenhada e fabricada pelo estúdio MX3D com recurso a técnicas de deposição de metal com recurso a um braço Robótico. Fonte: <https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>

Figura 3.5.12. Pormenor do fabrico Robótico da ponte do canal “Oudezijds Achterburgwal” de Amesterdão, pelo estúdio MX3D. Fonte: <https://mx3d.com/timeline/1-3-of-the-bridge-is-done/>

Figura 3.5.13. Imagem do fabrico Robótico da ponte o canal “Oudezijds Achterburgwal” de Amesterdão, pelo estudio MX3D. Fonte: <https://mx3d.com/industries/infrastructure/smart-bri>

Figura 3.6.1. Programação on-line de um Robot através do método de leadtrought. Fonte: <https://pratt.duke.edu/about/news/robotics-new-generation>

Figura 3.6.2. Esquema do processo de programação off-line de um Robot.

Figura 3.6.3. Esquema de programação off-line de um Robot.

Figura 3.6.4. Exemplo de um excerto de um código Krl de um movimento ao longo de um quadrado, bem como controlo de uma mesa rotativa. Fonte: <https://wikis.utexas.edu/display/SOAdigitech/KUKA+Programming+KRL+Examples>

Figura 3.6.5. Exemplo do ambiente de trabalho do KUKA Sim Pro 3.1. Fonte: <https://roboticsbook.com/kuka-sim-pro-3-1-free-download>

Figura 3.6.6. Exemplo do ambiente de trabalho do software Robot DK Professional. Fonte: <https://www.rapid-city.top/products.aspx?cname=kuka+robot+programming&cid=7>

Figura 3.7.1./3.7.2. Exemplos de add-on 's de controlo Robótico para Grasshopper. Fonte comum: www.foodforrhino.co

Figura 3.7.3. Exemplo de ferramenta desenvolvida em python pela escola ETH Zurich para controlo de Robots "CompassFab". Fonte: <https://compas.dev/extensions.htm>

Figura 3.7.4. Submenus de controlo de parâmetros no Kuka Prc

Figura 3.7.5. Código Grasshopper, criação do sistema Robótico com o add-on Kuka Prc e de uma rotina de corte com fio quente de um bloco de EPS.

Figura 3.7.6. Exemplo de uma rotina de corte com fio quente de um bloco de EPS, programada com o add-on Kuka Prc.

Figura 3.7.7. Código Grasshopper, criação do sistema Robótico com o add-on Furobot e rotina de fresagem de um bloco de EPS.

Figura 3.7.8. Exemplo de uma rotina de fresagem de um bloco de EPS, programada com o add-on Furobot

Figura 3.7.9. Código Grasshopper, criação do sistema robótico misto com o add-on Kuka Prc para controlo Robótico e ferramentas de CAM do add-on Furobot para programação de uma rotina de fresagem de um bloco de EPS.

Figura 3.7.10. Exemplo de uma rotina de fresagem de um bloco de EPS, programada através de um uso "misto" do add-on Kuka Prc e Furobot

Figura 4.2.1. Imagem do Kit vendido pela Arduino com o Tinkerkit Mini Braccio. Fonte: <https://cooneyelectronics.ie/products/73-4447>

Figura 4.2.2. 2. "Peças" que compõe o Kit vendido pela Arduino. Fonte: <https://cooneyelectronics.ie/products/73-4447>

Figura 4.2.3. Relação do número do eixo com o eixo correspondente no Tinkerkit Mini Braccio

Figura 4.2.4. Sistema Robótico de operação e controlo do Mini Braço Robótico

Figura 4.2.5. Tinkerkit Mini Braccio na sua configuração original

Figura 4.2.6. Arduino Shield semelhante ao incluído no conjunto do Tinkerkit.

Figura 4.2.7. Arduino Uno, semelhante ao incluído no conjunto do Tinkerkit.

Figura 4.3.1. Peças modeladas para o 6º eixo

Figura 4.3.2. Impressão das peças modeladas com recurso a uma impressora 3D

Figura 4.3.3. Servomotor semelhante ao utilizado para acionar o eixo construído

Figura 4.3.4. Axonometria explicativa das alterações ao mini braço

Figura 4.3.5. Encadeamento da informação para controlo do mini braço

Figura 4.3.6. Código Grasshopper, criação do Custom Robot e respetiva ferramenta com o add-on Kuka Prc para que seja possível o controlo paramétrico do mini braço

Figura 4.3.7. Ambiente de trabalho da API Arduino IDE para controlo da placa Arduino Uno

Figura 4.3.8. Esquema Grasshopper, ajuste dos ângulos de saída do Kuka Prc através do componente analysis, para serem enviados para o add-on Firefly

Figura 4.3.9. Esquema Grasshopper do envio do valor dos movimentos de cada eixo do Robot através do add-on Firefly.

Figura 4.3.11. Gráfico de representação dos dados de carga do mini braço Robótico

Figura 4.3.12. Versão final do mini braço Robótico

Figura 4.3.13. Representação da cadeia cinemática do mini braço após modificações

Figura 4.3.14. Especificação da área de trabalho máxima do mini braço Robótico no plano XZ

Figura 4.3.15. Especificação da área máxima de trabalho no plano XY

Figura 4.3.16. Representação das dimensões do mini braço Robótico, assim como a amplitude máxima dos principais eixos

Figura 5.2.1. Pavilhão Fusta Robótica, IAAC no âmbito do projeto “Open Thesis Fabrication 2015” em Barcelona. Fonte: <https://iaac.net/project/fusta-robotica-otf-2015/>

Figura 5.2.2. Imagem da montagem de um dos módulos da “The sequential Structure”, ETH Zurich, Prof. Gramazio, Prof. Kohler em 2010. Fonte: https://www.rok-office.com/projects/sequential_structure/

Figura 5.2.3. “The sequential Structure “ finalizada, ETH Zurich, Prof. Gramazio, Prof. Kohler em 2010. Fonte: https://www.rok-office.com/projects/sequential_structure/

Figura 5.2.4. Esquema generativo da estrutura sequencial

Figura 5.2.5. Renderização da estrutura Final

Figura 5.2.6. Código Grasshopper, desenho da estrutura sequencial

Figura 5.2.7. Fotomontagem da estrutura sequencial na clareira da Escola de Arquitetura, Arte e Design da Universidade do Minho, fotografia retirada de: <https://www.floesel.com/portfolio/escola-de-arquitetura-da-universidade-do-minho/>

Figura 5.2.8. Alçado lateral da estrutura

Figura 5.2.9. Alçado frontal da estrutura

Figura 5.3.1. Representação do processo de fabrico e montagem, desde a produção dos módulos ao transporte e montagem

Figura 5.3.2. Criação de volumes que contêm a estrutura com o volume de trabalho do braço Robótico

Figura 5.3.3. Axonometria explodida da divisão dos módulos, para serem individualmente selecionados e rebatidos

Figura 5.3.4. Código Grasshopper, rebatimento dos barrotes no plano horizontal de trabalho do Robot

Figura 5.3.5. Rebatimento dos barrotes no plano horizontal de trabalho do Robot

Figura 5.3.6. Código Grasshopper, desconstrução dos barrotes, para encontrar o centro do eixo de cada um e assim definir o ponto de pega da garra.

Figura 5.3.7. Desconstrução dos barrotes para encontrar o centro do eixo de cada um, para definir o ponto de pega da garra.

Figura 5.3.8. Código Grasshopper, criação dos comandos com função de controlo de movimento e comandos de operação da garra, para criação da rotina.

Figura 5.3.9. Esquema generativo da criação dos percursos em função dos planos direcionais.

Figura 5.3.10. Frames da sequência de fabrico da simulação da rotina de montagem da estrutura sequencial.

Figura 5.3.11. Código Grasshopper, sistema Robótico de controlo do braço Robótico em Kuka Prc e envio da informação para a placa de Arduino através do add-on Firefly.

Figura 5.3.12. Peças rebatidas na área de trabalho do mini braço Robótico.

Figura 5.3.14. Código Grasshopper, criação dos comandos com função controlo de movimento e comandos de operação da garra, para criação da rotina.

Figura 5.3.15. Esquema generativo da criação dos percursos em função dos planos direcionais.

Figura 5.3.16. Sequência de imagens do mini braço Robótico a construir o protótipo final à escala 1/10.

Figura 5.3.18. Sequência de fotografias do protótipo final à escala 1/20.

Lista de siglas

- EAAD.** Escola de Arquitetura, Arte e Design da Universidade do Minho
- AM.** *Additive Manufacturing* (fabrico aditivo)
- BIM.** *Building Information Modeling* (modelação da informação da construção)
- CAD.** *Computer Aided Design* (desenho assistido por computador)
- CAM.** *Computer Aided Manufacturing* (fabrico assistido por computador)
- CNC.** *Computer Numeric Control* (controlo numérico computadorizado)
- AI.** *Artificial Intelligence* (Inteligência Artificial)
- API.** *Application programming interface* (Interface de programação de aplicação)
- KRL.** KUKA Robot Language (Linguagem de programação KUKA)
- GH.** Grasshopper
- Kuka PRC.** Kuka Parametric Robot Control

1. Introdução

1.1. Tema e problemática

A presente investigação aborda a relação entre métodos digitais de desenho e métodos de fabrico Robótico aplicados à Arquitetura e Construção. Ao contrário de outros setores industriais, na Arquitetura e Construção, assiste-se a uma lenta mudança de paradigma em que as ferramentas digitais são integradas de modo colaborativo no modo de projetar e construir. Apesar de lenta, esta mudança tem origem numa crescente integração de processos de modelação computacional nas fases de desenho e produção de projetos de Arquitetura.

A indústria da construção é tradicionalmente uma indústria de baixa produtividade e grande resistência à digitalização, em que os métodos de trabalho permanecem inalterados há décadas. Atualmente, devido ao elevado impacto ambiental dos sistemas construtivos utilizados nas últimas décadas, aliado à crescente escasse e envelhecimento da mão de obra, a baixa atratividade do setor para as novas gerações, levam a que o setor da construção tenha de olhar para novas formas e processos de construção.

Nas últimas décadas, conscientes destes desafios que a indústria iria enfrentar, vários grupos de investigação, maioritariamente académicos, têm-se debatido com a criação de novas abordagens e metodologias que permitam responder a estas novas necessidades.

Entre as abordagens mais promissoras destaca-se a automação. A ideia não é inovadora e trata-se de transpor para o setor aquilo que já é amplamente utilizado por outras indústrias, como a automóvel ou a eletrónica. A implementação deste tipo de tecnologia é mediada pela utilização de metodologias para o controlo do processo de manufatura, introduzindo um novo paradigma em relação às possibilidades de personalização.

Com o aumento da disseminação da aplicação de tecnologias de automação, metodologias como *mass customization* (Pine, 1992), permitirão produzir materiais customizados com o mesmo preço e rapidez que a produção em massa. O conceito de *Design to factory*, com o processamento direto da informação de computador para a máquina, ou o *Design for Disassembly*, onde se pretende perceber o processo de montagem, mas também de desmontagem, podem ser conceitos importantes para a implementação de um novo paradigma para a Arquitetura e Construção, que responda às atuais necessidades que o setor enfrenta.

1.2. Motivação e Objetivos

A motivação para a escolha deste tema surge do interesse e curiosidade pessoal por processos de desenho e fabrico emergentes na área da Arquitetura e Construção. Ferramentas como o desenho computacional abrem novas possibilidades para a modelação e controlo de formas arquitetónicas não regulares, bem como a simulação da performance dessas mesmas formas, de acordo com um contexto específico.

Tal curiosidade pelo desenho computacional, permitiu perceber que este possibilita um maior controlo do projeto nas suas componentes morfológica, funcional e construtivas, do mesmo modo abre novas possibilidades que os programas CAD tradicionais não permitem. Falamos por exemplo de modelos para otimização topológica, estrutural, ambiental entre outras que são possíveis de gerir num mesmo modelo computacional. Acresce ainda a estas possibilidades o facto de facilitarem o acesso a sistemas de controlo e simulação de processos de fabricação, nomeadamente a robótica, e as suas ferramentas.

O objetivo desta dissertação foca-se em perceber de que forma o desenho computacional, aliado à fabricação robótica, possibilita a implementação de metodologias para uma construção mais sustentável a nível ambiental e social. Para tal, procurar-se-á perceber a história e o funcionamento dos sistemas Robóticos utilizados na Arquitetura e na Construção, quais são as diferentes formas de controlo e em que tipos de tarefas os podemos utilizar. A geração e construção de um protótipo à escala recorrendo aos métodos de desenho e automação abordados nesta dissertação, pretende demonstrar uma aplicação prática dos conceitos abordados ao longo da mesma.

1.3. Estrutura

A presente Dissertação organiza-se em 6 capítulos principais e seus subcapítulos:

(1) O capítulo 1 (1. Introdução) é um capítulo introdutório e divide-se em 4 subcapítulos. O primeiro (1.1. Tema e problemática) enquadra e apresenta a temática em estudo. O segundo (1.2. Motivação e objetivos) aborda os objetivos da investigação. O terceiro (1.3. Estrutura) apresenta a estrutura e organização do presente documento. O quarto (1.4. Metodologia) aborda a metodologia e o processo de trabalho que norteou este trabalho.

(2) O capítulo 2 (2. Digitalização na Arquitetura e Construção) divide-se em 5 subcapítulos. O primeiro, (2.1. Enquadramento) introduz os conceitos e ideias que serão abordadas ao longo do capítulo. O segundo (2.2. Desafios da Arquitetura) foca-se no levantamento dos principais desafios da indústria da Arquitetura e Construção na atualidade. O terceiro, (2.3. Digitalização da Arquitetura) tenta prever os impactos da indústria 4.0 na Arquitetura e Construção. O quarto subcapítulo, (2.4. Projeto e fabrico digital) faz um levantamento das principais tecnologias disponíveis para o desenho e fabrico na Arquitetura. Por último, o subcapítulo 5 (2.5. Discretização e Automação) analisa a evolução da implementação de tecnologias de automação ao serviço da Arquitetura.

(3) O capítulo 3 (3. Fabricação Robótica) divide-se em 8 subcapítulos e apresenta uma revisão dos principais sistemas de fabricação robótica e da sua aplicação em arquitetura e construção. O primeiro subcapítulo (3.1. Enquadramento) tem como objetivo fazer um recenseamento da informação que será abordada nos restantes. O segundo subcapítulo (3.2. Origem e evolução dos Robots) aborda a história do braço robótico desde a sua criação até aos sistemas robóticos atuais. O terceiro subcapítulo (3.3. Sistemas robóticos em Arquitetura e Construção) faz um estado da arte da robótica aplicada à construção. O quarto capítulo (3.4. O que é um Robot ?) apresenta a definição universal do que é um Robot. O subcapítulo número 5 (3.5. O braço Robótico) responde a questões de caracterização do que é um braço robótico antropomórfico e o que o constitui.

O subcapítulo 6 (3.6. Comunicação entre o utilizador e o Robot) aborda as várias possibilidades de programação de um Robot, nomeadamente a programação on-line e off-line. O sétimo capítulo (3.7. Ferramentas de controlo paramétrico) apresenta um conjunto de add-ons para *Grasshopper* capazes de permitir o controlo de um braço Robótico a partir de um modelo computacional. O capítulo número 8, (3.8. Porquê usar Robots na Arquitetura) é a conclusão de todo o capítulo e pretende apresentar uma reflexão acerca do papel do robot na Arquitetura e Construção.

(4) O capítulo 4 (Construção de um mini braço Robótico) divide-se em 4 subcapítulos e tem como objetivo a construção de um mini braço Robótico com base no Tinkerkits Braccio da Arduino e na sua adaptação ao controlo através de modelos paramétricos. O primeiro subcapítulo (4.1.Contextualização e objetivos) tem como objetivo justificar a construção do mini braço e a pertinência do mesmo. O segundo (4.2. O Tinkerkits Braccio mini Robot) reflete e apresenta o mini Braccio em versão de fábrica. O terceiro (4.3. Modificações) apresenta as principais alterações que foram feitas ao mini braço Robótico de modo a que este se adequasse às necessidades desta dissertação. O último subcapítulo (4.4. Caracterização do mini braço Robótico) apresenta as fichas técnicas criadas para determinar as dimensões e especificidades do mini braço Robótico após as alterações ao mesmo.

(5) O capítulo 5 (Caso prático) divide-se em 4 subcapítulos e aborda a implementação prática de todos os conteúdos analisados ao longo de toda a dissertação, nomeadamente a aplicação de uma rotina Robótica para montagem de uma estrutura com o mini braço Robótico construído anteriormente. O primeiro subcapítulo (5.1.Contextualização e objetivos) especifica quais são as motivações do caso prático e os objetivos a que este se propõe. No subcapítulo 2 (5.2.A estrutura sequencial) é desenhada a partir do conceito de estrutura sequencial, um pequeno pavilhão em elementos discretos de madeira com recurso a modelos computacionais. No terceiro (5.3.Fabrico e montagem Robótica) é construída a rotina Robótica para controlo do mini braço Robótico a partir do modelo paramétrico criado anteriormente no processo de desenho da estrutura sequencial. Por último, o subcapítulo 4 (5.4. Maqueta final) apresenta os resultados do processo de desenho e fabrico da estrutura sequencial que culmina na maqueta final construída com recurso ao mini Fobot.

(6) No capítulo 6 (Conclusão) são apresentados os resultados e conclusões de todo o trabalho, bem como possíveis trabalhos futuros que esta investigação pode permitir.

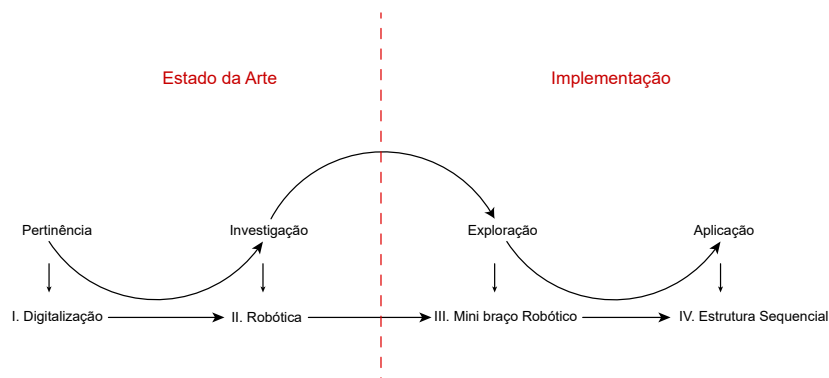
(7) No capítulo 7 (Bibliografia e referências) é apresentada toda a bibliografia utilizada ao longo desta dissertação.

(8) No capítulo 8 (Anexos) é apresentado um Atlas com projetos inovadores e relevantes que tiraram partido da automação, bem como outros documentos importantes.

1.4. Metodologia

Figura 1.4.1. Esquema representativo das várias fases de estudo com o objetivo de demonstrar a metodologia de trabalho.

Para a realização da presente dissertação, a metodologia de trabalho dividiu-se em quatro grupos ao longo de duas fases complementares. A primeira fase centrou-se na elaboração de um estado da arte dos principais temas da dissertação. Essa fase inicia-se com o primeiro grupo I. Digitalização, que aborda a pertinência do tema da digitalização na Arquitetura incidindo sobre os desafios que esta enfrentará nas próximas décadas, nomeadamente o combate às alterações climáticas e implementação de sistemas de automação. O grupo II. Robótica, aborda a implementação de sistemas de fabrico Robótico na Arquitetura e Construção, investigação da história da Robótica, dos avanços ao longo das últimas décadas e do funcionamento e programação do principal sistema Robótico utilizado na Arquitetura, o braço Robótico Antropomórfico.



A segunda fase da metodologia de trabalho, a fase de implementação, inicia-se com o grupo III. Mini braço robótico com ênfase na exploração da informação anteriormente obtida. Este grupo tem como objetivo a adaptação e construção de um mini braço Robótico controlado a partir dos métodos mais relevantes estudados na fase anterior.

A parte IV. Estrutura sequencial, faz uma aplicação prática dos conceitos anteriormente investigados e explorados. Esta fase pretende validar os métodos e processos de fabrico Robótico investigados no estado da arte através da utilização das ferramentas criadas durante a fase de implementação. Para isso, a conceção de um caso de estudo, pretende a criação de um projeto para aplicação prática desses conceitos, a fim de montar uma pequena estrutura com recurso à ferramenta criada e controlada através de métodos computacionais, o mini braço Robótico.

2. Digitalização na Arquitetura e Construção

2.1. Enquadramento

¹ A primeira versão do *Grasshopper*, então chamada *Explicit History*, foi lançada em setembro de 2007, por David Rutten. Hoje continua a estar disponível uma versão distribuída pela empresa McNeel Associate onde já faz parte das ferramentas nativas do Rhinoceros.

Este capítulo pretende analisar como uma crescente digitalização da Arquitetura e Construção poderão contribuir para um ambiente construído com melhor qualidade de vida e mais sustentável. De como nas próximas décadas o seu impacto ambiental se reduzirá a neutro.

A sustentabilidade ocupa agora um papel de destaque na comunicação social, simpósios, conferências e investigação. As consequências nefastas do modo como o Homem tem gerido os recursos naturais e energéticos do planeta são agora inegáveis e reconhecidos por todos. Nos últimos anos, os profissionais da Arquitetura e a Construção têm aportado novas ferramentas que poderão auxiliar a uma mudança de paradigma.

O setor da construção é o único setor de atividade da economia dos países desenvolvidos onde a produtividade está a diminuir, ou completamente estagnada há décadas. Este fenómeno deve-se em parte ao facto de o setor da construção, não estar a acompanhar o ritmo da digitalização das restantes indústrias que tentam a todo o custo tirar o máximo partido das novas tecnologias que proporcionam melhorias a nível da produtividade e da sustentabilidade. Apesar disso, a construção continua há várias décadas a construir com recurso aos mesmos processos, com os mesmos impactos, riscos, problemas ambientais e sociais.

De forma a melhorar as condições de trabalho e produtividade dos trabalhadores do setor, não é só o ambiente de obra que terá de sofrer alterações mas também a maneira como os próprios projetos são pensados e executados.

Complementarmente às ferramentas de CAD tradicionais, a disponibilização de Interfaces de Programação a Aplicações (API) nestes programas têm facilitado a integração de modelos computacionais. O *Grasshopper*¹ é uma destas ferramentas com implementação no *Rhinoceros*, um programa CAD especializado na modelação 3D de geometrias não regulares em processos de definição de projeto. Com a disseminação deste tipo de ferramentas, começam a ser desenhadas e pensadas novas formas de trabalhar na construção.

Vários grupos de investigação científica em conjunto com a indústria têm proposto e demonstrado novas maneiras e formas de construir, tirando partido de ferramentas que até há pouco tempo pareciam restritas apenas a algumas indústrias, como a automóvel ou a eletrónica.

2.2. Desafios da Arquitetura



Figura 2.2.1. Figura representativa dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pela ONU. Fonte: <https://news.un.org/pt/story/2015/09/1524861-novos-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>

Atualmente, um pouco por todo o mundo, o setor da construção enfrenta um grande desafio de adequação aos padrões de sustentabilidade exigidos pelos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU, figura 2.2.1. Estes 17 objetivos são acompanhados por 169 metas para o desenvolvimento sustentável e a ONU ambiciona que os países participantes nesta ação consigam alcançar estas metas até ao ano de 2030.

Este desafio, surge como consequência da própria atividade humana. Resultante das nossas atividades quotidianas, o excesso de poluição provocada pela elevada dependência de recursos fósseis está a levar ao aquecimento global, à acidificação dos oceanos e à destruição de habitats, o nosso incluído.

A construção, como uma das maiores indústrias do planeta, tem um grande peso nestas emissões. Como arquitetos, temos a nossa quota parte de responsabilidades na resposta adequada a esses desafios, não só através da criação de melhores espaços, mais inclusivos e acessíveis mas principalmente na escolha de materiais e sistemas construtivos selecionados com maior consciência ambiental, pensando não só no presente da construção, mas também no seu futuro.

Globalmente, de acordo com dados fornecidos pela União Europeia, o setor da construção civil e obras públicas é o grande impulsionador das economias. Segundo esta entidade, só na Europa, este setor é responsável por cerca de 7,5% da população empregada e 28,1% da população industrial está de alguma forma ligada à construção (Teodoro, 2011). Por outro lado, a nível global 38% das emissões produzidas são consequência direta de atividades ligadas à construção e aos edifícios (Construction, 2020).

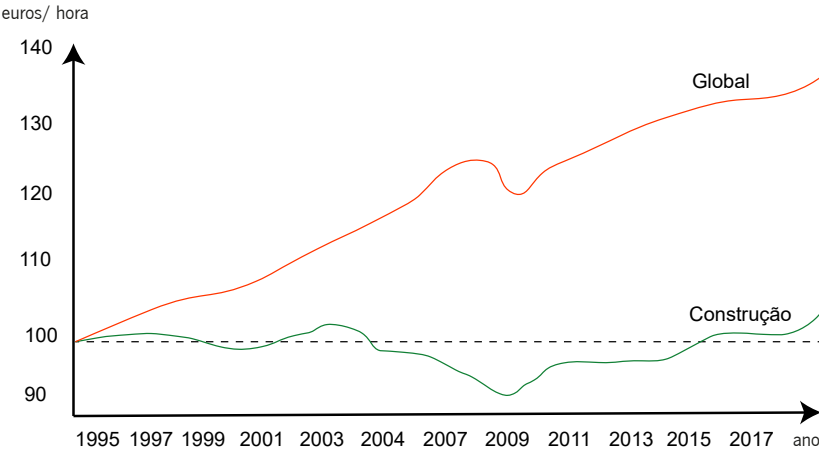
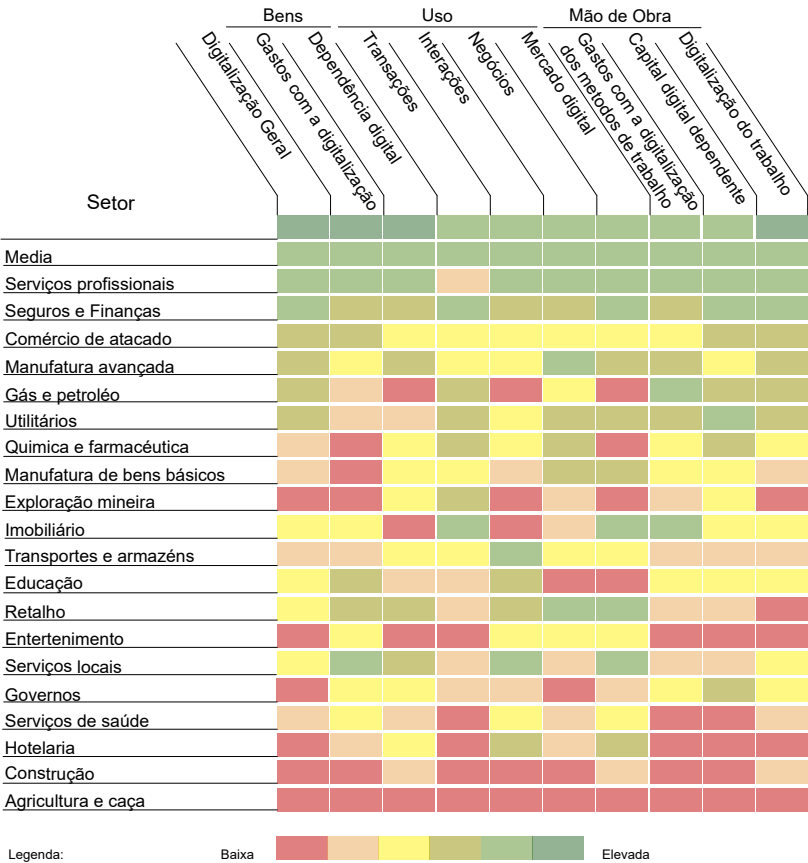
Sendo um setor com tanta expressão económica, social, e ambiental a nível global, seria de esperar que esta fosse uma das indústrias que mais apostaria na digitalização e otimização dos recursos tanto materiais como humanos. No entanto, não é isso que se verifica. Analisando a tabela da figura 2.2.2 elaborada com base nos dados da firma de analistas *McKinsey Global Institute*, percebe-se que globalmente a indústria da construção é das menos evoluídas ao nível da implementação do uso de sistemas digitais nos vários parâmetros analisados. Pior que a indústria da construção, apenas a indústria da agricultura. Existem diversos fatores para esta fraca tendência destas duas indústrias, como por exemplo a necessidade de realizar grande parte das suas atividades in situ.

A falta de capacidade da indústria da construção em acompanhar as tendências da digitalização, que globalmente foram sendo aplicadas às demais indústrias, trouxeram consequências à sua capacidade produtiva. Na figura 2.2.3. , estão representados os dados da produtividade por hora das várias indústrias, a laranja e a azul a produtividade da indústria da construção entre os anos de 1995 a 2017. Observando estes dados, constata-se que a indústria da construção manteve os níveis de produtividade praticamente inalterados nos últimos 20 anos.

Exemplo dessa estagnação, são os métodos e processos de construir muito tradicionais recorrendo ao mesmo tipo de sistemas construtivos há várias décadas. Essa estagnação, pode ser explicada pelo atraso na implementação de novas tecnologias e métodos provenientes dos progressivos avanços tecnológicos.

Figura 2.2.2. Tabela de comparação dos níveis de digitalização por indústria. Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Global-industry-digitisation-index-McKinsey-Global-Institute_fig3_325402968

Figura 2.2.3. Gráfico da comparação da produtividade da indústria no todo com a produtividade da construção na OCDE, Baseado nas estatísticas da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) Fonte: <https://www.verazaffari.com.br/mercado/a-urgencia-da-transformacao-digital-na-construcao-civil/-desenvolvimento-sustentavel>



2.3.Digitalização da Arquitetura

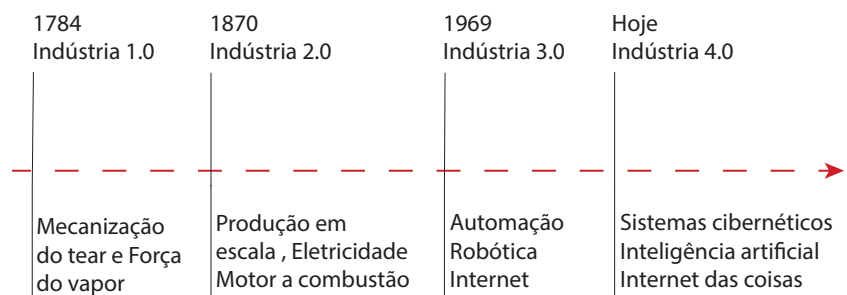


Figura 2.3.1. Cronologia das principais revoluções industriais

Ao longo da história, a indústria tem vindo constantemente a evoluir. Essa evolução encontra-se enquadrada em diferentes fases, figura 2.3.1.

A primeira fase, compreendida entre os anos de 1760 e 1840, surgiu devido ao aparecimento das primeiras “máquinas”, que eram baseadas na utilização do vapor de água como fonte de energia. A segunda revolução industrial, tem lugar no final do século XIX e inícios do século XX, e é provavelmente a que possibilita maiores transformações tanto na indústria como na sociedade. Esta revolução foi caracterizada pela substituição do vapor pela energia elétrica nas fábricas, o aparecimento das linhas de montagem nas fábricas originando a produção em massa e acessível. A terceira revolução industrial traz com ela os pilares da sociedade contemporânea. As grandes inovações que surgem nesta época são o aparecimento dos computadores, dos Robots e da internet. Na arquitetura dá-se a introdução dos softwares de desenho digital que consequentemente dá origem à criação de máquinas CNC que apoiam a fabricação.

A indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, engloba a época contemporânea e tem como objetivo unir a tecnologia física à digital através de sensores e sistemas em rede (chamados sistemas cyber físicos). Desses sistemas destacam-se por exemplo a Robótica, que embora já seja extensivamente utilizada, começará cada vez mais a ser utilizada em mais tarefas e sem supervisão humana através da integração de sensores e da inteligência digital (AI).

Os impactos da Indústria 4.0 na Arquitetura e na Construção Civil tendem a ser muito positivos desde que a indústria consiga implementar as mudanças necessárias para colocar a indústria da construção (IC) no patamar das demais (Matos, 2021).

A chamada construção 4.0, tendencialmente trará para a ordem do dia, temas como a construção pré-fabricada (offsite construction) que permitirá melhores condições de trabalho e de segurança aos trabalhadores ao mesmo tempo que permitirá uma maior articulação com a Robótica e outros tipos de automação para o fabrico e montagem de componentes e estruturas, onde se inclui por exemplo o uso de máquinas de impressão 3D, corte laser e fresagem.

As fases de planeamento e levantamento beneficiarão também do uso de novas tecnologias como por exemplo a utilização de scanners e de drones para levantamento de informação no terreno de forma mais rápida e eficaz o que consequentemente aumentará o nível de produtividade da Indústria da Arquitetura Engenharia e Construção, que se caracteriza como por ser o mais baixo a nível global quando comparado com as restantes indústrias, como visto anteriormente.

O recurso à realidade virtual será benéfico para a perceção do resultado final do projeto de maneira a evitar erros e mal-entendidos entre projetista, cliente e empreiteiro ao mesmo tempo que permite que informações em papel passem a ser obsoletas podendo estes sistemas ser utilizados em estaleiro, como o caso da realidade aumentada.

A utilização de sensores e de dispositivos conectados (IOT), possibilitaram uma revolução do ponto de vista de como as construções são geridas e mantidas. Através da utilização de softwares de desenho e de planeamento mais sofisticados que farão uso de sistemas de Machine learning e Inteligência artificial, os processos de design e construção serão mais coerentes, corretos e limitarão a margem de erro. Sistemas semelhantes podem ser utilizados em obra para que as máquinas utilizadas possam comunicar entre si de modo a evitar colisões e possíveis acidentes operando autonomamente.

Consequência das melhores condições de trabalho possibilitadas pelo uso de novas tecnologias, a Indústria da Construção, terá o potencial de se tornar um setor mais atrativo para as novas gerações possibilitando uma indústria com uma maior resiliência, segurança e tecnologicamente avançada.

2.4. Projeto e Fabrico digital

Nas décadas subsequentes à Segunda Guerra Mundial há um progressivo desenvolvimento do computador. Na área da Arquitetura é apenas com a disseminação de computadores comerciais na década de 1990, que se verifica uma efetiva integração do uso de computadores nos ateliers de Arquitetura. (Kolarevic, 2003). Ao serviço dos arquitetos, o computador começou por ser utilizado apenas para a criação de representações bidimensionais do que antes era desenhado à mão.

No entanto, desde o aparecimento dos primeiros programas de desenho assistido por computador (CAD), estes programas têm permitido uma maior interação entre o computador e o projetista. Atualmente, a modelação e a visualização digital tridimensional de projetos de Arquitetura é um recurso inevitável no processo de trabalho da vasta maioria dos projetistas, não só pela comodidade que estes métodos permitem, como também pelas capacidades e novas abordagens por estes potenciadas (Stavric e Marina, 2011). Entre os demais, os programas de Modelação da Informação da Construção (BIM) e metodologias de Desenho Generativo (GD), destacam-se.

Os softwares BIM têm facilitado o trabalho interdisciplinar no desenvolvimento do projeto, bem como a troca de dados entre as várias partes envolvidas no seu desenvolvimento e edificação. Esta introduz metodologias para a criação e gestão de informação desde a criação do projeto aos pormenores e detalhes de construção, bem como em fases posteriores à construção, para a manutenção e gestão dos edifícios. Contudo, por se basear na definição prévia de um conjunto de objetos e de base de dados, introduz uma metodologia que por vezes parece ser contraproducente no processo criativo necessário ao Arquiteto.

Diferente desta metodologia, são os métodos de desenho generativo através de processos de modelação computacional e paramétrica, que introduzem um grande grau de liberdade, isto se os Arquitetos souberem traduzir as regras de projeto para estes modelos.

Como definição globalmente aceite, considera-se que o desenho paramétrico é um processo de desenho que utiliza tecnologias CAD e a modelos computacionais para implementar um conjunto de relações paramétricas entre os princípios base do projeto. Este processo permite que o Arquiteto obtenha de forma automática um conjunto de opções de projeto dentro da mesma família.

Aplicados à arquitetura, estes tipos de softwares apresentam inúmeras vantagens. Um projeto de arquitetura, define-se como um problema multiobjectivo, ou seja, durante a fase de projeto, o arquiteto identifica e soluciona diferentes problemas em função dos vários objetivos finais que culminam numa proposta de projeto. Alguns desses problemas visam a otimização da exposição solar dos edifícios, otimização da sua forma e função e de sistemas construtivos, nomeadamente no uso de materiais, fabrico e montagem.

De modo a implementar processos de otimização, o arquiteto terá inicialmente que identificar os parâmetros e restrições que se associam a esse objetivo específico. Neste contexto, a aplicação de algoritmos de otimização, pode facilitar a procura de uma melhor solução para um determinado problema.

Dentro das várias ferramentas de programação visual existentes, a API *Grasshopper*^{1 (013)}, que funciona como uma extensão integrada no software CAD *Rhinoceros 3D*, é um dos mais populares e mais utilizados por vários gabinetes de Arquitetura e grupos de investigação um pouco por todo o mundo.

O *Grasshopper* funciona através de uma área de trabalho autónoma ainda que em articulação com a do *Rhinoceros*, contando com a área de trabalho do mesmo para visualizar o resultado das operações executadas.

O processo de criação do algoritmo em *Grasshopper* é feito a partir de dois tipos de objetos: parâmetros e componentes. Os parâmetros têm como função armazenar um determinado tipo de dados de origem geométrica, como por exemplo pontos ou linhas. Estes podem ser criados a partir do *Grasshopper* ou importados a partir do *Rhinoceros*. Os componentes, têm como função produzir operações sobre os parâmetros aos quais estão afetos, através de uma ligação entre os dois, feita pelo programador.

Através das alterações efetuadas nos parâmetros que controlam os componentes, as informações são atualizadas por toda a definição, de maneira a que toda a definição seja atualizada de acordo com as alterações efetuadas aos parâmetros.

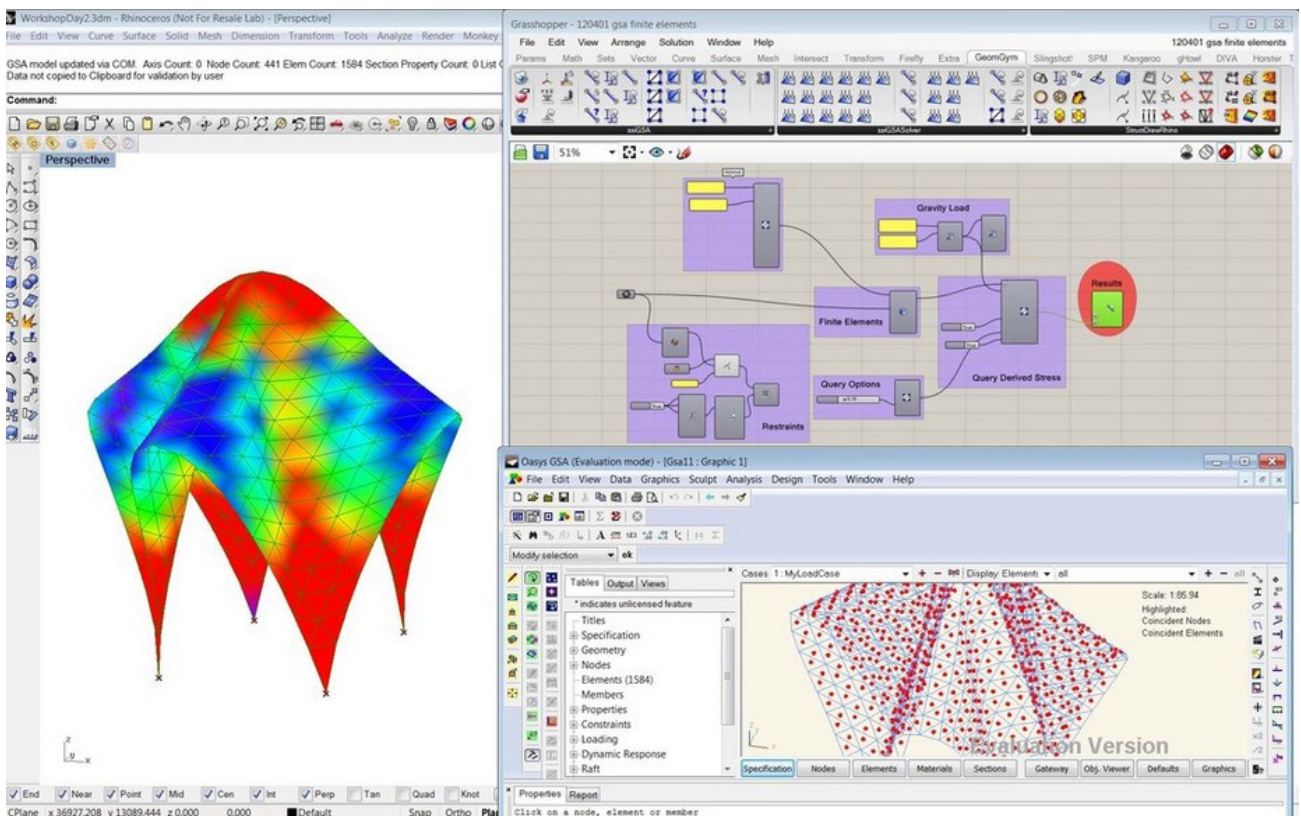
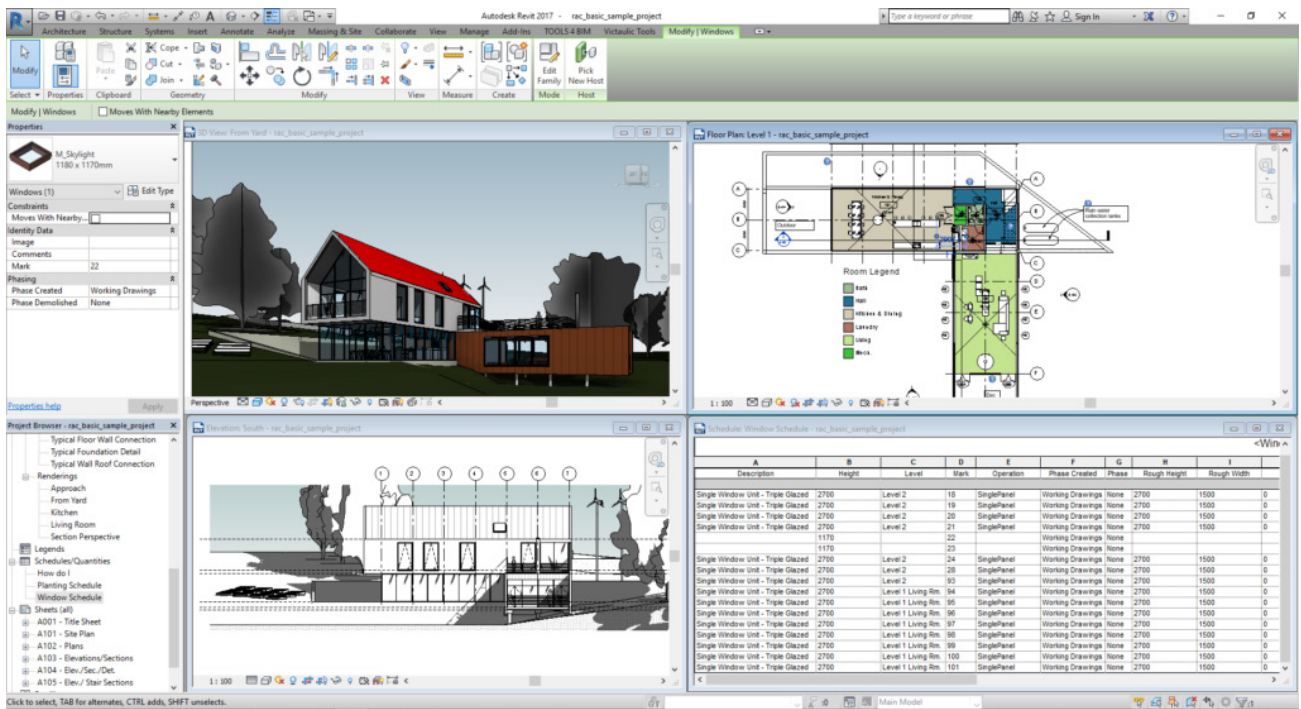
O surgimento de tecnologias de controlo Numérico por Computador (CNC), estabeleceram a ponte entre o desenho digital CAD e a máquina, nomeadamente através de softwares de manufatura assistida por computador (CAM).

Os softwares de CAM, são softwares que fazem a tradução do desenho para linguagem computacional, normalmente G-CODE, que será enviado para a máquina CNC com o objetivo de automatizar os processos de manufatura.

Os sistemas CAM baseiam-se na utilização de 3 componentes base: um software CAD/CAM que converte o desenho original nos percursos ou movimentações necessárias ao fabrico ou montagem do objeto; um equipamento/máquina (CNC) que irá interagir com o material da forma necessária à criação do produto final, e um software que converta a informação dos percursos gerados numa linguagem compatível com as capacidades de interpretação do software e hardware da máquina a ser utilizada (Autodesk, 2020).

Figura 2.4.1. Exemplo de ambiente de trabalho de um software BIM, Revit. Fonte: <https://engenhariadigital.com/revit-e-bim-significam-a-mesma-coisa/>

Figura 2.4.2. Exemplo de ambiente de trabalho de uma API, *Grasshopper* com o software CAD *Rhinoceros*. Fonte: <https://www.grasshopper3d.com/photo/gh-kangaroo-ssi-gsa-finite-element-analysis?overrideMobileRedirect=1>



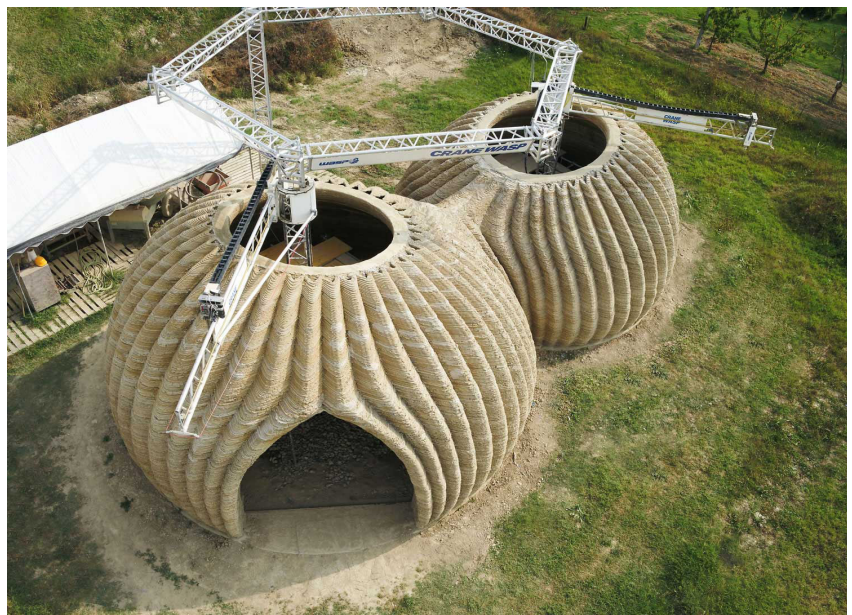
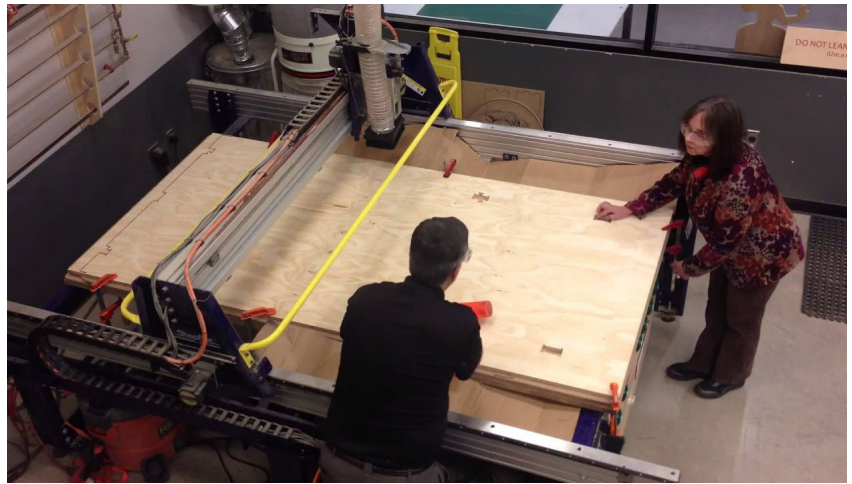
No livro *Architecture in the Digital Age, Design and Manufacturing*, Branco Kolarevic, (2003), descreve o museu de Guggenheim de Bilbao como a obra que mostrou ao mundo as possibilidades permitidas pelos softwares CAD/CAM, comparando mesmo a escala deste acontecimento com a de uma revolução industrial. O “efeito Bilbao”, como ficou conhecido, criou um novo paradigma na Arquitetura e Construção, onde os limites do que podia ou não ser feito desvaneceram através do recurso à tecnologia.

A manufatura recorrendo a máquinas CNC é um campo vasto e com forte implantação tanto na Arquitetura como na Construção. Existem vários tipos de máquinas, que manipulam materiais de diferentes maneiras dependendo do tipo de material, do tipo de tarefa e máquina. Genericamente os métodos de manufatura digital dividem-se em aditivos, como no caso da fabricação aditiva, subtrativos como a fresagem ou o corte a laser, e os formativos como a moldagem ou quinagem. Interessa referir estas metodologias, porque estas têm aplicação direta em processos de fabricação Robótica, que no caso de Robots antropomórficos geralmente compostos por 6 eixos de liberdade, ampliam o uso destas ferramentas. Este tema é aprofundado no capítulo 3.5.3-*Ferramentas*.

Figura 2.4.3. Exemplo do uso de uma CNC equipada com uma fresa a recortar peças de uma palaca de contraplacado para o projeto Wikihouse. Fonte: <http://spacecraft.co.nz/wikihouse-in-other-countries>

Figura 2.4.4. Exemplo de impressão 3D do desafio TECLA, construído pela Wasp em colaboração com MC A - Mario Cucinella Architects, através do uso de uma “Crane Wasp”, uma impressora 3d de grande formato . Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>

Figura 2.4.5. Exemplo de um robot controlado por CNC equipado com uma fresadora a esculpir pedra para a obra da Sagrada Família em Barcelona. Fonte: <https://www.interempresas.net/FrontPage/Articles/51641-La-robotica-entra-en-la-Sagrada-Familia.html>



2.5. Discretização e Automação

A utilização de novas ferramentas digitais na Arquitetura, levou a uma maior proximidade entre os ambientes virtual e físico. Consequência dessa aproximação, hoje as ferramentas digitais disponíveis, como por exemplo as plataformas BIM e o recurso a modelos paramétricos computacionais facilitam o controle da fase de desenho ou projeto mas também um maior controle do processo de produção. Esse maior controle sobre o objeto arquitetônico deve-se à utilização de métodos de fabrico por CNC e mais recentemente à Robótica. Apesar das experiências de fabrico digital *in situ*, o desenvolvimento de experiências em ambientes controlados, como por exemplo em fábrica, para produção de elementos pré-fabricados, têm sido igualmente exploradas, com intuito de aumentar o seu ciclo de vida reversibilidade de soluções arquitetônicas, bem como pensados para ter um elevado grau de adaptabilidade e personalização.

Paralelamente a esta evolução, nos últimos anos com os novos movimentos com o objetivo de reduzir o impacto ambiental da construção, têm surgido novas abordagens ao modo como se pensa e constrói edifícios. Uma dessas abordagens é uma das mais relevantes é o Design for Disassembly (DfD). O DfD, consiste no desenvolvimento do projeto da maneira tradicional, mas acrescenta uma fase extra onde se procura prever a sua desmontagem (Gaisset, 2011).

O conceito de DfD aplicado à Arquitetura e Construção incorpora os princípios de pré-fabricação. Esta, é muitas vezes associada a um tipo de construção em tudo igual à tradicional com a única diferença, dos seus componentes serem pré-fabricados, para posterior montagem *in Situ*. O conceito de pré-fabricação aplicado na construção, implica que o projeto seja pensado de raiz para cumprir as especificidades que o processo de fabrico e consequente transporte até ao local exigem.

Tamanho e o peso dos componentes pré-fabricados são uma das suas maiores limitações, devido à necessidade de transporte e à dimensão das máquinas de produção. De modo a contornar essas limitações têm sido adotadas metodologias de decomposição do objeto arquitetônico em parte, isto é na sua discretização. O termo discretização surge da matemática onde corresponde, numa definição simplificada, ao ato de subdividir uma unidade contínua em unidades individuais (Hovestadt et al, 2020).



Figura 2.5.1. Vista geral do projeto Kodama do Arquiteto Kengo Kuma, 2018. Fonte: <https://www.archilovers.com/projects/232926/kodama.html>

Figura 2.5.2. Esquema de montagem das diferentes peças discretas que permitem construir um módulo utilizado no projeto. Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/969657/pavilhao-block-west-automated-architecture-auar-labs>

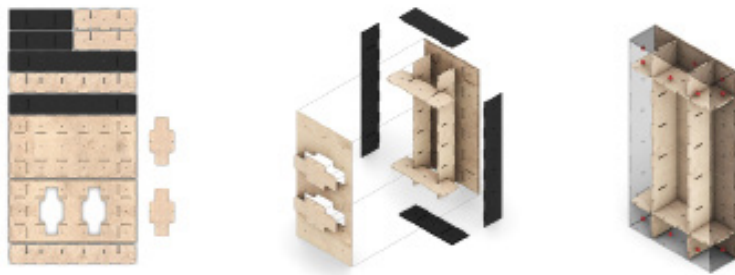


Figura 2.5.5. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/969657/pavilhao-block-west-automated-architecture-auar-labs>



Aplicado à arquitetura e com o auxílio de ferramentas de desenho computacional, a discretização é normalmente associada ao ato de subdividir superfícies ou formas complexas em unidades inferiores de maneira a facilitar a construção, o processamento computacional, o seu fabrico e transporte.

A casa Dominó de Le Corbusier, é um sistema construtivo que propõe na década de 1910 uma maior simplificação do sistema construtivo e estrutural dos edifícios. Para tal, propõe a integração de um sistema de elementos Standard direcionando-os para uma nova forma e espaço arquitetónico. Simultaneamente, este sistema permitiu a otimização de elementos estruturais tornando-os mais esbeltos (Palermo, 2006). A ideia de discretização do objeto arquitetónico aliada aos novos métodos digitais disponíveis para projeto na arquitetura trazem oportunidades no que toca à definição e construção de sistemas construtivos mais flexíveis permitindo a reversibilidade e a personalização.

A discretização em Arquitetura propõe um paradigma que altera a cadeia de produção desde o conceito à montagem. A *Arquitetura Discreta*, texto de Gilles Retsin (2019) tem como base formal a utilização de um ou vários componentes que podem ser produzidos em série e agregados de múltiplas formas

Este tipo de abordagem ao projeto, mostra-se particularmente interessante quando cruzado com a utilização do desenho computacional. Com recurso a algoritmos é possível prever e simular de forma mais precisa um grande número de combinações. Estas combinações podem ter diferentes propósitos podendo-se desenvolver uma otimização que se desenvolve em função das necessidades específicas do projeto.

A construção tradicional, caracteriza-se como um tipo de abordagem *Top-Down* (do todo para o particular) em que normalmente se avalia primeiro a forma e volumetria global do objeto, para subsequentemente se subdividir em partes como pilares, vigas, lajes, alvenaria, (...).

A abordagem de Retsin à Arquitetura discreta apoia-se na capacidade combinatória dos componentes discreto. Esta caracteriza-se por ser uma abordagem Bottom-Up (do particular para o todo), definindo normalmente um ou vários módulos base, e sistemas de ligações que possibilitam a agregação das partes. A versatilidade deste processo é comprovado no método de fabrico e montagem, uma vez que recorre a peças autónomas, mas semelhantes que facilitam a sua produção em massa. Um exemplo deste processo são as peças utilizadas no Kodama Project, do Arquiteto Kengo Kuma, Figura.2.5.1.

É exemplo de outro tipo de abordagem o pavilhão Block West/ Automated Architecture (AUAR) Labs, figura. 2.5.3. em que através da subdivisão do módulo principal torna possível que as peças utilizadas sejam trabalhadas no seu processo de fabrico de forma autónoma, por exemplo em máquinas CNC e posteriormente agregadas para dar forma ao módulo final, Figura.2.5.2.

O módulo proposto no caso de prático no capítulo 5, tira partido da combinação entre fabrico digital e montagem autónoma permitida pela abordagem discreta. O módulo é desenhado recorrendo a modelos computacionais que são posteriormente montados com recurso a um braço Robótico, que agrega os vários componentes.

Uma das vantagens da utilização de elementos discretos, é a possibilidade da reversibilidade da função. Por exemplo, um módulo anteriormente utilizado numa laje pode transformar-se numa parede, banco ou mesa.

A utilização deste tipo de elementos, considera que o objeto arquitetónico poderá sofrer alterações ao longo da sua vida útil, em função das necessidades. Deste modo aumenta-se a circularidade dos elementos construtivos, reduzindo desperdício e resíduos, uma vez que todos os elementos podem ser reaproveitados para novas construções ou para a reconstrução de edifícios.

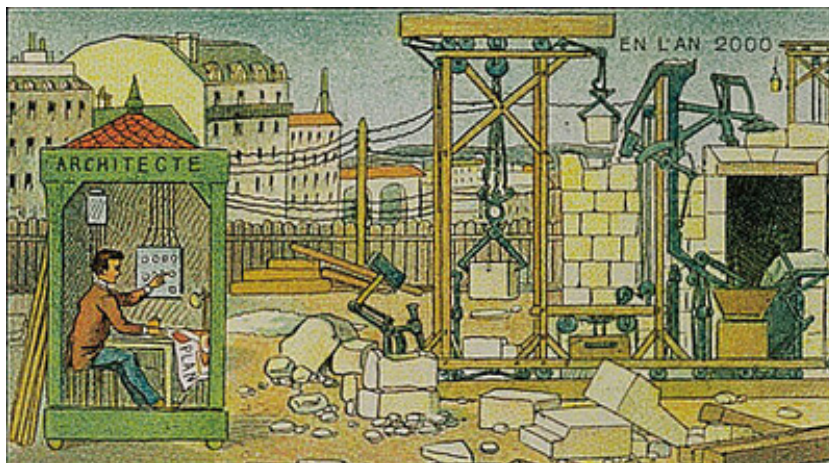


Figura 2.5.4. Figura da série de imagens com o nome “*En L’An 2000*”, desenhadas na década de 1990, onde se pretendia refletir sobre como seria o futuro no ano de 2000. Fonte: <https://amusearte.hypotheses.org/6425>

Devido à crescente necessidade de implementação de processos DfD na construção e implementação de sistemas de digitalização, é iminente a necessidade de associação de processos de discretização e automação.

O termo automação, deriva do latim *Automatus* que significa mover-se por si só. Normalmente, é associada ao uso de máquinas para executar e controlar processos de produção com uma supervisão mínima da parte dos seres humanos (Chui, 2019).

Embora amplamente utilizada em diversas indústrias como o caso da indústria automóvel e da eletrónica, na indústria da construção onde se inclui a Arquitetura, são poucos os processos que permitem algum nível de automação.

A tentativa de implementar sistemas autónomos ou semiautónomos na construção não é uma ideia nova. A arquitetura sempre foi uma disciplina onde a ideia da articulação entre máquina e projeto esteve presente. Este facto verifica-se desde logo no tratado *De Architectura* de Vitruvius (séc. 1 a.c.) onde o livro 10º retrata um conjunto de maquinaria para apoio à construção.

Segundo Retsin (2019), automatizar a forma como se constroi atualmente não faria sentido, o problema da implementação de novos sistemas de automação na Arquitetura e Construção está no modo como atualmente se constroi.

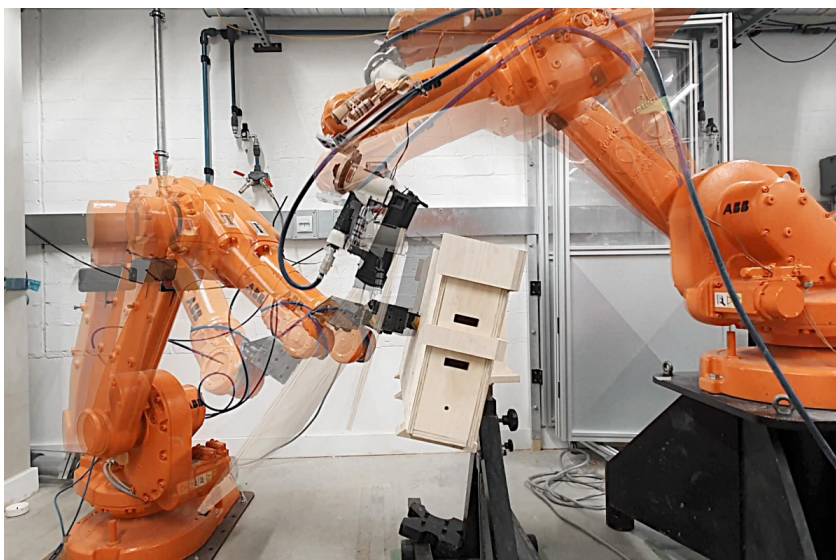
Figura 2.5.5. Robots a executarem a montagem de um dos módulos através das tarefas de posicionamento e fixação com recurso a uma pistola de pregos. Fonte: <https://woodtech.events/robotic-fabrication-using-plywood-building-blocks/>

Esta afirmação é justificada exemplificando que um edifício ao ser constituído por 7000 peças individuais, sendo que a sua maioria diferentes uma das outras e com sistemas de instalação com diferentes especificidades, são necessários diferentes trabalhadores, com diferentes especialidades, e ainda vários tipos de ferramentas que variam dependendo do material ou sistema construtivo.

Para que a indústria da construção se adapte aos novos sistemas de automação, é necessário uma mudança radical na forma como o projeto de Arquitetura é pensado e depois executado. A automação na Construção reaproxima o projetista do construtor na medida em que ambos podem ser o mesmo.

Essa característica está na origem ao termo “File-to-factory” (Kolarevic, 2003). Este termo tem origem no facto da introdução do computador no processo de trabalho do arquiteto ter possibilitado o controlo de máquinas CNC, que permitem que o arquiteto consiga passar diretamente um determinado design para a fase de fabrico. A Robótica traz um novo significado a este termo, que as tradicionais máquinas CNC não conseguiram trazer. O recurso à Robótica implementa na Arquitetura e Construção o conceito não só de possibilidade de fabrico, mas também montagem, figura 2.5.5.

Entre outros benefícios, a utilização de sistemas autónomos em articulação com métodos de trabalho 100% digitais, possibilitam que o custo de produção do componente Arquitetónico personalizado seja idêntico ao preço de um elemento *standart*. Este tipo de processo apenas é possível de ser implementado através de sistemas com grande capacidade de personalização, acessível por exemplo a sistemas de fabricação Robótica, que são abordados nos capítulos seguintes.



3. Fabricação Robótica

3.1. Enquadramento

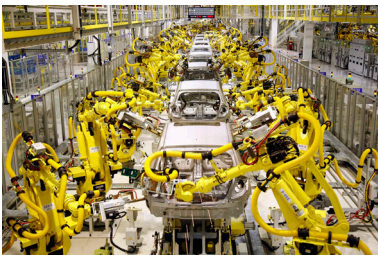


Figura 3.1.1. Linha de montagem automóvel robotizada. Fonte: <https://www.razaoautomovel.com/2017/07/hyundai-automoveis-modernos>

O Robot industrial, nas suas mais variadas formas, como os braços Robóticos é algo indissociável quando pensamos nas linhas de produção da indústria automóvel ou eletrónica.

Em pleno séc. XXI, Robots industriais são utilizados nas mais variadas tarefas e já não se limitam apenas às grandes indústrias ou empresas, estando presentes em milhares de fábricas a realizar tarefas normalmente altamente repetitivas, perigosas ou que precisam de uma combinação de alta precisão com elevada repetibilidade. Apesar de todos os avanços da Robótica, o setor da indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), não têm acompanhado a tendência de digitalização de outras indústrias, sendo os sectores com o menor índice de digitalização no mundo (Rajat Agarwal, 2016).

Porém, na última década, verifica-se uma crescente integração de sistemas de Robótica e automação nestes sectores. A este facto muito se deve à adesão de arquitetos, projetistas e investigadores a novas metodologias de projeto computacional, em que pelo recurso a linguagens e programação visual, facilitam o acesso a tecnologias e processos de manufatura de componentes arquitetónicos mediados por sistemas Robóticos.

Atualmente, vários grupos de investigação em diversos contextos académicos e industriais, têm vindo a desenvolver projetos que recorrem à utilização de braços Robóticos industriais para a construção de protótipos arquitetónicos de pequena e grande escala, comprovando o seu potencial na produção e montagem de formas arquitetónicas não regulares, que de outro modo seriam impossíveis, ou muito difíceis de concretizar apenas com a utilização de mão de obra humana.

Com o avançar do interesse de profissionais ligados ao ramo da Arquitetura, Design e Construção, começam a surgir diversos *add-on*, que permitem o controlo dos braços Robóticos através de uma interface de programação visual, permitindo a profissionais com menores conhecimentos de linguagens escritas consigam programar Robots industriais de forma eficaz.

3.2. Origem e evolução dos Robots

O termo Robot é usado pela primeira vez em 1921 no título de uma peça de teatro de ficção científica Checa com o título “R.U.R- Robots Universais de Rossum” do escritor checo Karel Čapek (1890-1938). O termo foi criado a partir da palavra Checa “Robota” que tem como tradução o “trabalho forçado”.

Nas primeiras décadas do século XX, com o acelerar da industrialização e disseminação da energia elétrica, surgem as primeiras linhas de montagem mecânicas. Uma das indústrias em expansão naquela época era a indústria automóvel. Deve-se a Henry Ford (1863-1947), engenheiro e fundador da Ford Motor Company, o desenvolvimento destes sistemas de manufatura em massa pela introdução de linhas de montagem, que passa a ser utilizado na generalidade das indústrias.

O sistema implementado por Ford, figura 3.2.1, pressupõe o desempenho de tarefas altamente repetitivas e cansativas para os trabalhadores. A solução para este problema passaria por conceber dispositivos mecânicos que pudessem desempenhar ciclos de tarefas repetidas, sem sujeitar os trabalhadores a fadiga e permitindo manter um ritmo de produção constante. É com este propósito, que em 1961 é vendido à General Motors o Robot Unimate, o primeiro Robot industrial de sempre. Criado pela empresa Unimation, que anos antes (1954) havia patenteado uma tecnologia chamada “Universal Automation”, este Robot dá o mote para a criação de engenhos que automatizam processos altamente repetitivos. A figura 3.2.2, mostra o Robot Unimate, inicialmente preparado para aplicações na indústria automóvel, para a execução de tarefas de corte e soldadura.

Em 1969, Victor Scheinman, estudante de engenharia mecânica no Stanford Artificial Intelligence Lab (SAIL), desenvolve o primeiro braço Robótico controlado através de um micro-computador. Este Robot, denominado de Stanford Arm, representa um significativo avanço na Robótica para aplicações industriais abrindo caminho para o desenvolvimento, em 1974, por Richard Hohn do robot T3, figura 3.2.3. Este foi o primeiro Robot industrial controlado por um micro-computador a ser comercializado, sendo apelidado de “The Tomorrow Tool”(IFR, 2020).

Ainda no ano de 1974, é lançado no mercado outro Robot industrial denominado de IR6, pela empresa que virá mais tarde a dar origem à atual fabricante de Robots ABB. Este Robot destaca-se por ser um Robot antropomórfico de 5 graus de liberdade que era controlado através de um microprocessador Intel onde todos os seus eixos eram acionados eletricamente.

Desde o início de 1970, devido ao acelerar na inovação e potenciais dos Robots, as vendas de Robots industriais começaram a subir cerca de 30% ao ano (Wallén, 2008), sendo a indústria automóvel a maior responsável devido ao seu elevado crescimento nestes anos. Durante a década de 1980 a elevada procura continuou, principalmente pelos Robots indústrias. A população em geral, começa a aperceber-se das potencialidades que estas tecnologias aportam para as mais diversas indústrias. O avanço da Robótica até aos dias de hoje deve-se sobretudo à otimização dos sistemas através da introdução de sensores que permitiram aumentar o nível de automação culminando numa cada vez menor dependência do ser humano para operação destes sistemas.

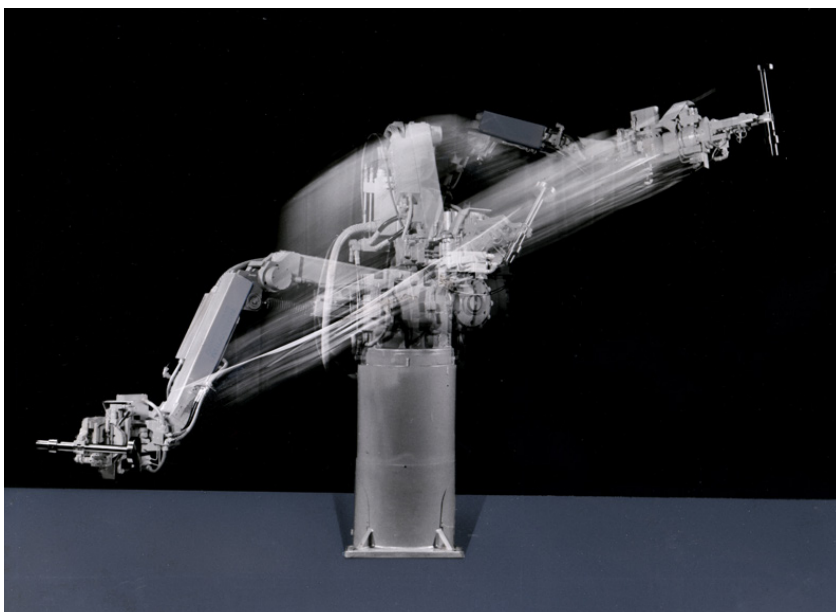
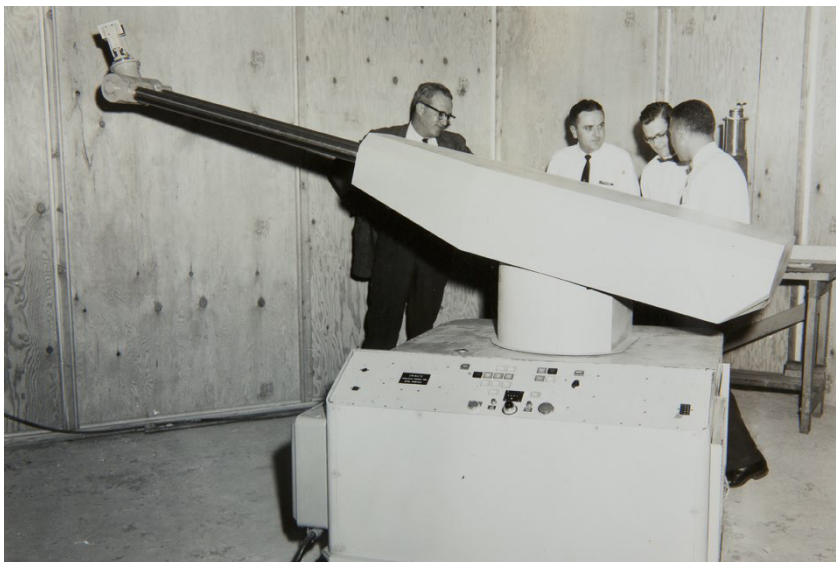
Desde então, o Robot industrial tem-se disseminado um pouco por todo o mundo e nas mais diversas indústrias. Embora décadas à frente, as principais indústrias que utilizam sistemas de fabricação Robótica continuam a ser a indústria automóvel, a indústria eletrónica e a indústria metalúrgica, principalmente devido à necessidade de elevada precisão e níveis de segurança que este tipo de automação permite. No gráfico da figura 3.3.4, observa-se simultaneamente o número de Robots dedicados a diversos sectores da indústria entre os anos de 2010 a 2019.

De acordo com os dados do International Federation of Robotics, em 2020, existiam mais de 2,7 milhões de Robots alocados às diversas indústrias (IFR, 2020), considerando que estes valores tendem a crescer significativamente a cada ano, como está representado no gráfico da figura 3.3.5. As regiões do mundo mais industrializadas são as que detêm mais Robots. O continente asiático domina o número de Robots em operação com países como a China, Índia, Japão e Coreia do Sul a serem os países com uma maior força operária de Robots.

Figura 3.2.1. Uma das primeiras linhas de montagem automóvel da Ford Motor company em 1913. Fonte: www.logisticadescomplicada.com

Figura 3.2.2. Robot Unimate, o primeiro componente mecânico-eletrônico capaz de auxiliar nos processos fabris, nomeadamente na fabrica automóvel da General Motors em 1969. Fonte: <https://blog.eletrogate.com/o-que-e-robotica-conceito-historia-e-evolucao/>

Figura 3.2.3. T3 Robot, o primeiro Robot comercializado que era controlado por um micro-computador. Fonte: <https://ifr.org/robot-history>



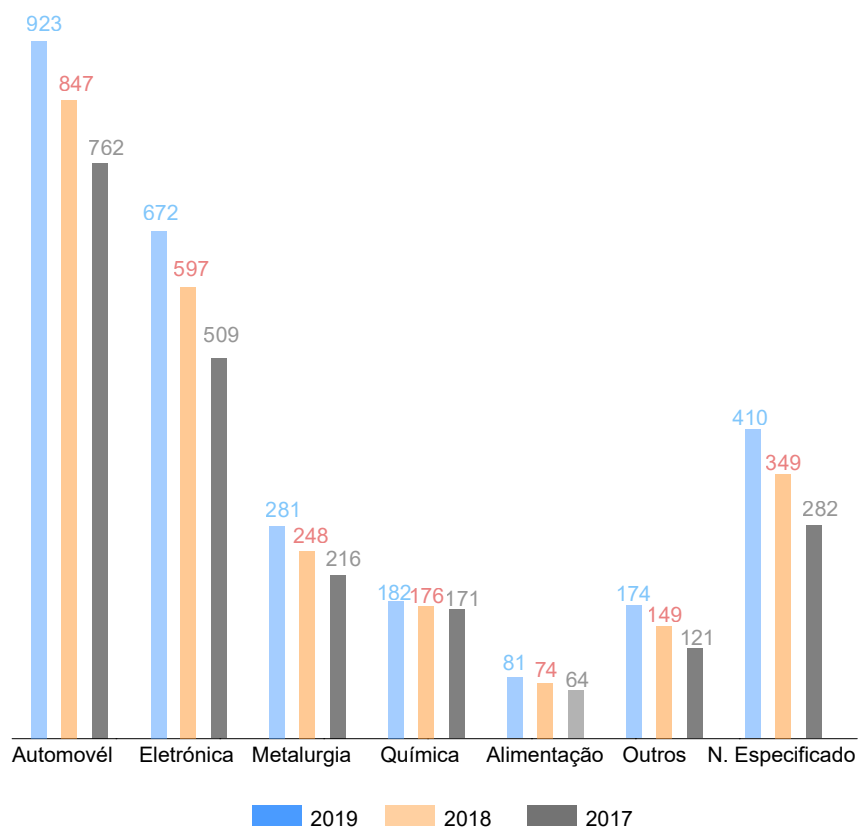
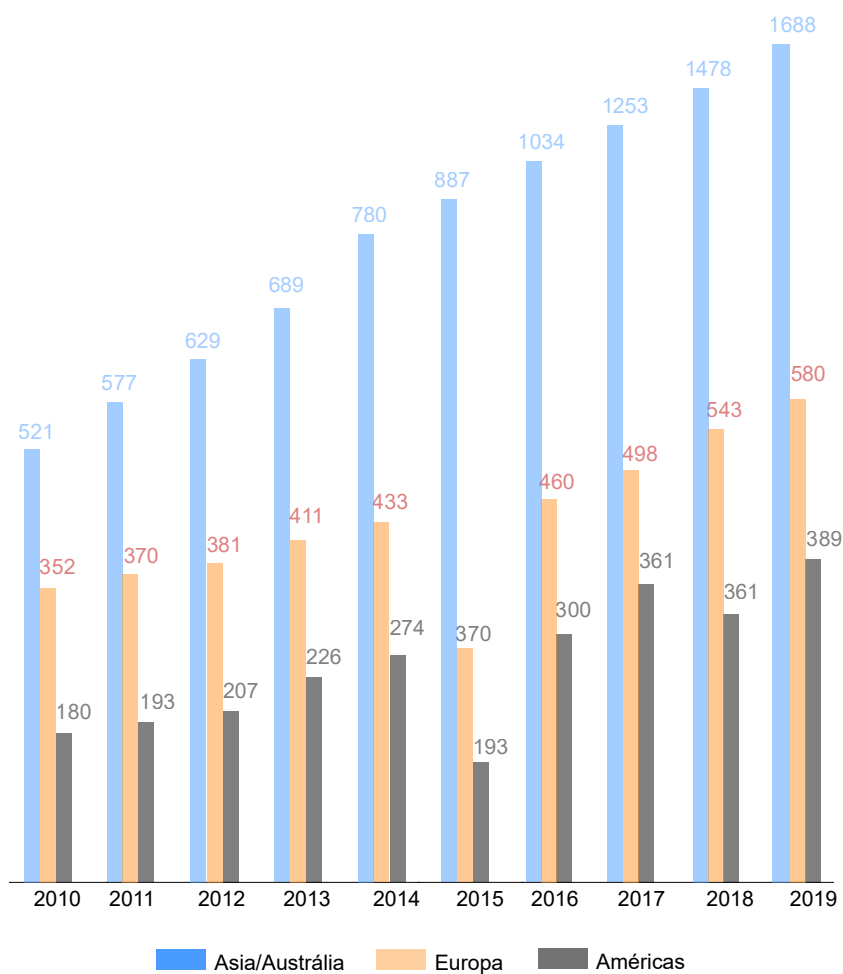


Gráfico 3.3.4. Robots em uso no mundo inteiro, por tipo de indústria ao longo dos últimos 3 anos de 2017 a 2019 em milhares de unidades. Fonte: Relatório de 2020 da Federação Internacional de Robótica

Gráfico 3.3.5. Robots em uso por continente ao longo da última década em milhares de unidades. Fonte: Relatório de 2020 da Federação Internacional de Robótica



3.3. Sistemas de Fabrico Robótico em Arquitetura e Construção



Figura 3.3.1 Robot japonês, Boardman-100 a dar apoio à colocação de placas numa construção. Fonte: Mason, Molly. (2015)

Fase 1 (séc. XX)

Como mencionado, o uso de Robots industriais é comum há várias décadas, contudo a sua integração em processos construtivos é ainda pouco explorada. As primeiras experiências de utilização da Robótica na construção deram-se no Japão durante as décadas de 1970 e 1980. O motivo para a investigação nesta área no Japão, deve-se a uma crise de mão de obra do setor da construção, durante esse período de grande desenvolvimento imobiliário do país. Este problema fora provocado por um forte crescimento econômico que exigia um crescimento do setor que não conseguia atrair mão de obra jovem devido às más condições de trabalho, baixa remuneração e ao envelhecimento da força operária que se traduzia em menor produtividade. Para tentar arranjar uma solução, a recém-criada JIRA (Japanese Industrial Robot Association) criou uma comissão com o objetivo de investigar o potencial do uso da Robótica para realizar tarefas na construção colocando Robots em obra substituindo a necessidade de mão de obra humana.

Para esse efeito foi criada uma equipa de investigadores liderada por Yukio Hasegawa, professor da Universidade de Waseda. Apoiados por um forte tecido empresarial de empresas ligadas à criação e fabrico de Robots industriais como a Schimizu, Taisei ou Takenaka, rapidamente foram criados diversos protótipos que foram testados em obra. No entanto, apenas uma pequena percentagem dos protótipos desenvolvidos se mostraram compatíveis com as tarefas em ambiente real, como por exemplo o Robot Boardman (figura.3.3.1) que auxiliava os operários na colocação de placas em paramentos. As conclusões dos investigadores nesta fase, permitiram perceber que os equipamentos Robóticos em obra não eram uma solução viável devido a diversos fatores, dos quais se destacam: a fragilidades dos equipamentos, a impossibilidade de correções em tempo real aliado ao facto de que cada Robot apenas cumpria uma função e ainda a realidade de que cada edifício tem diferentes necessidades, estrutura e acabamentos. Por isso, chegaram à conclusão de que a utilização de Robots em obra na construção não seria de todo viável.

Apesar desse fracasso inicial, na década de 1980 surgem algumas ferramentas úteis à indústria da construção, principalmente no que respeita à pré-fabricação. É nesse período que se disseminam as máquinas CNC (Controlo Numérico por Computador), inicialmente com movimentos de 2 eixos de liberdade, e posteriormente com 3 eixos de liberdade, para o controlo de fresadoras ou ferramentas de corte a laser. Neste período, estas ferramentas introduzem numa primeira fase a automatização ou semi-automatização de processos já com uma elevada capacidade de personalização.

Um conhecido exemplo da utilização deste tipo de tecnologias foi o projeto “Serpentine Gallery Pavilion”, elaborado pelos Arquitetos Álvaro Ciza Vieira e Eduardo Souto de Moura em colaboração com o Engenheiro Cecil Balmond no ano de 2005 para Kensington Gardens em Londres, figura 3.3.2. O projeto foi todo ele mediado por softwares de desenho digital, que permitiram que a equipa espalhada por 3 países diferentes trabalhasse em conjunto. Essas equipas estavam distribuídas pela equipa de Arquitetura em Portugal, a equipa de Engenharia em Inglaterra e a equipa de produção na Alemanha. O objetivo desta estrutura, temporária para apenas 6 meses de permanência, era criar um espaço acolhedor para os visitantes do jardim no qual se insere.

Para o fabrico das peças, foi utilizada madeira lamelada que foi trabalhada com recurso a um Robot Kuka de 5 eixos equipado com uma fresa para madeira e com capacidade de trocar de ferramenta permitindo múltiplas operações, figura 3.3.4. A articulação entre as várias equipas através da utilização do mesmo software, permitiu minimizar os erros na fase de desenho e produção das peças, todas elas diferentes. Permitiu, que a “tradução” do desenho fosse mais facilmente transmitida ao braço Robótico, que se encarregou do corte de todos os entalhes e respetiva etiquetagem de todas as peças, permitindo uma fácil montagem e desmontagem da estrutura, que devido às reduzidas dimensões necessita apenas de dois operários para a montar.

O que projetos como este nos mostram, é que embora neste pavilhão praticamente todas as peças sejam totalmente personalizadas, através da utilização de ferramentas controladas por computador, a personalização pode cumprir os mesmos prazos e custos que a produção estandardizada em massa.

Desde meados dos anos 2000, com a criação de diversos grupos de investigação nesta área, novas abordagens tiraram partido de novas tecnologias que foram sendo desenvolvidas. Esta mudança de paradigma fez com que ao invés de a abordagem ser a de que as ferramentas têm de se adaptar ao tipo de construção e projeto arquitetónico tradicional, consideram-se como premissas para o projeto as limitações e possibilidades que as novas ferramentas digitais introduzem, tal como outras tecnologias de manufatura.

A integração de modelos computacionais em processos aplicados à Arquitetura e à Construção, têm facilitado a comunicação entre a ideia de projeto e os métodos de automação da construção, as ideias de projeto e construção convergem mediadas por meios digitais.

Figura 3.3.2. Vista geral do Serpentine Pavilion em 2005; Fonte: <https://divisare.com/projects/288650-alvaro-siza-vieira-cecil-balmond-eduardo-souto-de-moura-duccio-malagamba-serpentine-pavilion-2005>

Figura 3.3.3. Pormenor das ligações de madeira do Serpentine Pavilion; Fonte: <http://www.balmondstudio.com/work/serpentine-pavilion-2005.php>

Figura 3.3.4. Pormenor de fresagem dos elementos de madeira, num estudo realizado pelo DFL, FAUP EM 2015. Fonte: <https://dfl.arq.up.pt/serpentine-structure/>



Fase 2 (séc. XXI)

Apesar dos recentes avanços tecnológicos, a Construção Civil ainda se encontra altamente dependente da mão de obra humana, sendo que uma das poucas tarefas que atualmente cabe a uma máquina numa construção são as tarefas de elevação de cargas, (Faabio Gramazio, xxx).

Um dos principais grupos de investigação em ferramentas Robóticas e responsáveis pela desmistificação do que a fabricação Robótica pode ser na construção é o grupo coordenado pelos Arquitetos Fabio Gramazio e Mathis Kohler, da ETH Zurique (Instituto Federal de Tecnologia de Zurique). Este grupo de investigação foi o primeiro a possuir um laboratório de investigação em Arquitetura e processos de fabricação digital onde investigam as possibilidades de implementação do uso do Robot na Arquitetura e Construção. Como resultado dessas primeiras investigações surgiu o projeto da fachada da Gantenbein Vineyard, na Suíça, realizado em 2006, figura. 2.3.5.

O projeto iniciou-se com um contacto por parte dos arquitetos responsáveis pela obra para que o grupo criasse uma fachada que desempenhasse um papel de regulador térmico ao mesmo tempo que filtrasse a luz solar. Através da utilização de um modelo computacional para análise da incidência solar, foi obtido o desenho final da fachada e o posicionamento individual de cada tijolo. O resultado foi uma fachada construída com 20,000 tijolos cerâmicos maciço, assentes com diferentes ângulos entre si de modo a cumprir as especificidades do projeto. Para a montagem, nas instalações do laboratório do ETH, foi utilizado um conjunto de braço Robótico e um dispensador de argamassa figura .2.3.6. O braço movia o tijolo de acordo com a trajetória predefinida até ao dispensador onde era colocada a argamassa numa das suas bases. Em seguida o braço Robótico continuava a trajetória até à localização exata do tijolo, colocando-o com a orientação definida no desenho inicial, sobrepondo as diversas camadas sucessivamente. Posteriormente, os painéis eram levados para a obra com um camião e colocados no local final com a ajuda de uma grua. Deste modo, exemplifica-se como com recurso às ferramentas Robóticas, é possível o posicionamento de peças com o rigor pretendido, que não seria viável para ser executado à mão por um ser humano.

Algumas das investigações que incidem no uso destas tecnologias têm explorado a possibilidade de deslocação física dos Robots, mais especificamente de braços Robóticos para que estes possam ser usados em obra. Em 2011, o mesmo grupo Gramazio & Kohler, no âmbito dos resultados de um programa de investigação chamado ECHORD, construiu um Robot constituído por um braço Robótico antropomórfico posicionado no topo de uma plataforma movida por lagartas, figura 2.6.7. O objetivo é que este possa auxiliar a mão de obra humana na construção in situ. No entanto, uma das principais limitações assinaladas por este projeto de investigação foram semelhantes às do passado no Japão, onde se constatou, que para que a utilização do Robot tenha lugar em obra, este terá de se conseguir adaptar em tempo real às condicionantes do local onde opera.

Atualmente existem tecnologias que permitem essa adaptação, nomeadamente através da instalação de sensores, que permitem aos sistemas de controlo do Robot fazer um mapeamento digital dos objetos e materiais que o rodeiam. Estes processos, podem ocorrer em tempo real de modo que a que este possa interpretar o que se passa à sua volta, adaptando os seus movimentos a essas informações.

Com o objetivo de testar a integração destes sistemas in situ, entre 2011 e 2012 no culminar da investigação Echord, vários testes foram realizados que deram origem aos projetos Endless Wall, Figura.X.

No que respeita à construção in Situ, outro tipo de abordagens estão a ser ponderadas utilizando outro tipo de Robots. O mesmo grupo de investigação da ETH Zurique em conjunto com Raffaello D'Andrea, foi responsável pela instalação "Flight Assembled Architecture" que decorreu entre 2011 e 2012 tendo sido a primeira instalação montada com Robots voadores, semelhantes a drones especialmente modificados para o efeito, figura 3.6.8. A instalação consistiu na sobreposição de cerca de 1500 peças que foram dispostas por um conjunto de vários drones controlados a partir de um software que traduziu a informação do desenho digital para a informação de controlo de voo e compatibilização das trajetórias dos diferentes drones utilizados. A instalação em si, pretende demonstrar a possibilidade da construção de uma cidade vertical com 600 metros de altura e com capacidade para 30.000 habitantes numa zona rural de França e que se pode montar de forma autónoma. A este tipo de construção radicalmente diferente do normal os autores dão o nome de "Arquitetura Montada por Voo". (Gramazio & Kohler e Raffaello D'Andrea, 2012).

Com outro tipo de contexto, menos utópico, as ferramentas Robóticas têm vindo a ser aplicadas não só à montagem de estruturas arquitetónicas mas também na fabricação dos próprios componentes. Neste contexto, mais recentemente, o pavilhão da "Bundesgartenschau 2019" (exposição nacional de jardinagem da Alemanha), desenvolvido pelo Institute for Computational Design and Construction da Universidade de Stuttgart (ICD) fez uso de ferramentas Robóticas para fazer face ao elevado número de componentes diferentes que teriam de ser produzidos num curto espaço de tempo.

O projeto, chamado de Buga Wood Pavilio, figura 3.6.9, foi desenhado recorrendo softwares computacionais onde a forma dos elementos hexagonais, pentagonais e heptagonais, que compõe o pavilhão são uma "imitação" do exoesqueleto de um ouriço do mar subdividido em partes. Devido à inexistência de outro tipo de suporte, que não o próprio travamento de painel para painel, as tolerâncias dos encaixes eram mínimas e por isso tinham de ser extremamente rigorosos na sua construção. Segundo Hans Jakob Wagner, responsável pela coordenação do projeto, associado à grande variação de componentes e tolerâncias mínimas, seria impossível este pavilhão ser construído sem a utilização da Robótica e de programas de desenho computacional. Para a construção do pavilhão foram fabricados 376 módulos hexagonais com 17.000 encaixes diferentes com uma margem de erro de no máximo 0.03mm.

O pavilhão BUGA Wood, representado na figura 3.3.9, foi concebido sob o conceito de Co-Design, onde novas possibilidades em Design, Engenharia e Fabricação são exploradas através do recurso a softwares de desenho computacional que lhes dá um feedback em tempo real das possibilidades e das limitações do desenho. Neste projeto, os algoritmos de Co-Design desenvolvidos pela equipa de projeto (Arquitetos e Engenheiros estruturais) geram a forma de cada elemento do pavilhão de acordo com a intenção do projeto arquitetónico e os requisitos estruturais, enquanto todos os aspetos de fabricação Robótica são diretamente incorporados e negociados. O design do pavilhão ocorre simultaneamente e em coordenação com as possibilidades da fabricação Robótica.

Os elementos que compõe o Buga Wood Pavilion, foram construídos num ambiente controlado em regime de pré-fabricação. No processo de fabrico foram utilizados dois braços Robóticos industriais Kuka que trabalharam coordenados e com tarefas específicas, figura 3.6.10. Algumas dessas tarefas foram desde a fresagem dos encaixes de madeira e elementos de topo, pregar os diferentes elementos com pistola de pregos, dispensar cola, ou simplesmente manusear os módulos com cerca de 250 kg.

Os braços Robóticos industriais não foram as únicas ferramentas Robóticas utilizadas na produção dos módulos. Para além deles, uma mesa rotativa de 14 eixos desenvolvida pelo próprio ICD, deu apoio à produção dos diferentes elementos. A função desta mesa, era trabalhar em conjunto com os braços Robóticos de maneira que estes consigam alcançar os pontos programados.

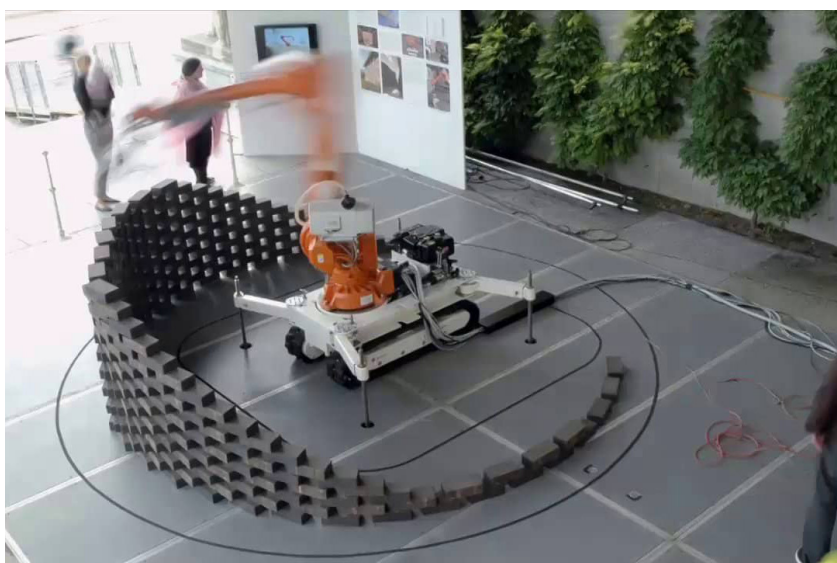
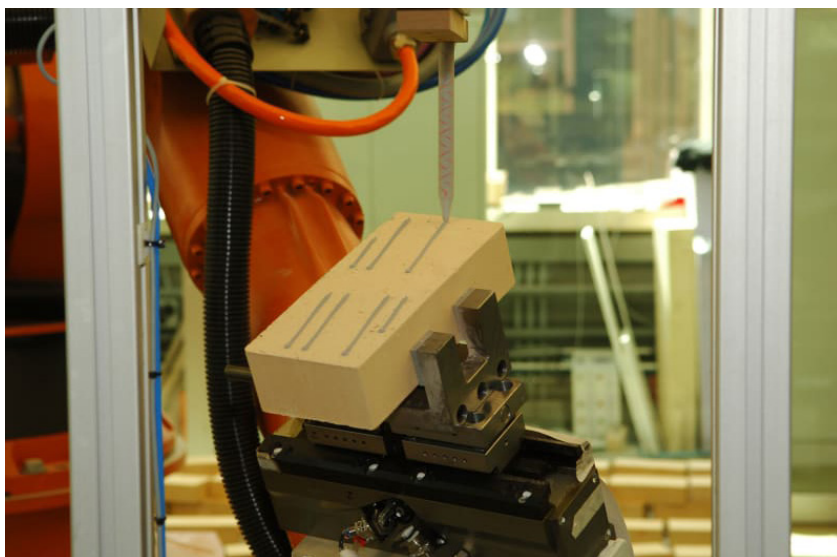
Após o fabrico dos vários módulos compostos por diversos componentes, restou à equipa transportar os módulos até ao local da montagem onde estes foram elevados com a ajuda de uma grua e facilmente “encaixados” como um puzzle.

Os sistemas Robóticos têm evoluído e são cada vez mais utilizados em indústrias que até então pareciam não ter como beneficiar da utilização de tais ferramentas complexas. No entanto, através de projetos inovadores, como os mostrados anteriormente, a utilização de sistemas Robóticos na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), são hoje vistos como uma mais-valia que permite rapidez, fiabilidade e precisão.

Figura 3.3.5. Vista geral da adega Gantenbein Vineyard, 2006. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten/501f4a3728ba0d0242000054-winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten-photo>

Figura 3.3.6. Pormenor da colocação da argamassa no tijolo, 2006; Fonte: <https://divisare.com/projects/260919-gramazio-kohler-ralph-feiner-gantenbeinvineyard-facade>

Figura 3.6.7. Fotografia do projeto: "The Endless Wall, ETH Zurich, 2011", de Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, Fonte: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/216.html>



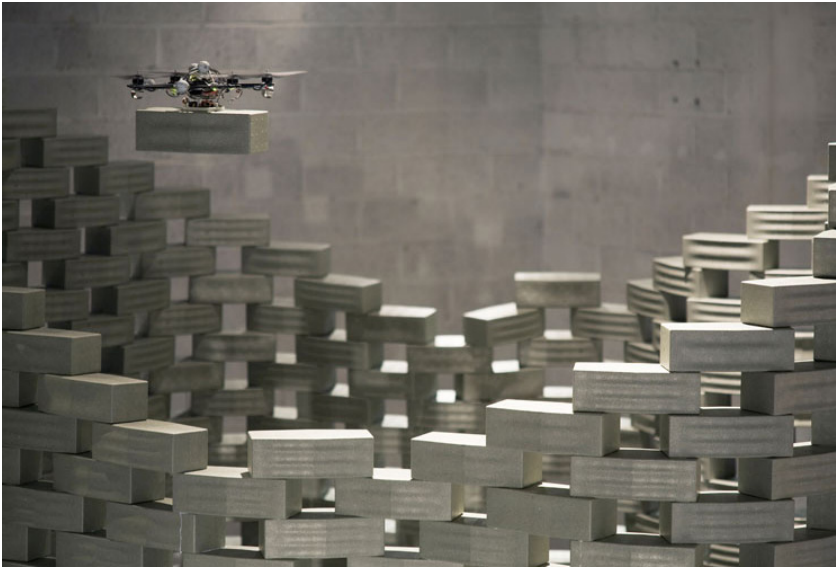
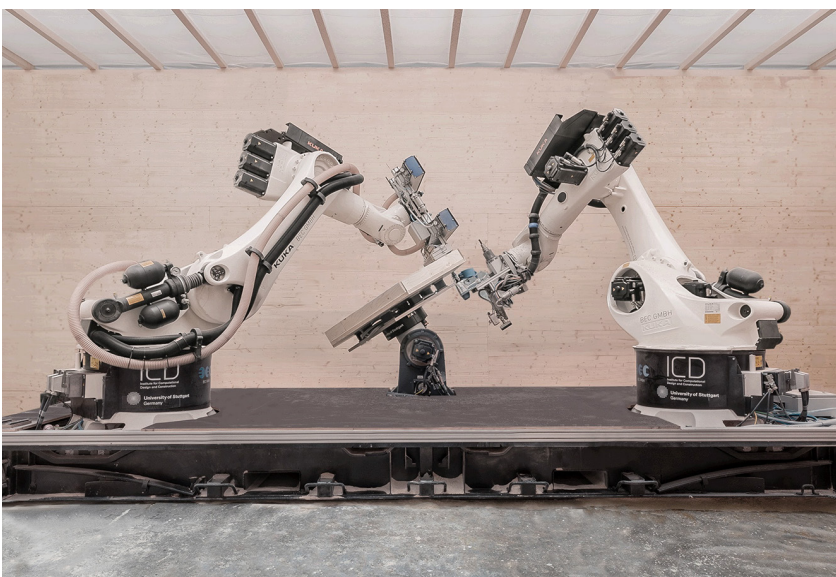


Figura 3.3.8. Imagem do Projeto de investigação "Flight Assembled Architecture" do grupo Gramazio & Kohler com Raffaello D'Andrea em cooperação com ETH Zurich. Fonte: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/209.html>

Figura 3.3.9. Imagem do pavilhão "Buga Wood Pavilion", CD/ITKE, Universidade de Estugarda. Fontes: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>

Figura 3.3.10. Robots a fabricar os módulos para a construção do "Buga Wood Pavilion", ICD/ITKE, Universidade de Estugarda. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>



3.4. Tipos de Robots

A definição globalmente aceite de Robot industrial é dada pela Organização Internacional para a Padronização ISO 8373 onde o descreve como um “manipulador multipropósito controlado automaticamente, sendo programável em três ou mais eixos” (Standardization, 2012, p. 25). Resumidamente, um Robot é qualquer mecanismo elétrico ou mecânico com três ou mais graus de liberdade e controlado ou programado por um computador.

Existem no mercado diversos tipos de Robots. Estes variam em características tão distintas, como capacidade de carga, graus de liberdade ou alcance existindo também alguns criados especificamente para uma determinada tarefa.

O Robot que se apresenta como polivalente e consegue facilmente ser adaptado a quase qualquer tipo de tarefa é o braço Robótico antropomórfico, figura 3.4.1. Este tipo de Robot é hoje extensivamente utilizado por todos os tipos de indústrias. Acompanhando esta tendência, a indústria da construção começa também a testar o potencial da utilização do braço Robótico antropomórfico em tarefas principalmente de pré-fabricação, elegendo-o juntamente com o Robot cartesiano tipo pórtico como os principais tipos de Robots com maior potencial para uso na construção.

O Robot cartesiano tipo pórtico, figura 3.4.2, tem um grande potencial para uso em construção de média e grande escala onde normalmente não são necessários mais do que 3 ou 4 graus de liberdade. Normalmente permitem movimentações nos eixos X,Y e Z, que lhe confere uma área de trabalho quadrada, pelo que é comumente utilizado em tarefas de fabricação aditiva ou de elevação de carga, assemelhando-se a uma impressora 3D convencional ou máquina de maquinação CNC, figura 3.4.3.

O Robot industrial antropomórfico por ser o que se mostra com maior potencial de utilização na indústria da Arquitetura e Construção, será aprofundado no seguimento desta investigação.

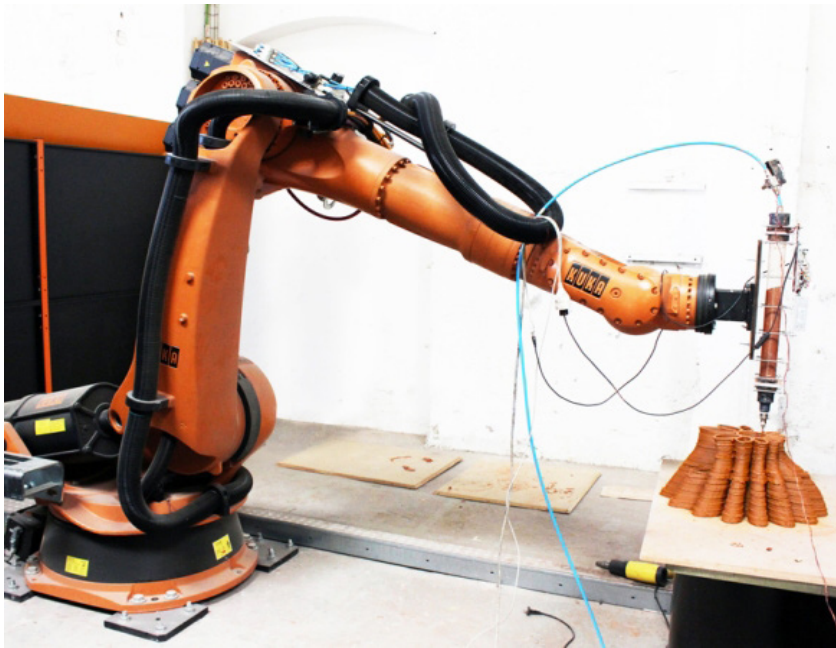


Figura 3.4.1. Exemplo de uma coluna impressa com um Robot Industrial. Fonte: Fab clay, <https://fabbots.wordpress.com/2012/12/09/fabclay-2/>

Figura 3.4.2. Impressão de casa 3D no âmbito do projeto C3PO com a participação da empresa especialista em impressão 3d kampC em Antuérpia, Bélgica, 2020. Fonte: <https://www.kampc.be/>

Figura 3.4.3. Exemplo de uma fresadora de corte CNC. Fonte: <https://www.adverts.ie/other/8x4-cnc-router/21588680>



3.5. O Robot Antropomórfico

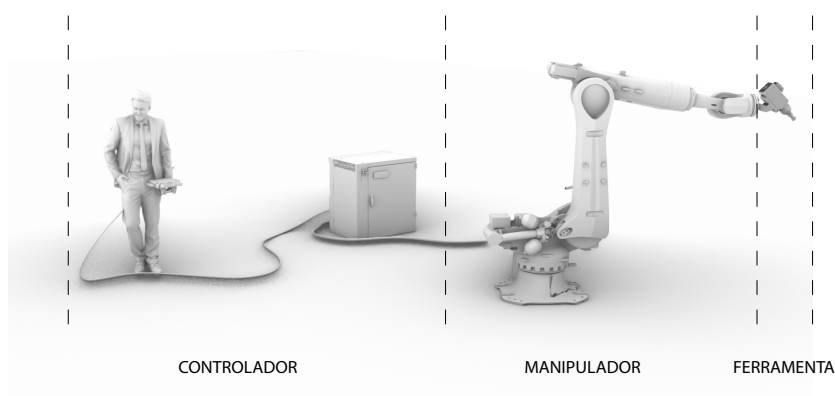
Figura 3.5.1. Esquema de funcionamento de um Sistema robótico com os seus componentes básicos.

Como apresentado no capítulo anterior, o braço Robótico antropomórfico mostra-se como o Robot mais versátil de entre os principais Robots. Os braços Robóticos industriais antropomórficos podem-se diferenciar entre não colaborativos e colaborativos.

O termo “COBOT” e o conceito de Robot colaborativo surge pela primeira vez em 1999 numa patente nos EUA onde é caracterizado como “um aparelho e método para a interação física e direta entre uma pessoa e um dispositivo manipulador de natureza genérica controlado por um computador ”(euautomation,2020). Essa patente foi registada no âmbito de uma investigação levada a cabo por J. Edward Colgate e Michael Peshkin dois professores da Northwestern University.s

Os cobots surgiram com o objetivo de permitir que um Robot dê apoio ou trabalhe em conjunto com um ser humano numa determinada tarefa, quando por exemplo em certo ponto esta envolva riscos para a saúde do operário (Universal, 2021). Desta forma o Robot colaborativo permite que um ser humano trabalhe em colaboração com o Robot, uma vez que este se encontra munido de ferramentas como alarmes que possibilitam que o operador saiba em tempo real qual a condição do Robot, permitindo assim evitar danos no Robot e ferimentos no trabalhador.

Independentemente da natureza colaborativa ou não, os sistemas Robóticos em análise dividem-se em 3 partes: O controlador, o manipulador e a ferramenta, figura 3.5.1. As características de cada uma das partes será analisada nos seguintes subcapítulos.



3.5.1. O Controlador

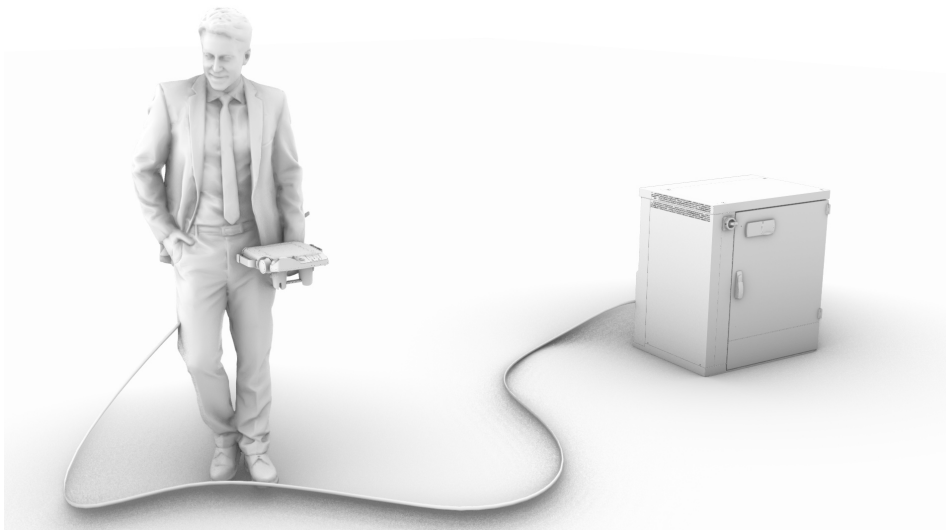
O controlador é “cérebro” do Robot, o equipamento que processa e transmite a informação, que permite comandar o movimento dos eixos e as suas ferramentas.

Este equipamento é normalmente composto pelo conjunto de componentes montados dentro de um armário para facilitar o seu transporte. O conjunto do controlador é normalmente constituído por um computador, uma unidade de controlo e potência e uma consola para comando das operações. O computador tem como função servir de interface ao utilizador a fim de controlar os diferentes parâmetros do Robot ao mesmo tempo que processa a informação fornecida.

A unidade de controlo e potência têm como função a partir das informações enviadas pelo computador fornecer energia aos diferentes componentes do Robot como atuadores do manipulador ou outros eixos e ferramentas externas, como por exemplo uma mesa rotativa ou eixo linear.

Acoplada ao controlador está uma consola chamada Teach Pendant, figura 3.5.2. Esta consola permite o controlo total das operações do Robot, uma vez que é o interface físico entre o utilizador e o Robot. Esta consola pode ser também utilizada para programar o Robot a partir das diversas possibilidades existentes para a mesma. Estas informações são aprofundadas no capítulo seguinte “7.1. Comunicação entre o utilizador e o Robot”.

Figura 3.5.2. Representação da unidade de controlo de um robot.



3.5.2. O Manipulador

Figura 3.5.3. Esquema Cinemático de um Robot industrial antropomórfico.

O manipulador, figura 3.5.3, é a estrutura física do braço Robótico. Este é constituído por um conjunto de eixos rígidos, normalmente em aço ou alumínio ligados por flanges que possibilitam a articulação de movimentos de diferentes direções, numa cadeia cinemática. Deste conjunto de componentes fazem parte os atuadores, responsáveis pelo movimento dos eixos e os sensores que transmitem informações em tempo real à unidade de potência e controlo, o controlador. Os manipuladores podem ser constituídos por vários eixos. As configurações mais comuns são compostas por 6 eixos, variando normalmente entre os 4 e 7 eixos.

A figura 3.5.3, ilustra a localização de cada um desses eixos e que tipo de movimento estes permitem que o braço execute. Quanto maior o número de eixos de um Robot, maior a liberdade de movimentos, no entanto mais extensa é a sua cadeia cinemática. Para além destes eixos é possível acoplar um eixo linear de modo a que o braço Robótico possa ser movido ao longo de um “carril” a fim de ter um maior alcance, figura 3.5.5. O eixo linear pode ser colocado no solo ou elevado onde o Robot assume uma posição de pórtico, figura 3.5.4.

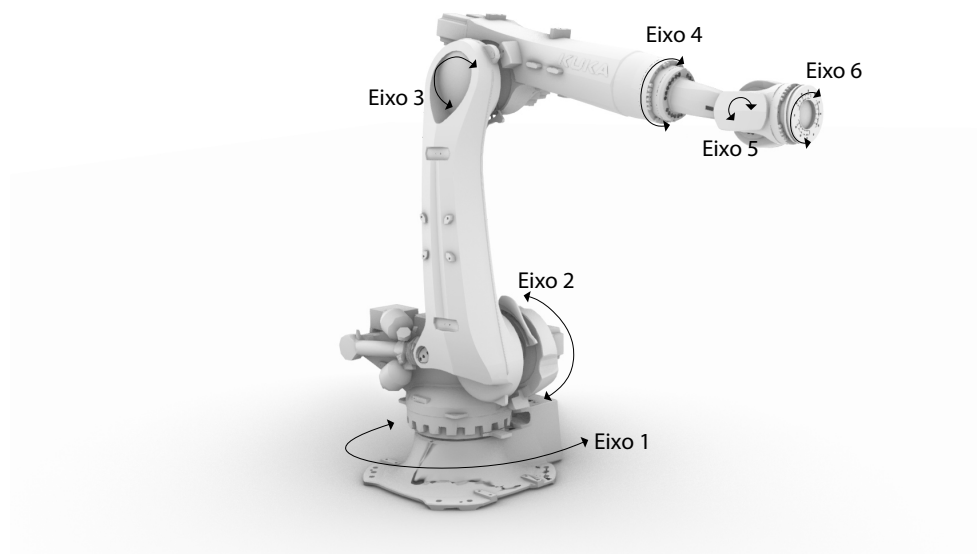
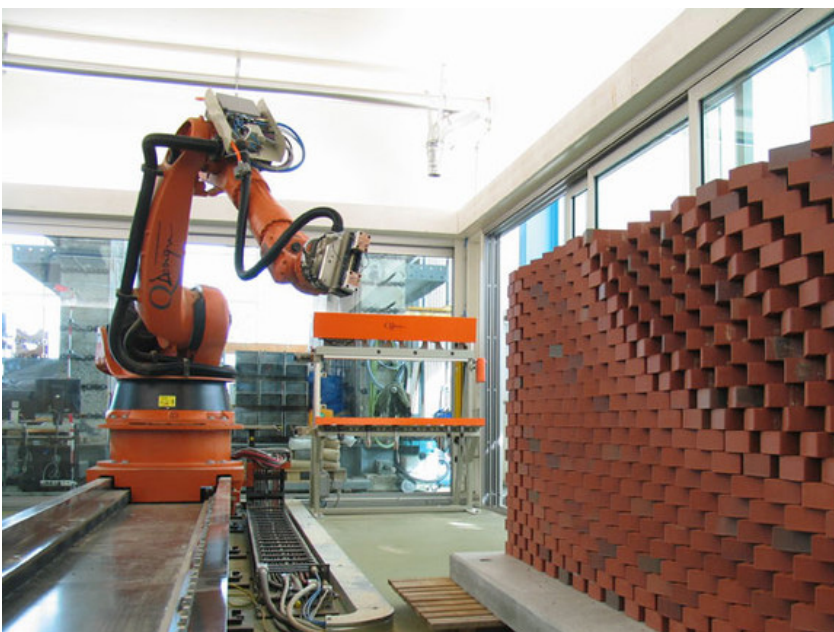




Figura 3.5.4. Exemplo de um Robot colaborativo da Universal Robots a lixar uma peça de mobiliário, 2021. Fonte: <https://www.universal-robots.com/blog/robots-sanding-furniture-no-way/>

Figura 3.5.5. Montagem de uma estrutura de madeira com a utilização de dois braços robóticos Kuka acoplados num pórtico, no laboratório de Robótica Federal da Suíça, 2018. Fonte: <https://phys.org/news/2018-03-robotic-collaboration-timber.html>

Figura 3.5.6. Robot “Sam” (Semi-Automated Mason), a construir uma parede em tijolos e argamassa em apresentação no evento “World of concrete” em 2015. Fonte: <https://pqinsel.com/pq/nuevas-tecnologias-en-la-industria-la-construccion/>



3.5.3. Ferramentas

Tabela 3.5.7. Tabela dos principais métodos e ferramentas utilizadas em processos de fabricação Robótica

O dispositivo ligado ao manipulador e que interage com o ambiente chama-se end effector ou em português órgão terminal. O terminal tem como objetivo entrar em contacto com materiais e objetos externos, ou executar tarefas de acordo com o objetivo definido pelo utilizador. Existem vários tipos de terminais para diferentes tipos de tarefas em função do tipo de material que será trabalhado. Estas relações estão sintetizadas na tabela 3.5.7, de acordo com o proposto por Bigdoli (2016).

Os diferentes métodos de manufatura dependem sempre do tipo de material e resultado final. Os métodos mais conhecidos são os aditivos e os de subtração associados à impressão 3D e ao corte a laser, respetivamente. Os métodos de união e forma são normalmente associados à indústria transformadora de materiais através da dobragem e soldadura, por exemplo de chapa. A montagem com a movimentação de peças é algo que se associa imediatamente a uma tarefa executada por Robots como acontece na indústria automóvel com a montagem de automóveis nas linhas de produção.

Método	Técnicas	Materiais
Subtração	Fresagem, Furação	Espuma, madeira, pedra, metal
Adição	Impressão 3d	Betão, cerâmica, polímeros
União	Colagem, Soldadura	Plástico, metal
Forma	Dobragem, Corte	Metal, madeira
Montagem	Movimentação de peças	Todos os anteriores

Existem diversos tipos de órgãos terminais sendo que para cada tipo de tarefa é utilizada uma ferramenta diferente. São muitas as ferramentas que podem ser acopladas ao Robot, no entanto em seguida enumeram-se as ferramentas mais comuns em função da tarefa ou material em questão.

As garras, são os *End Effectors* normalmente utilizados para tarefas que envolvam manuseamento de peças em operações de montagem de componentes, com a sua deslocação de um ponto de origem para a sua posição final. Estes são altamente personalizáveis de acordo com a tarefa e objetos em questão.

As ferramentas de maquinação, que são normalmente constituídas por um *spindle*, figura. 3.5.8, ao qual se podem afixar diferentes diâmetros, tipos e formatos de fresas, de acordo com o tipo de acabamento pretendido ou dureza do material. O processo de trabalho corresponde a um método de subtração onde a cada passagem da fresa o material vai sendo desbastado até a obtenção da forma final pretendida. Os materiais utilizados neste tipo de tarefas são normalmente metais, espumas de alta densidade, madeira ou mesmo minerais.

As ferramentas de corte, com aplicação a braços Robóticos comumente encontradas são: a serra de fita, fio quente, corte a laser e o corte com jato de água. Todas estas têm em comum o objetivo de recortar ou moldar diferentes materiais. O tipo de ferramenta a utilizar depende do tipo de material, sendo a serra de fita preferencialmente utilizada em materiais mais moles como a madeira, figura 3.5.10, o fio quente em materiais densos, mas termicamente sensíveis como as espumas, o corte a laser normalmente no aço e o jato de água no corte de pedra ou aço. A serra de fita e o fio quente mostram uma versatilidade que os demais não conseguem igualar, que é a possibilidade de recorte em diferentes ângulos num movimento contínuo ao longo de um percurso, algo que só é possível com este tipo de ferramentas acopladas a um braço Robótico.

As ferramentas de fabricação aditiva também são correntemente acopladas a braços Robóticos, nomeadamente extrusoras de materiais poliméricos, compositivos e cerâmicos, figura 3.5.9. Ao associar-se uma ferramenta de extrusão a um braço Robótico, mantém-se a possibilidade de controlo da velocidade, do fluxo de extrusão, mas o grau de liberdade formal expande-se, assim como a possibilidade de aumento da dimensão dos modelos em manufatura, ou mesmo a possibilidade de integração deste tipo de processos em estaleiro de obra (in situ). Finalmente, interessa mencionar as ferramentas de união. Existem diversos tipos de aplicação destas ferramentas, entre as existentes destacam-se as pistolas dispensadoras de cola, máquinas de costura, ou ainda ferramentas de soldagem por arco. Esta última normalmente utilizada na indústria automóvel, uma vez que aliadas à tecnologia Robótica permitem trabalhos sempre limpos e precisos em tarefas altamente repetitivas. Os materiais mais utilizados são os metais e os plásticos.

Existem para além destes, outros processos que juntam um pouco dos vários acima apresentados. Exemplo dessa utilização é a técnica de fabrico “Wire Arc Additive Manufacturing” ou em Português Manufatura aditiva por soldadura de arco. Esta técnica consiste na utilização de um processo semelhante à soldadura mas com a deposição de camadas extremamente finas semelhantes ao que acontece na impressão 3D. Um dos mais paradigmáticos exemplos da utilização desta inovadora técnica de fabrico é a ponte sobre o canal de Amesterdão “Oudezijds Achterburgwal”, construída pelo estúdio MX3D, especializado nesta técnica de fabrico. Através da utilização desta técnica de manufatura, foi possível fabricar a ponte representada nas figuras 3.5.11 a 3.5.13, sem a necessidade de suportes ou qualquer tipo de moldes. O fabrico da mesma, apenas foi exequível, pela versatilidade que o braço Robótico permite devido à quantidade de graus de liberdade que este possui.

O grande ponto positivo da opção pelo braço Robótico Industrial na Arquitetura, é a versatilidade que todos os end Effectors acoplados ao Robot ganham e que não possuem quando acoplados a uma máquina de estrutura cartesiana tradicional. Essa versatilidade extra torna interessante e cada vez mais valiosa a utilização do Robot em tarefas onde até então seria impossível utilizar este tipo de ferramentas.

Figura 3.5.8. Fresagem de poliestereno expandido para o departamento de Arte do estúdio Babelsberg GmbH, com recurso a um Robot Kuka equipado com uma fresadora. Fonte: <https://www.kuka.com/pt/ramos-de-atividade/banco-de-dados-de-solu%C3%A7%C3%B5es/2018/01/rob%C3%B4-de-fresagem-kuka-no-studio-babelsberg>

Figura 3.5.9. Impressão de um elemento de fachada com recurso a um Robot Quantec para a empresa de construção Belga "Besix Group"..2021. Fonte: <https://www.kuka.com/en-us/company/press/news/2021/05/besix-3d>

Figura 3.5.10. Corte de madeira em bruto com recurso a um braço Robótico Kuka equipado com uma serra de fita. Fonte: Larsen, 2020, disponível em https://www.researchgate.net/publication/341743804_Robotic_processing_of_crooked_sawlogs_for_use_in_architectural_construction

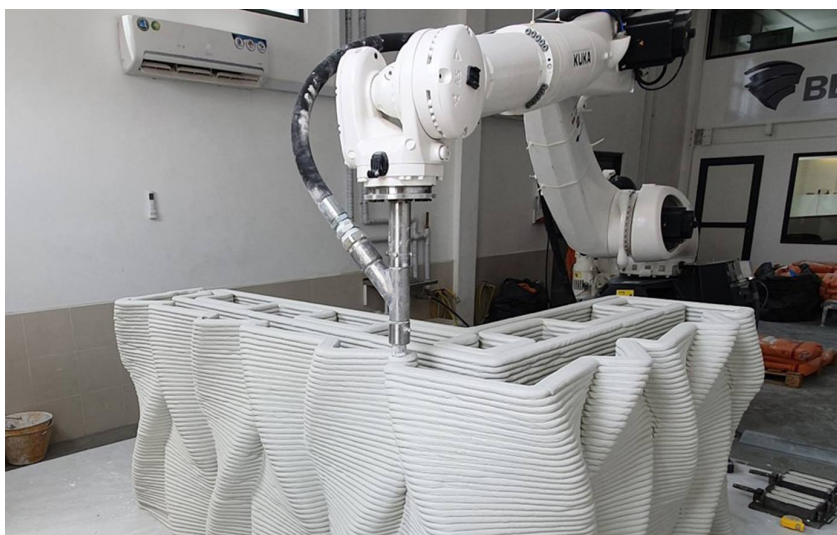
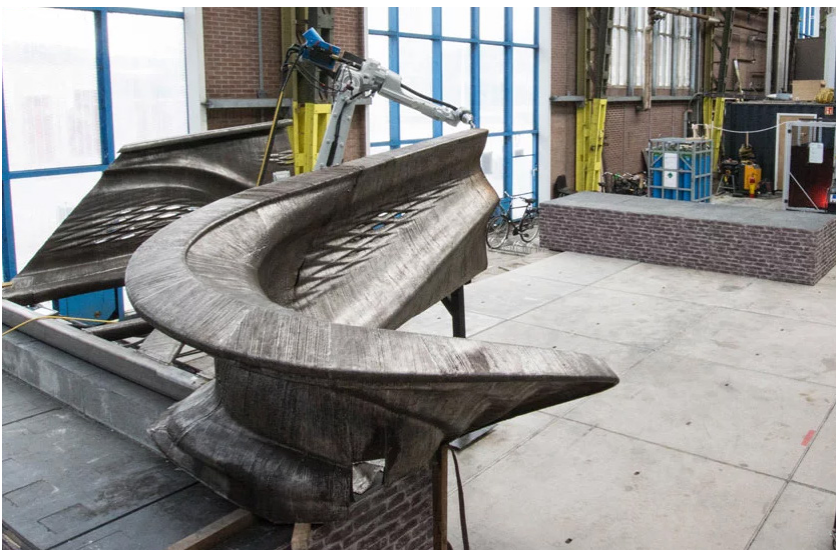
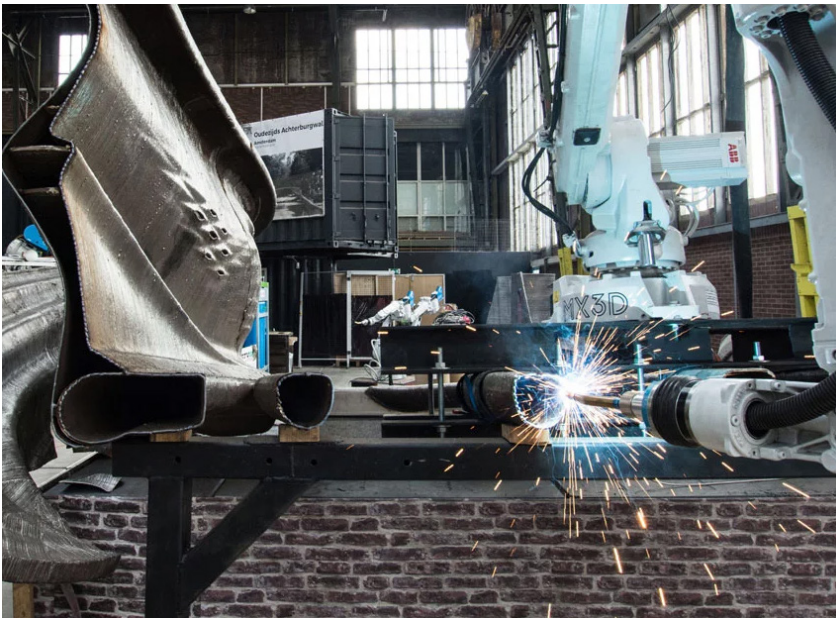




Figura 3.5.11. Imagem da ponte desenhada e fabricada pelo estúdio MX3D com recurso a técnicas de deposição de metal com recurso a um braço Robótico. Fonte: <https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>

Figura 3.5.12. Pormenor do fabrico Robótico da ponte do canal “Oudezijds Achterburgwal” de Amesterdão, pelo estúdio MX3D. Fonte: <https://mx3d.com/timeline/1-3-of-the-bridge-is-done/>

Figura 3.5.13. Imagem do fabrico Robótico da ponte.o canal “Oudezijds Achterburgwal” de Amesterdão, pelo estúdio MX3D. Fonte: <https://mx3d.com>



3.6. Comunicação entre o utilizador e o Robot

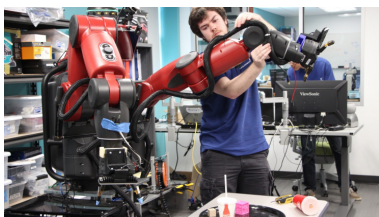


Figura 3.6.1. Programação on-line de um robot através do metodo de leadtought. Fonte: <https://pratt.duke.edu/about/news/robotics-new-generation>

Programas informáticos para o controlo de equipamentos Robóticos são essenciais para a utilização destes equipamentos. Neste subcapítulo faz-se uma análise atenta ao funcionamento destes programas e à metodologia de programação que seguem. O método de programação de Robots industriais pode ser feito de duas maneiras: através da programação on-line ou programação off-line. Interessa referir que é prática comum que diferentes fabricantes de braços Robóticos desenvolvam softwares específicos para o controlo dos seus equipamentos.

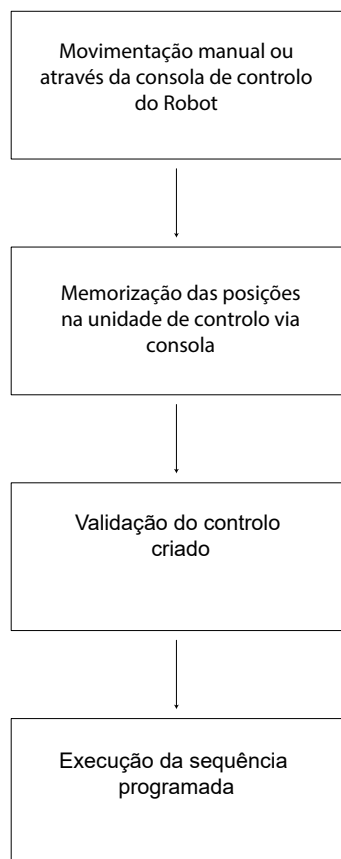


Figura 3.6.2. Esquema do processo de programação on-line de um Robot.

3.6.1. Programação on-line

A programação on-line compreende a utilização física do Robot, obriga por isso o utilizador a estar junto ao Robot. Este tipo de programação é realizada movendo as juntas do manipulador de uma forma manual pelo utilizador. Esses movimentos podem ser controlados fisicamente pelo utilizador, o chamado leadtought, ou através da consola do controlador, a teach-pendant.

A programação manual leadtought, consiste na deslocação física do manipulador por parte do operador através dos vários pontos e da trajetória pretendida para o programa gravando-o no final. Este tipo de programação envolve riscos para o programador uma vez que obriga a que este esteja junto ao Robot no seu raio de ação aumentando o risco de acidente. A programação através da consola teach-pendant funciona de forma semelhante à *leadtought*, mas ao invés de movimentar o manipulador fisicamente, este é manipulado através da teach-pendant via controlador onde são gravadas as posições eixo a eixo. Como ponto positivo, este tipo de programação reduz significativamente o risco de acidentes uma vez que o operador não necessita de estar no raio de ação do manipulador.

3.6.2. Programação off-line

A programação off-line não tem as limitações da técnica anterior pelo que está apta para qualquer tipo de uso em que seja possível utilizar um braço Robótico. Para além das vantagens de segurança, a programação off-line, permite que o Robot possa estar a operar enquanto um novo programa é construído, aliando ainda a possibilidade de o programador não estar no mesmo espaço físico que o Robot.

Este tipo de programação é realizada com recurso a aplicações informáticas específicas, por vezes com o auxílio de programação (textual ou visual), que permitem a compilação de rotinas a serem executadas na linguagem máquina de um determinado tipo de equipamento e sua marca. Atualmente, neste tipo de aplicações já é possível fazer uma verificação e simulação das trajetórias de forma a evitar possíveis colisões, acidentes ou erros de execução que coloquem em risco os utilizadores ou o próprio equipamento.

3.6.3. Softwares e linguagens de programação utilizadas na programação off-line

A programação off-line tem inúmeras vantagens das quais se destacam a possibilidade de simulação e visualização da totalidade da tarefa a ser programada. A partir dessa simulação, é possível pré-visualizar a trajetória do Robot e prever possíveis erros ou colisões evitando possíveis erros na fase de produção final.

Para a programação off-line de Robots existem no mercado vários softwares que se podem desde logo dividir em dois grupos: os softwares de proprietário e os softwares universais. Os softwares de proprietário são desenvolvidos pela própria marca que constrói os equipamentos, e apenas são compatíveis com a linguagem utilizada nos produtos dessa marca uma vez que cada marca utiliza uma linguagem diferente, única que não é compatível com as restantes marcas. Os softwares Universais dão a possibilidade de criar programas em diferentes linguagens compatíveis com diferentes equipamentos de várias marcas.

No contexto Europeu, as principais linguagens de programação de Robots são a KRL da *Kuka*, a rapid da *ABB*, e a *Karel* da *Fanuc*. Como exemplo de um software de programação de proprietário, o Kuka Sim, figura. 3.6.5, é um software de programação e simulação pertencente à fabricante Kuka, apenas compatível com a linguagem KRL.

O software integra processos de programação visual, para que possa ser utilizado por profissionais com pouco conhecimento de programação, ao mesmo tempo que permite a programação e edição do código KRL. O que este software permite é que seja criado um programa que vai ser processado por uma unidade virtual exatamente da mesma maneira que será processado pela unidade de processamento real do Robot. Desse modo, a simulação virtual apresentada no software é idêntica à tarefa real realizada pelo Robot utilizando exatamente o mesmo código que na simulação virtual (KUKA, 2021).

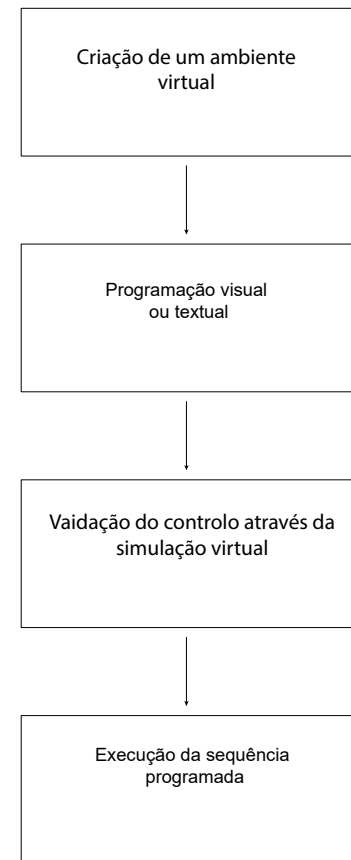


Figura 3.6.3. Esquema de programação off-line de um Robot.

Como exemplo de um software genérico, o ROBOT DK, figura.3.6.6, é um software muito semelhante ao Kuka Sim, com a vantagem de não ser vinculado a nenhuma marca, pelo que se apresenta como um software universal capaz de programar qualquer Robot industrial, cuja biblioteca incorpora dados de mais de 500 Robots e unidades de controlo, sendo ainda possível a adição de novos equipamentos e ferramentas personalizadas.

3.6.4.Linguagem Kuka, KRL

Qualquer que seja o método de programação do Robot, o objetivo é sempre a criação de um ficheiro de código, em linguagem textual que seja possível de ser interpretada pela unidade de controlo do Robot. Como verificado anteriormente a linguagem de programação varia de acordo com a marca do Robot. Considerando que se preve a instalação de braços Robóticos da marca Kuka nos laboratórios da EAAD, pareceu pertinente aprofundar conhecimentos sobre a linguagem KUKA KRL (Kuka Robot Language) para o desenvolvimento desta investigação.

Um código em Kuka KRL é exportado num tipo de ficheiro *Source Code* (crc). Este ficheiro contém informação de movimento, valores de saídas digitais para controlo de ferramentas, coordenadas de posição inicial e final do braço, bem como a sua velocidade. Este tipo de informações são especificadas de acordo com o tipo de dados a transmitir ao Robot, e através de um conjunto de variáveis que definem a função que deverá operar. Na figura 3.6.4 está representado um excerto de código Krl para o movimento ao longo de um quadrado colocado numa mesa rotativa.

O ficheiro está dividido em 3 partes que são: a zona de declaração de variáveis, a de inicialização e a de instruções de controlo. No programa em análise, a zona de declaração de variáveis contém a especificação das dimensões da ferramenta nas coordenadas X,Y,Z e ângulos A,B,C. Pode-se concluir que no programa em questão, sendo todos os valores igual a 0 não se encontra acoplada nenhuma ferramenta ao Robot, pelo que o ponto de referência utilizado será o centro da flange. A variável seguinte ainda na primeira zona, diz respeito às coordenadas da base do Robot em relação à restante área de trabalho. Esta definição condicionará todas as coordenadas que forem declaradas para o processo de trabalho. Na segunda zona, zona de inicialização, são declaradas as variáveis de velocidade de movimentação do Robot, e ainda a posição inicial de cada uma das juntas do Robot sendo A1 a base e A6 a flange. Para além disso, neste caso em concreto o programa faz uso de uma mesa rotativa equipada com dois eixos externos. O controlo desta mesa rotativa é feito através de E1 e E2.

Por último, nas zonas de instruções de controlo, são especificados os movimentos do Robot. Neste caso, está especificado um movimento linear (Lin) entre as coordenadas especificadas. Através dessas coordenadas, a unidade de controlo vai interpretar as mesmas em função da base do Robot e assim calcular a rota mais rápida entre esses dois pontos, movendo os vários eixos de acordo com os valores calculados pelo algoritmo cinemático.

```
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
$APO.CDIS = 0.5000
BAS (#INITMOV,0)
BAS (#VEL_PTP,20)
BAS (#ACC_PTP,20)
$advance=5
```

```
;Defines the coordinates of the tool attached to the robot, relative to the flange
$TOOL={X 0, Y 0, Z 0, A 0, B 0, C 0}
```

```
;Defines the Origin of the base, where all the consecutive commands are relative to
$BASE={X -75, Y -1638, Z 492, A 0, B 0, C 0}
```

```
;Set speed in meters/second
$VEL.CP=0.3
```

```
;First we must tell the program what the initial axis position should be
PTP {A1 90, A2 -75, A3 100, A4 169, A5 -60, A6 -150, E1 0, E2 180, E3 0, E4 0, E5 0, E6 0}
```

```
;Finally, we give it a series of LIN commands to trace out a square in space
```

```
;E1 and E2 are the external axis
```

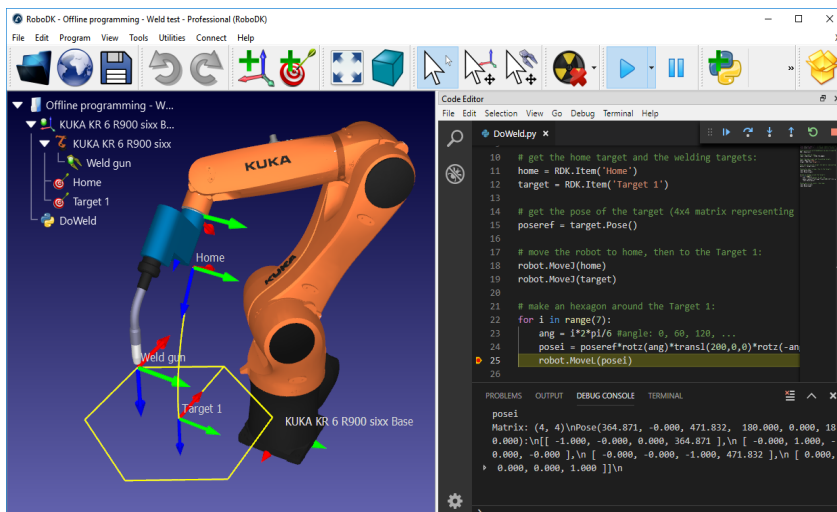
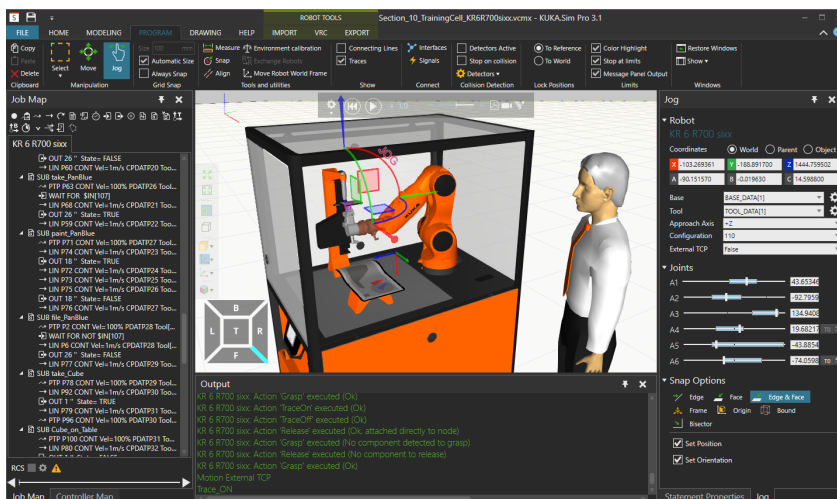
```
LIN {X 0, Y 0, Z 400, A 0, B 0, C 180, E1 0, E2 180} C DIS
```

```
LIN {X 0, Y 300, Z 400, A 0, B 0, C 180, E1 0, E2 180} C DIS
```

Figura 3.6.4. Exemplo de um excerto de um código Krl de um movimento ao longo de um quadrado, bem como controlo de uma mesa rotativa. Fonte: <https://wikis.utexas.edu/display/SOAdigitech/KUKA+Programming+KRL+Examples>

Figura 3.6.5. Exemplo do ambiente de trabalho do KUKA Sim Pro 3.1. Fonte: <https://robotics-book.com/kuka-sim-pro-3-1-free-download/>

Figura 3.6.6. Exemplo do ambiente de trabalho do software Robot DK Professional. Fonte: <https://www.rapid-city.top/products.aspx?cname=kuka+robot+programming&cid=7>



3.7. Ferramentas de controlo paramétrico

KUKA|prc
parametric robot control

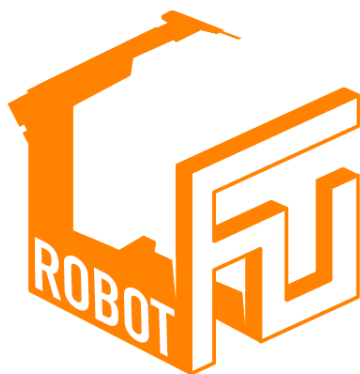


Figura 3.7.1/3.7.2. Exemplos de add-on's de controlo Robótico para Grasshopper. Fonte comum: www.foodforrhino.com

O carácter polivalente dos Robots industriais antropomórficos justifica o amplo interesse que estes suscitam a profissionais e investigadores na área da Arquitetura e Construção. Este recente interesse, justifica-se pela existência de ferramentas de programação, que facilitam o desenvolvimento de modelos paramétricos e computacionais para operar este tipo de Robots nas variadas tarefas que estes permitem.

A utilização de modelos paramétricos e computacionais surgiu como resposta a esse interesse cada vez maior de profissionais de áreas menos familiarizadas com o uso destas ferramentas, mas que já dominam a utilização de softwares paramétricos. Estes permitem que ao mesmo tempo que se explora o desenho se possa explorar o método de fabrico e montagem.

Se o surgimento de *API's* como o *Grasshopper* têm facilitado a implementação de processos de modelação computacional e paramétrica nas áreas da arquitetura e construção, o subsequente surgimento de add-on's para estas *API's* integrando funções de programação para o controlo do funcionamento de braços robóticos promove metodologias de projeto que recorrem a articulação direta entre a ideia de projeto, implementada computacionalmente, e a sua ferramenta de fabrico.

Alguns dos *Add-on's* mais disseminados são o *Kuka PRC*, o *Furobot*, o *Hall*, *Taco Abb*, etc.

Estes *add-on's* permitem o controlo de Robots a partir de modelos computacionais dando ao utilizador a possibilidade de gerar o seu modelo e, em simultâneo, gerar os comandos necessários para que o robot execute a tarefa pretendida. Ao mesmo tempo, estes geram a simulação que permite perceber em tempo real qual é o comportamento do robot em função dos comandos associados permitindo ao programador agir e resolver qualquer conflito ou mau funcionamento.

Seguindo um princípio semelhante ao dos softwares de programação off-line, também nas ferramentas de controlo paramétrico existem plug-ins universais, compatíveis com diversos fabricantes, e outros que embora não sejam projetados pelo fabricante apenas permitem a programação de Robots em determinada linguagem. É o caso do *Kuka Prc* que é dedicado exclusivamente aos Robots da marca *Kuka*, o *Hal* que é apenas compatível com os *ABB* e o *Furobot*, que por sua vez é compatível com *Abb* e *Kuka*.

Para além destes existem ainda outros plug ins open source como o exemplo do *COMPAS FAB*, criado como ferramenta de uso interno na ETH Zurich, é um *plug in* com base em programação python destinada a trabalho colaborativo em Engenharia e Arquitetura no âmbito de métodos de fabrico digital ao abrigo de um programa de investigação chamado NCCR DFA, estando atualmente na fase de uso público. Este *plug in* permite não só controlo Robótico, como está também associado a todo um conjunto de ferramentas para fabricação digital.

Através destes plug ins e com recurso às diversas ferramentas que o *Grasshopper* oferece, é dada a possibilidade de programar tarefas com vários graus de complexidade. Através dos comandos que são disponibilizados, estes podem ser articulados com outros plug ins de naturezas diferentes, que possam auxiliar com a geração de percursos para determinadas tarefas. Por exemplo, para tarefas de fabricação aditiva, o *add-on Xylinus* (Hoover, 2021) permite criar o percurso ao longo do qual a extrusão será feita e os dados obtidos podem ser utilizados diretamente como percurso para o *plug in* de programação Robótica.

O kuka Prc e o Furobot são *add-on* 's que permitem o controlo Robótico através de *API* 's com por exemplo o *Grasshopper*. De modo a demonstrar o desempenho destes dos *add on* 's para *Grasshopper*, foi criada uma rotina para demonstrar o funcionamento de cada um deles e as mais valias da utilização de cada um destes.

Para isso, a rotina criada parte de uma mesma superfície a ser "recortada" de um bloco de esferovite representada na 3.7.9 em ambiente *Rhino*. A rotina criada em *Kuka Prc*, tem como objetivo realizar o corte da superfície através de uma ferramenta de corte com fio quente.

A rotina criada para exemplificar o workflow do Furobot tem como objetivo utilizar como ferramenta um spindle de maneira a fazer a fresagem do bloco até obter a superfície desejada, semelhante à conseguida com o corte com fio quente. A opção por estas duas ferramentas deve-se à possibilidade de demonstrar as ferramentas de controlo de movimento do Kuka Prc e o Furobot as ferramentas CAM disponibilizadas pelo mesmo.



Figura 3.7.3. Exemplo da ferramentas desenvolvida em python pela escola ETH Zurich para controlo de Robots "CompassFab". Fonte: <https://compas.dev/extensions.html>

3.7.1. Kuka PRC

O *Kuka PRC* (Parametric Robot Control), é uma das mais completas ferramentas para programação de Robots desenvolvida para funcionar em ambiente *Grasshopper* (GH) pela *Association for Robots in Architecture* e tem sido usado por Arquitetos de modo a tirar melhor partido desta ferramenta.

O interface gráfico do *Kuka Prc* em ambiente *GH* divide-se em 6 grupos de funções. O 1 *Core*, onde se encontram os comandos principais para a definição da unidade de controlo virtual e comandos de movimento do Robot antropomórfico. O *Kuka PRC Core*, é o componente principal do sistema Robótico. Este componente assume um papel semelhante a uma unidade de controlo onde se ligam todas as entradas necessárias ao seu funcionamento. Como visualizado nos quadros de configuração das figuras 3.3.4, 3.3.5 e 3.3.6., as *Kuka Settings* permitem alterar informações como a localização global do Robot, posição inicial e final dos eixos, exportação do programa em vários formatos de código e ainda a visualização da simulação do programa assim como um gráfico informativo da posição dos eixos ao longo do programa. De modo a controlar a animação manualmente é utilizado um *slider* com um intervalo entre 0.00 e 1.00 ligado ao input *SIM*.

Um componente também essencial encontra-se no grupo 2, *Virtual Robot*, que disponibiliza uma biblioteca de Robots Kuka. Para além dos disponíveis na biblioteca, o *Kuka Prc*, permite a criação de Robots personalizados a partir de um conjunto de modelos 3D e da introdução dos respetivos parâmetros, como dimensões entre eixos, amplitudes de rotação mínimas e máximas e velocidades de deslocação. Para além dos Robots, estão também disponíveis acessórios como por exemplo eixos lineares ou mesas rotativas. No conjunto de simulações desenvolvidas no âmbito desta dissertação, considerou-se o Robot KR 120-R2700 por ser o equipamento que se prevê a aquisição para instalação nos laboratórios da EAAD.

Após a definição do controlador e do Robot, o próximo componente para definir é a ferramenta. Esta é disponibilizada no grupo 3, *Virtual Tool* onde se encontram os comandos necessários para criar essa ferramenta.

O *Kuka Prc* traz uma biblioteca com algumas ferramentas pré-definidas, que se destinam apenas a tarefas de maquinação com recurso a diferentes tipos de *spindles*. Com a finalidade de criar uma ferramenta específica, neste caso para corte a fio quente, ao componente *Custom Tool* é ligada a geometria da ferramenta previamente modelada e importada para *Grasshopper*. Em seguida, é necessário especificar as suas dimensões de modo a encontrar o *TCP* (Tool Control Point). Estas devem ser especificadas no quadro *Set Tool* existente no componente *Custom Tool*, onde devem ser inseridos os respetivos valores, neste caso 750 mm no Z, e o número correspondente à ferramenta.

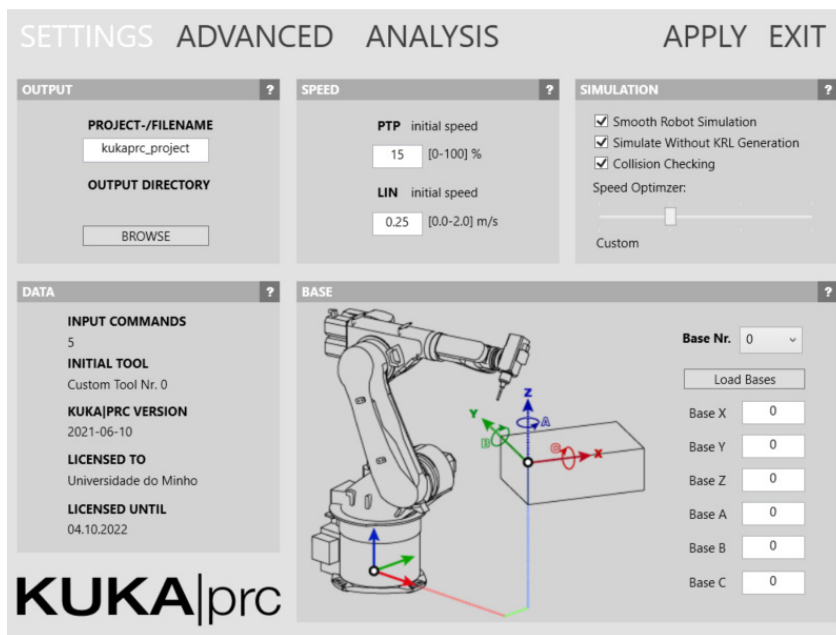
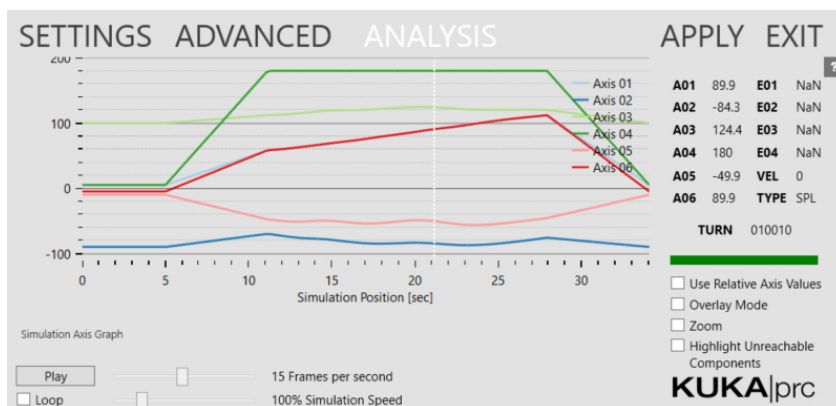
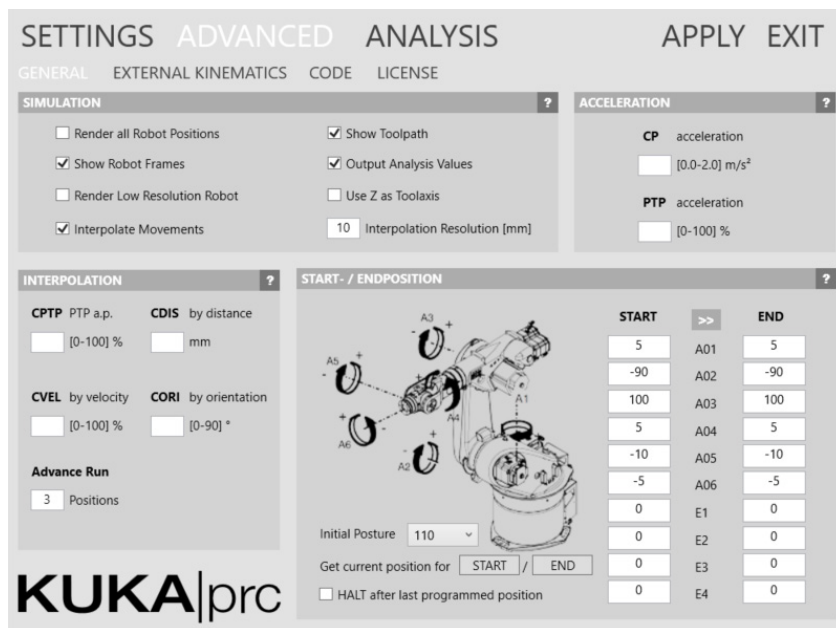


Figura 3.7.4. Janela de definições Kuka settings

Figura 3.7.5. Janelas de configuração de parâmetros no Kuka Prc

Figura 3.7.6. Janela de visualização do gráfico do movimento dos eixos do Robot

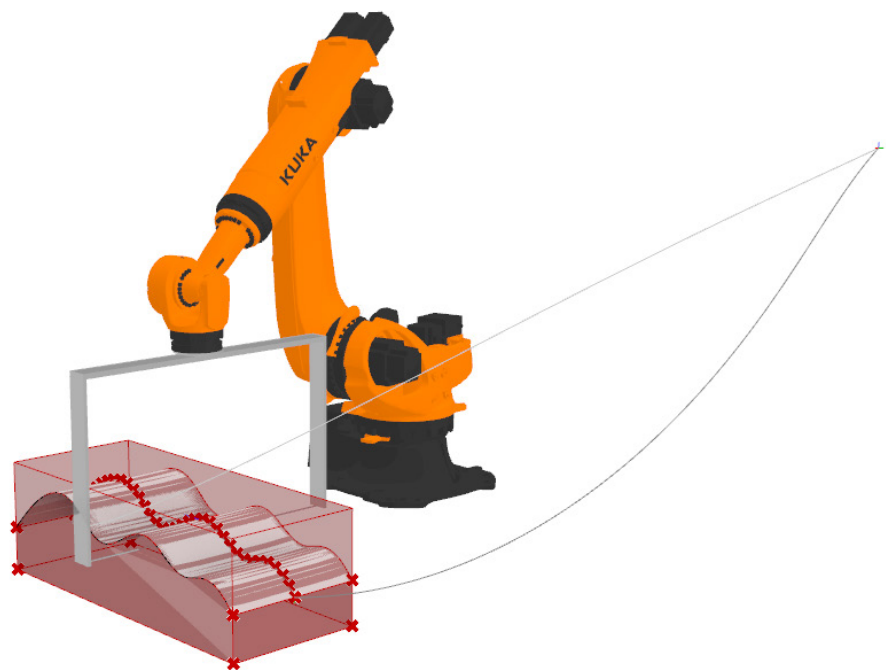
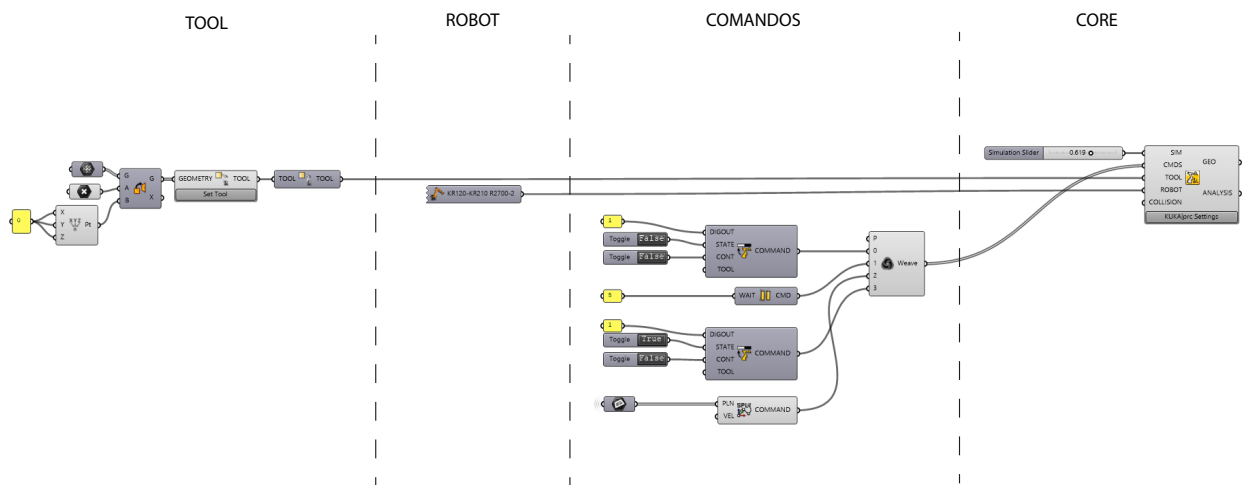


É importante ter em atenção, que para um correto alinhamento, a geometria da ferramenta deve ser colocada com o centro geométrico da base coincidente com as coordenadas (0,0,0). Este será o ponto de referência para a orientação da mesma. É também possível criar ferramentas com vários estados, como o caso da ferramenta de corte que terá o estado onde a resistência elétrica está ligada e o estado onde a resistência estará desligada. Para esse efeito existe o componente Multi-State Tool, ao qual o componente da ferramenta criada deve ser ligado a fim de tornar a ferramenta de corte a fio quente uma ferramenta com vários estados, ou seja, com os estados ligado e desligado que será controlado mais à frente quando forem implementados os comandos de controlo do programa.

A fase seguinte são exatamente os comandos que serão dados ao Robot. Os primeiros comandos a serem implementados são os comandos de movimentos. Estes encontram-se no primeiro grupo “Core” e estão organizados em diferentes tipos de movimento como movimento entre pontos, seguir uma linha ou mesmo movimento a partir da amplitude dos eixos. O comando de movimento utilizado na simulação apresentada foi o comando “Spline Movement”. Este comando conduz o o TCP da ferramenta ao longo de uma curva, neste caso ao longo da geratriz da superfície ao longo do qual o fio de corte tem de passar. Esta geratriz foi dividida em pontos que definem planos e é essa informação que é enviada para o comando de movimento. Quantos mais planos forem fornecidos, mais suave será o movimento. Para o controlo do estado da ferramenta de corte, foi utilizado o componente “Digital Output” que se encontra no grupo 5 “Utilities”. Neste grupo, encontram-se para além destes, outros comandos como o comando Wait que será utilizado para dar a ordem de espera para o Robot aguardar neste caso 5 seg antes de iniciar o movimento, de maneira a que permita o correto aquecimento da resistência elétrica da ferramenta de corte a fio quente. O digital Output, dará a ordem de ligar e desligar a resistência que deve estar fisicamente ligada à ficha de saída digital do Robot correspondente ao número especificado no componente, neste caso saída digital 1.

Para terminar a definição do programa, é necessário definir a ordem pela qual os comandos serão executados. Para isso recorre-se ao comando do *Grasshopper* “Weave”, onde são ligados por ordem cronológica os diferentes comandos. Posteriormente este componente é ligado ao Kuka Core na entrada “CMDS”.

A simulação pode ser pré-visualizada, figura 3.7.9, e podem ser feitos acertos ao percurso do Robot a partir do modelo computacional, figura 3.7.8.. Assim, o programa Robótico encontra-se concluído e resta ser exportado e carregado no Robot.



3.7.2. Furobot

Figura 3.7.8. Código *Grasshopper*, criação do sistema Robótico com o add-on Kuka Prc e de uma rotina de corte com fio quente de um bloco de EPS.

Figura 3.7.9. Exemplo de uma rotina de corte com fio quente de um bloco de EPS, programada com o add-on Kuka Prc.

O *Furobot* é um *add-on* desenvolvido pela empresa *Fab-Union* para a indústria da construção. Este *add-on* permite a programação direta de rotinas mais complexas incluindo na sua interface algumas funcionalidades para facilitar aplicações destinadas a métodos de fabrico digital como por exemplo a subtração (apresentada na rotina que se segue) através da fresagem ou a fabricação aditiva com ferramentas para extrusão. Ao contrário do *Kuka Prc*, este *add-on* utiliza vários componentes do *Grasshopper* de modo a complementar a informação necessária ao seu funcionamento.

De maneira semelhante ao *Kuka Prc*, o *Furobot* divide-se em vários grupos que agregam os vários tipos de comandos de acordo com a sua natureza. No primeiro grupo, “*Command*”, encontram-se os componentes com funções de controlo de movimento e o controlador principal “*Robot core*” que é o primeiro componente a utilizar na simulação. O controlador do *Furobot* faz apenas a ligação entre os comandos, o Robot e a ferramenta. As especificações como por exemplo a posição inicial e final, são programadas através do componente “*Axis Movement*” não havendo opções ou componentes específicos para esse efeito. Para o visionamento da simulação recorre-se ao uso de um slider à semelhança do *Kuka Prc*.

O próximo componente a ser implementado no *Grasshopper* é a ferramenta. Por defeito, o *Furobot* não traz nenhuma biblioteca com ferramentas pré-definidas sendo obrigatório a construção de uma “*Costum Tool*”. O componente “*Costum Tool*”, é parte do grupo 8 “*Tools and external axis*”, que para além deste componente contém por exemplo componentes para eixos externos ou Robots customizados. No entanto, de modo a importar a geometria da ferramenta é necessária a utilização de outro componente “*Robot mesh*” que faz a tradução da informação de modo a ser lida pelo componente “*Costum Tool*”. A definição do TCP da ferramenta é feita através do componente de *Grasshopper* “*GetmatrixfromXYZABC*” uma vez que não existe outro componente que permita esta configuração.

O componente *Costum Tool* é ligado ao Robot. O Robot foi selecionado no grupo 3 “*Robot*”. O *Furobot* dispõe de uma vasta biblioteca de Robots das diferentes marcas ABB, Kuka e da UR. Para este exemplo foi selecionado à semelhança do exemplo anterior o Kr90 -R2700.

A principal diferença entre o *Furobot* e o *Kuka Prc*, reside no facto de o *Furobot* ter grupos de componentes dedicados a diferentes tipos de fabricação digital, não necessariamente para uso Robótico. São eles o grupo 4 *Print*, 5 *Wind*, e 6 *Wood*.

O grupo 4, “Módulo de Impressão 3D” contém componentes que permitem desconstruir geometrias em camadas de modo a possibilitar a impressão das mesmas. São segundo a marca os componentes de *furobot* mais utilizados (Furobot,2021).

O Grupo 5 “Módulo de enrolamento de fibra eólica”, é um grupo dedicado à utilização exclusiva da indústria e a sua utilização está bloqueada na versão gratuita do *add-on*. Os componentes existentes neste grupo destinam-se ao enrolamento de fibras onde através da utilização destes componentes prevêm-se colisões entre ferramentas e o comportamento das fibras prevendo por exemplo pontos de ancoragem.

O grupo 6, “Módulo de Processamento de Madeira”, aliado aos componentes do grupo 4, é um dos grupos com mais potencialidades para investigação e para a Arquitetura e Construção em geral. Este grupo agrega diversos componentes que permitem por exemplo fazer cortes com serra circular, furações com fresas, cortes com serra de fita e com corrente e ainda fresagem. Estes componentes permitem a sua utilização autónoma sem utilizar os restantes componentes.

O componente utilizado em seguida foi exatamente a partir desse grupo, o componente “Milling Brep”. Este componente tem como função criar o percurso para subtração da geometria selecionada. Para que este comando possa funcionar são várias as entradas de informação necessárias. O diâmetro da fresa a utilizar, a distância entre passagens e o tipo de acabamento pretendido são algumas das especificações para que o comando possa funcionar. Caso o Furobot permitisse estas funcionalidades, de modo a ser possível criar rotinas que permitam trabalhos de subtração como o exemplo da fresagem, teria de se recorrer a um *add-on* externo a fim de obter o percurso por onde o TCP da ferramenta do Robot, neste caso a fresa, passaria.

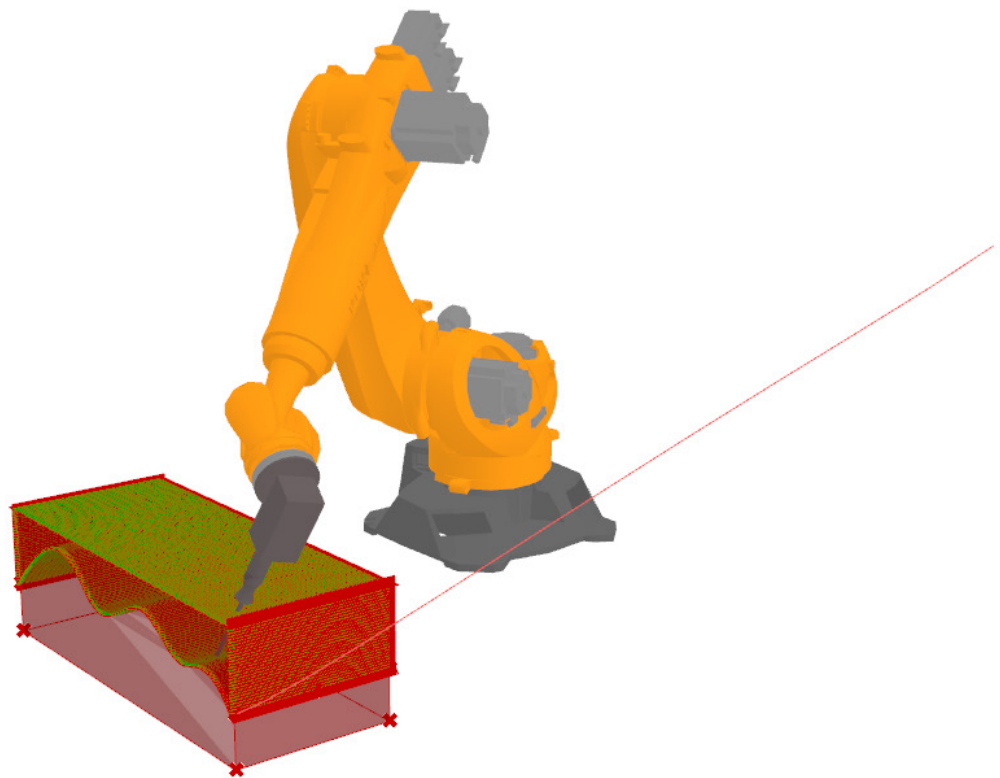
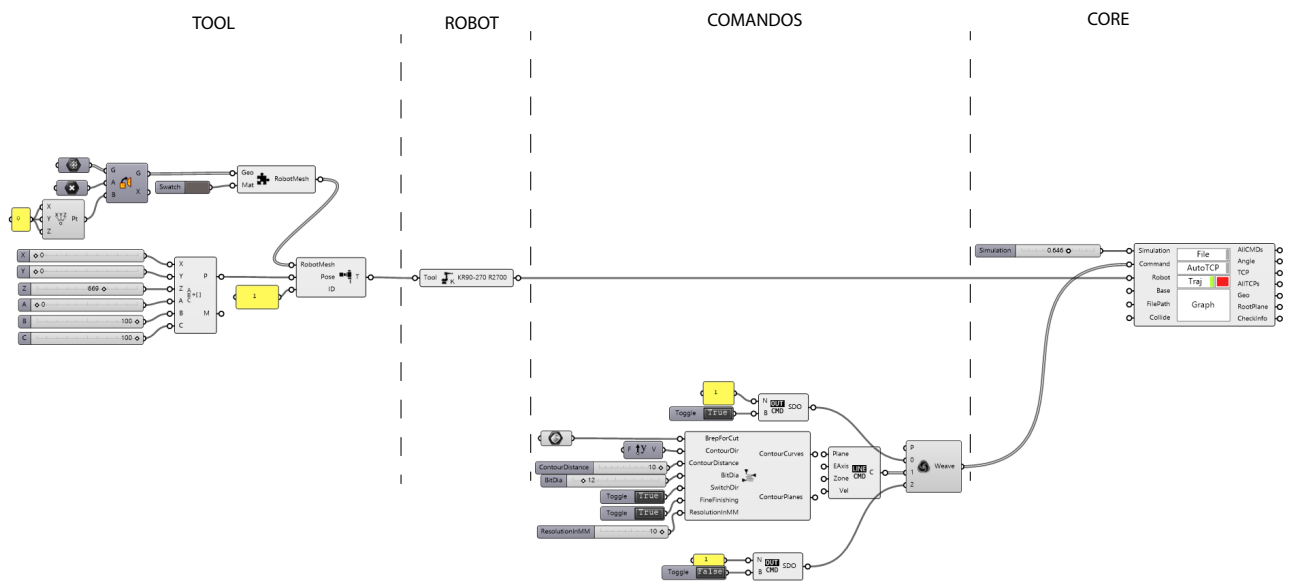
À semelhança da rotina programada em Kuka Prc, é necessário introduzir um comando que permita ligar e desligar o funcionamento do end effector, neste caso o spindle. Para esse efeito o componente utilizado é o “digital output comand”.

Para terminar a definição do programa, é necessário definir a execução dos diferentes comandos. Para isso utiliza-se o comando do “Weave” do *Grasshopper*, onde são ligados por ordem cronológica os diferentes comandos.

A simulação pode ser visualizada, figura 3.7.11, e podem ser feitos ajustes ao percurso do Robot a partir do modelo computacional, figura 3.7.10. O percurso de fresagem também pode ser alterado nas suas várias definições e visualizado através do mesmo processo da simulação do movimento do Robot.

Figura 3.7.10. Código *Grasshopper*, criação do sistema Robótico com o *add-on* Furobot e rotina de fresagem de um bloco de EPS.

Figura 3.7.11. Exemplo de uma rotina de fresagem de um bloco de EPS, programada com o *add-on* Furobot.



3.7.3. Uso misto

Apesar de todas as funcionalidades que cada um dos add-ons de controlo Robótico existentes possuem, por vezes existe a necessidade de utilizar add-ons externos ou fazer um uso misto de vários de maneira a criar o melhor processo de trabalho para alcançar o objetivo desejado.

Embora o Kuka Prc seja um dos add-on's de controlo Robótico mais completos que existem, torna-se algo débil em relação ao controlo de tarefas de manufatura mais complexas. Embora não tão completo do ponto de vista do controlo Robótico, o Furobot contém por defeito diversos componentes específicos para controlo de processos de manufatura como analisado no subcapítulo anterior.

Assim, analisando os aspetos positivos de ambos os add-on's, o Kuka Prc é uma ferramenta muito mais completa do ponto de vista do controlo Robótico que permite, e o Furobot uma ferramenta muito potente do ponto de vista das tarefas de CAM.

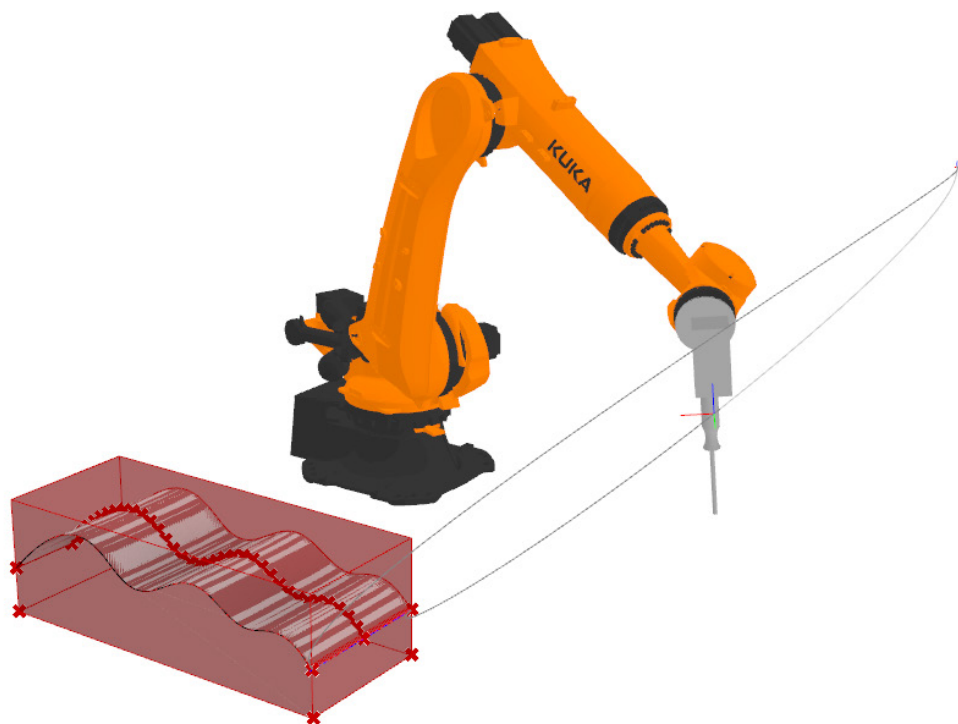
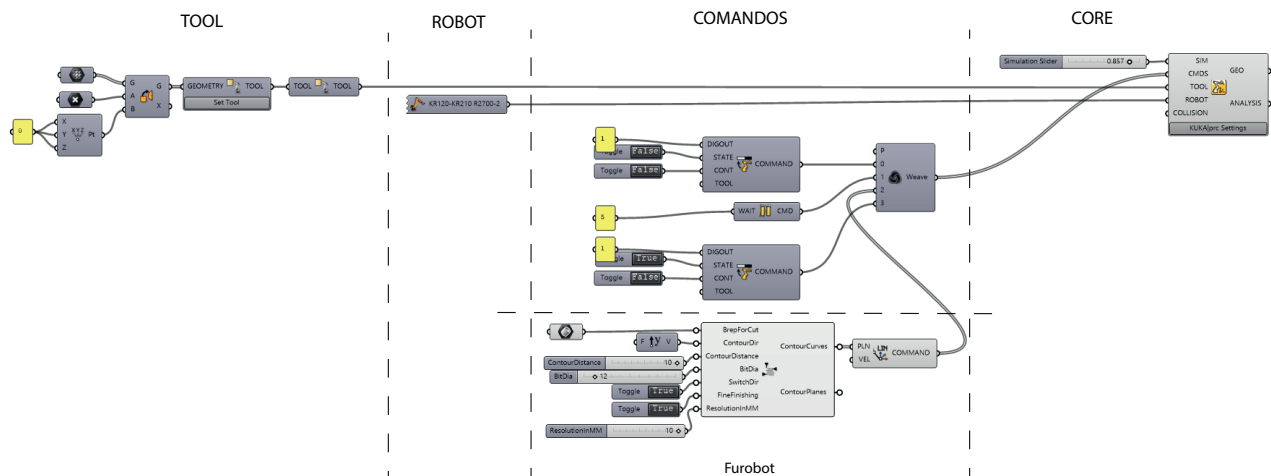
A partir dessa análise, conclui-se que através da possível integração das ferramentas de controlo Robótico do Kuk Prc com as ferramentas CAM disponibilizadas pelo Furobot obtém-se o melhor do que cada um dos dois add-ons possibilitam. De modo a exemplificar de que maneira pode ser feita esta integração realizou-se a programação da seguinte rotina:

A partir dos exemplos mostrados anteriormente, foi alterada a rotina do modelo de demonstração do Kuk Prc (corte com fio quente) para a rotina aplicada na demonstração do Furobot (fresagem). Uma vez que os componentes que permitem as tarefas CAM do *Furobot* não estão condicionadas a nenhuma linguagem própria deste add-on, foi possível utilizar exatamente o mesmo componente ("Milling Brep") tendo apenas de ser alterado o componente com função de comando de movimento para um comando do próprio *Kuka Prc*. A ferramenta a utilizar, *spindle*, foi também transferida e adaptada ao Kuka Prc através dos componentes específicos para o efeito, figura 3.7.12.

Através da utilização dos componentes CAM do Furobot em articulação com os componentes de controlo Robótico do *Kuka Prc*, foi possível criar uma rotina de fresagem de uma superfície onde se consegue aliar um controlo rigoroso do Robot através do Kuka Prc e um controlo de todos os parâmetros do processo subtrativo com o *Furobot*.

Figura 3.7.12. Código *Grasshopper*, criação do sistema Robótico misto com o add-on Kuka Prc para controlo Robótico e ferramentas de CAM do add-on Furobot para programação de uma rotina de fresagem de um bloco de EPS.

Figura 3.7.13. Exemplo de uma rotina de fresagem de um bloco de EPS, programada através de um uso "misto" do o add-on Kuka Prc e Furobot.



3.8. Porquê usar Robots na Arquitetura

Como analisado neste capítulo e considerando a análise do levantamento apresentado no Atlas na contemporaneidade, os Robots são capazes de realizar uma grande variedade de tarefas com um grande leque de materiais que já se utilizam na construção. Esta grande variedade de possibilidades, aliadas à precisão que um Robot permite, tornam-no uma ferramenta com elevados benefícios para os arquitetos e para construção.

Das várias vantagens que um Robot traz para a Arquitetura e Construção, destacam-se a menor margem de erro em comparação com a mesma tarefa realizada pelo ser humano, a possibilidade de realizar tarefas que de outro modo não podiam ser realizadas, a produtividade linear, a possibilidade de executarem tarefas em locais perigosos para um ser humano, ausência de fadiga, consistência geral no trabalho e poupanças para o consumidor.

No contexto atual, o Robot já começa a ocupar o seu espaço na arquitetura e construção para além dos grupos de investigação. Empresas como a Katterra provam que a construção pode ser modernizada e adaptada ao séc. XXI através da automação e do recurso à pré-fabricação de modo a combater a falta de mão de obra qualificada, cativando a geração mais jovem para um setor que a nível global se encontra com um corpo operário maioritariamente envelhecido.

Estas vantagens, aliadas aos novos métodos de controlo paramétrico, permitem aos arquitetos uma nova maneira de projetar. Abre a possibilidade de o arquiteto se manter no controlo do projeto mesmo durante a fase de construção, podendo assumir o controlo da mesma maneira que controla o desenho, através dos mesmos softwares. Esta maneira de projetar e construir abre novas possibilidades à Arquitetura na medida em que permite aos arquitetos pensar em designs mais complexos ao mesmo tempo que permitem ao arquiteto assumir o controlo da produção com o conceito de *drawing to factory*.

4. Montagem, transformação e controlo de um Mini Braço Robótico

4.1. Contextualização e objetivos

Este capítulo, tem como objetivo a criação de um pequeno braço Robótico que se assemelhe em movimentos possíveis e em controlo a um braço Robótico industrial antropomórfico.

Com esse objetivo, e não existindo acesso a um braço Robótico antropomórfico de escala real, foi construído um mini braço Robótico com base no Robot TinkerKit Braccio da Arduino. O objetivo passa por alterar o mini Robot de maneira que a sua cadeia cinemática se assemelhe à de um Robot industrial de 6 eixos. A programação do mini braço será também alterada para que este possa ser programado pelos métodos de controlo paramétricos abordados no capítulo anterior, nomeadamente através do Kuka Prc.

O Kuka Prc foi escolhido por ser uma ferramenta completa e permitir uma fácil articulação com outros add-on como o Furobot. Este é o principal motivo para se ter usado o Kuka PRC para o desenvolvimento de caso de estudo. Para esta escolha, pesou ainda o facto de estar em processo de implementação um laboratório de fabricação Robótica na Escola de Arquitetura, Arte e Design da UM, para o qual este estudo pretende contribuir com o desenvolvimento de ferramentas e rotinas que poderão auxiliar a esse processo.

Os objetivos deste capítulo passam por construir um simulador de controlo Robótico que permita uma perceção física dos controlos gerados nos modelos computacionais. Assim, torna-se possível perceber melhor as especificidades e as limitações impostas pelos softwares de controlo e o funcionamento do hardware, permitindo uma melhor perceção dos controlos e técnicas de posicionamento de ferramentas e de movimentos.

4.2. O Tinkerkit Braccio mini Robot



O mini braço Robótico criado tem por base o mini Robot da Arduino “TinkerKit Braccio Robot”. Este é um mini braço Robótico de “6 graus de liberdade” que possibilita uma introdução didática ao mundo da Robótica e da programação. É vendido como um kit, figura 4.4.1, que inclui: as diversas peças de forma do braço, uma base de Platex com a marcação dos ângulos de rotação da base, 6 servomotores com diversos torques, uma garra, uma placa de Arduino Uno, uma placa shield compatível com Arduino, um transformador AC-DC e todos os acessórios necessários à montagem deste kit como parafusos e anilhas, figura 4.2.2.

O sistema Robótico criado pelo Braccio , figura 4.2.4, comporta-se de forma semelhante a um sistema Robótico comum. Existe assim, um controlador, um manipulador e uma ferramenta.



Figura 4.2.1. Imagem do Kit vendido pela Arduino com o *Tinkerkit Mini Braccio*. Fonte: <https://cooneyelectronics.ie/products/73-4447>

Figura 4.2.2. “Peças” que compõe o Kit vendido pela Arduino. Fonte: <https://cooneyelectronics.ie/products/73-4447>

Figura 4.2.3. Relação do número do eixo com o eixo correspondente no *Tinkerkit Mini Braccio*.

4.2.1. Características

Ao nível da liberdade de movimentos dos eixos do mini Robot, estes distribuem-se de forma semelhante a um Robot industrial comum. À semelhança dos braços Robóticos industriais, o Braccio é considerado um braço Robótico antropomórfico o que significa que os seus 5 graus de liberdade possibilitam movimentos semelhantes aos de um braço humano.

Na tabela da figura 4.2.3, são listados os eixos do Robot de acordo com a sua conotação ao braço humano. O eixo 1 (A1), corresponde à rotação da base e é o eixo que irá suportar a carga que for inferida ao Robot sendo o contacto de suporte do Robot. O eixo 2 (A2), é o eixo do ombro. O eixo 3 (A3) o cotovelo, o eixo 4 (A4) é o eixo responsável pela inclinação do pulso e por fim o eixo 5 (A5), responsável pela rotação do pulso e consequentemente coincidente com a flange onde se acopla a ferramenta.

Número do eixo	Localização do eixo
A1	Eixo de rotação da base
A2	Eixo de rotação do ombro
A3	Eixo de rotação do cotovelo
A4	Eixo de inclinação do pulso
A5	Eixo de rotação do pulso
A6	Eixo de acionamento da garra

4.2.2. Controlo

O controlo do Braccio a partir das suas configurações de fábrica, apenas permite o controlo através da aplicação do próprio fabricante. Esse software, chamado Arduino IDE (Arduino, 2021) é um compilador de código, open source amplamente utilizado por profissionais e amadores na programação de diversos tipos de aplicações eletrónicas onde as placas e sensores Arduino são utilizadas.

O tipo de programação que é implementada neste tipo de compiladores, vulgar programação escrita, tem várias limitações do ponto de vista da possibilidade de movimentos do Braccio, o que por consequência afeta o grau de complexidade das tarefas em que este pode ser utilizado recorrendo exclusivamente a este tipo de programação. A programação diretamente a partir do compilador do Arduino é feita descrevendo os movimentos pretendidos a partir da amplitude em graus que será enviada independentemente para cada um dos servomotores.

O hardware responsável pela interpretação do código enviado a partir do Arduino IDE é a placa de Arduino Uno, figura 4.2.7. O Arduino Uno é basicamente um microcontrolador com 14 pinos que permite entradas e saídas de informação, que podem transmitir informações de e para diversos dispositivos externos. Este é conectado ao computador através de um cabo USB que lhe permite receber energia e dados existindo, no entanto, um Jack para adaptador de corrente AC-to-DC. O kit que inclui o Braccio traz também um segundo microcontrolador chamado Braccio Shield V4, figura 4.2.6. Apesar de para o tipo de programação Robótica que se procura fazer nesta investigação o shield não trazer grandes benefícios, o shield tem um papel importante na operação no Braccio. Este tem como principal função proteger os servomotores que movem as articulações do Braccio de sobretensões de corrente elétrica.

Figura 4.2.4. Sistema Robótico de operação e controlo do Mini Braço Robótico.

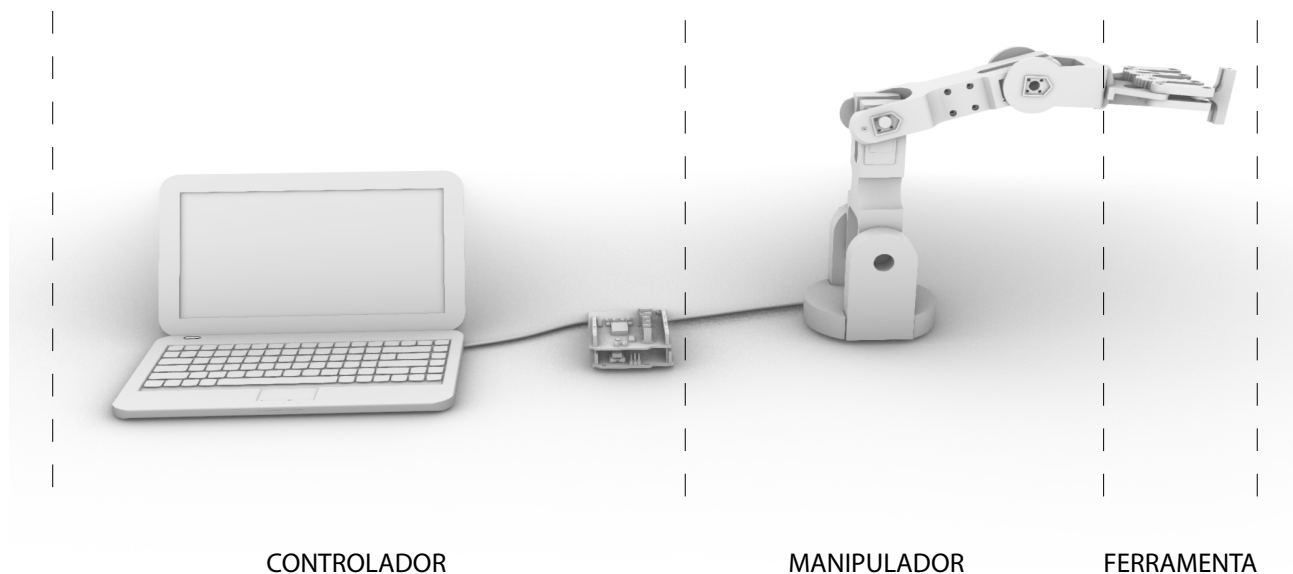
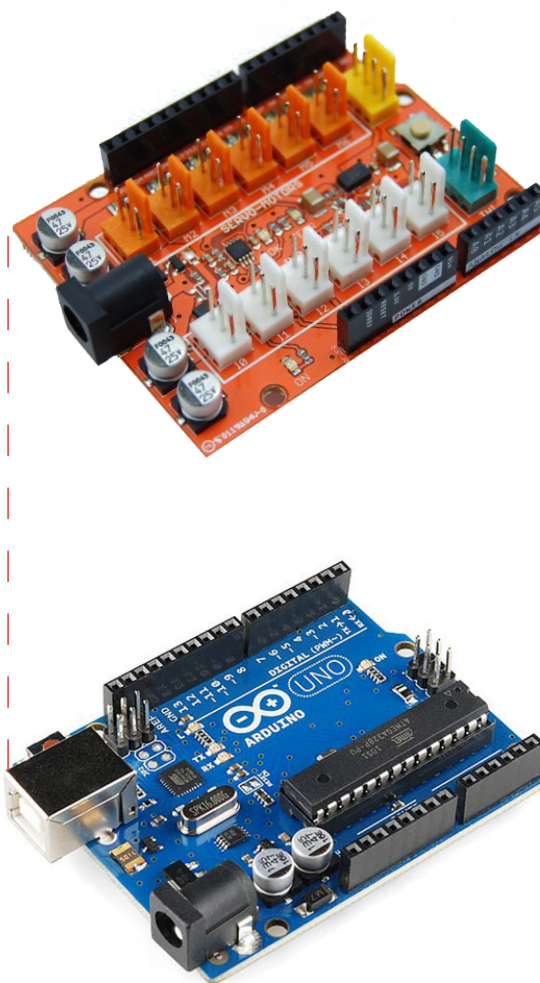
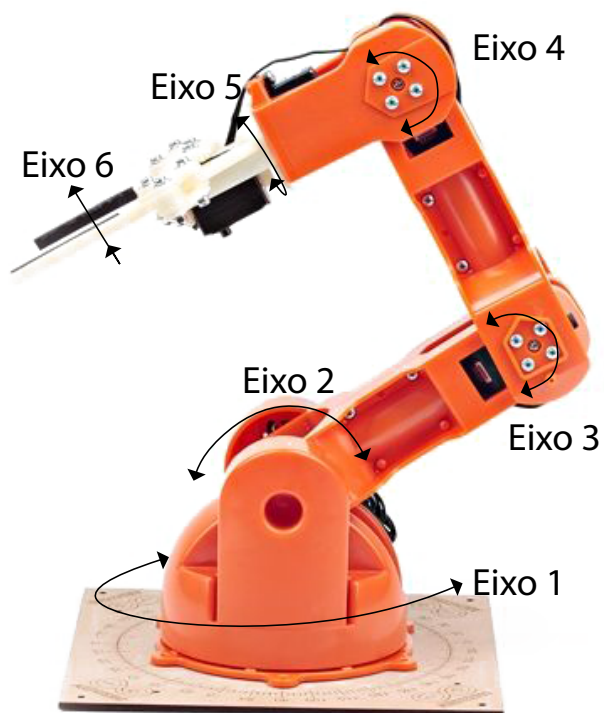


Figura 4.2.5. *Tinkerkit Mini Braccio* na sua configuração original.

Figura 4.2.6. Arduino Shield semelhante ao incluído no conjunto do Tinkerkit.

Figura 4.2.7. Arduino Uno, semelhante ao incluído no conjunto do Tinkerkit.



4.3. Modificações

Apesar das capacidades pedagógicas do kit Robótico da Arduino enquanto introdução à programação e controlo Robótico, o Braccio não é um verdadeiro braço robótico de 6 eixos. Esta contagem por parte da Arduino contabiliza o servomotor que controla a garra como um eixo de liberdade, o que não é verdade ser considerado. Essa garra não faz parte da cadeia cinemática do Robot, portanto, não pode ser contabilizada para o número de graus de liberdade do mesmo. A garra deve ser considerada uma ferramenta e como tal pode-se afirmar que o Braccio é um braço Robótico de 5 graus de liberdade.

Para que o mini braço Robótico tenha um número de graus de liberdade equiparado a um braço Robótico industrial de 6 eixos, o mesmo deverá possuir mais um entre os atuais A3 e A4. Esse eixo deverá possibilitar que o “pulso”, atualmente entre os eixos A3 e A4, rode sobre si mesmo.

4.3.1. Modificações de Hardware

Para contruir o 6º eixo do mini Robot, recorreu-se à modelação 3D e posterior impressão dos elementos necessários. Para isso as peças foram modeladas em ambiente *Rhinoceros*, figura 4.3.1, de maneira a que os novos elementos fossem compatíveis com as ligações e encaixes existentes no Braccio. O desenho foi feito com base na peça existente onde foi aplicada uma divisão de forma a possibilitar o movimento de rotação, figura 4.3.4. Foi também necessário fazer a modelação dos encaixes e tolerâncias necessárias à instalação de um novo servomotor de elevado binário para que a rotação fosse possível.

A instalação de mais um servomotor, figura. 4.3.3 criou alguns problemas de ligação ao shield, sendo que este apenas permitia a ligação de 6 servos. De maneira a contornar esse problema, as ligações foram feitas diretamente nas saídas dos pinos da placa do shield e não através das fichas existentes para esse efeito.

Através deste processo o mini braço Robótico passa a ser um mini braço Robótico com 6 graus de liberdade e o último servomotor controla o acionamento da garra, como visível na figura 4.3.4.



Figura 4.3.1. Peças modeladas para o 6º eixo.

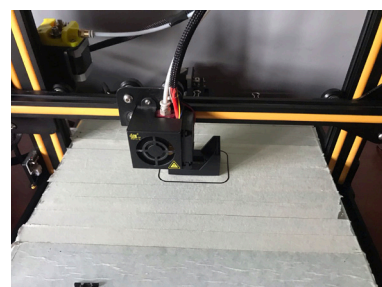
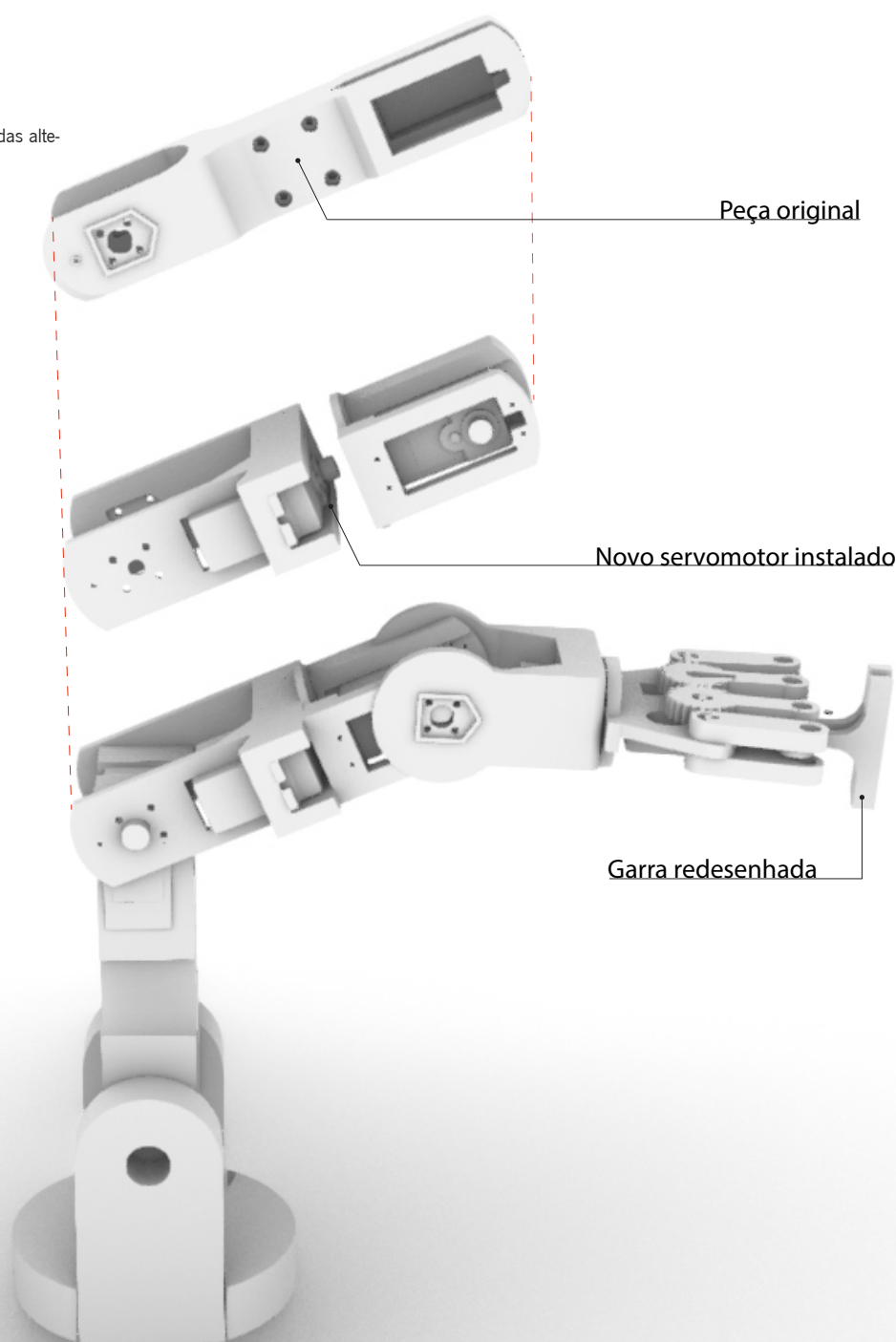


Figura 4.3.2. Impressão das peças modeladas com recurso a uma impressora 3D.



Figura 4.3.3. Servomotor semelhante ao utilizado para accionar o eixo construído.

Figura 4.3.4. Axonometria explicativa das alterações ao mini braço.



4.3.2. Modificação do método de controlo

Como apresentado anteriormente, o mini Robot Braccio com as configurações “de fábrica” só permite a sua programação a partir de linguagem escrita através do compilador de código Arduino IDE.

No entanto, este tipo de programação não é a mais adequada para os objetivos em que se pretende utilizar o mini Robot. Para além de ser uma programação demorada, torna-se difícil de atualizar sempre que se altera o desenho ou o posicionamento das peças, culminando numa grande margem de erro no controlo dos movimentos.

Para que o mini braço Robótico possa cumprir os objetivos desta dissertação, o mesmo terá de ser controlado de forma semelhante à utilizada para programar um braço Robótico industrial comum. Neste caso através de um add-on que permita o controlo paramétrico. Para que o controlo a partir do modelo paramétrico fosse possível, era necessário em primeiro lugar encontrar uma maneira de controlar o Braccio através de algum tipo de ferramenta que permitisse a geração automática do percurso do Robot a partir do desenho e em seguida traduzir essa informação para valores compatíveis com os servomotores do Braccio.

A informação obtida, precisa de ser enviada à placa de Arduino que posteriormente enviará os valores de movimento para cada um dos servomotores do Robot de maneira a que este se mova. A partir deste encadeamento de ideias foi selecionado um conjunto de add-ons que permitem alcançar os objetivos propostos, figura 4.3.5.

A partir do modelo de desenho gerado em ambiente *Rhinoceros* e *Grasshopper*, é utilizado o plug-in Kuka Prc para criar os comandos de controlo do braço robótico. A partir dos dados obtidos do Kuka Prc, essa informação é enviada através do add-on firefly para a placa de Arduino Uno recorrendo a uma ligação USB. A partir da placa Arduino a informação é processada e enviada para cada um dos pinos existentes que correspondem aos vários servomotores de controlo dos eixos do mini braço Robótico, fazendo com que este se mova.

Kuka Prc

O próximo passo foi conseguir compatibilizar o controlo paramétrico com o Kuka Prc (Association for Robots in Architecture, 2021) ou o Furobot (Fab Union, 2021). Estes dois add-on’s apesar de idênticos têm algumas diferenças como analisado no capítulo anterior, dedicado a esse tópico. O Kuka Prc foi escolhido por ser uma ferramenta completa e permitir uma fácil articulação com outros add-on como o Furobot.

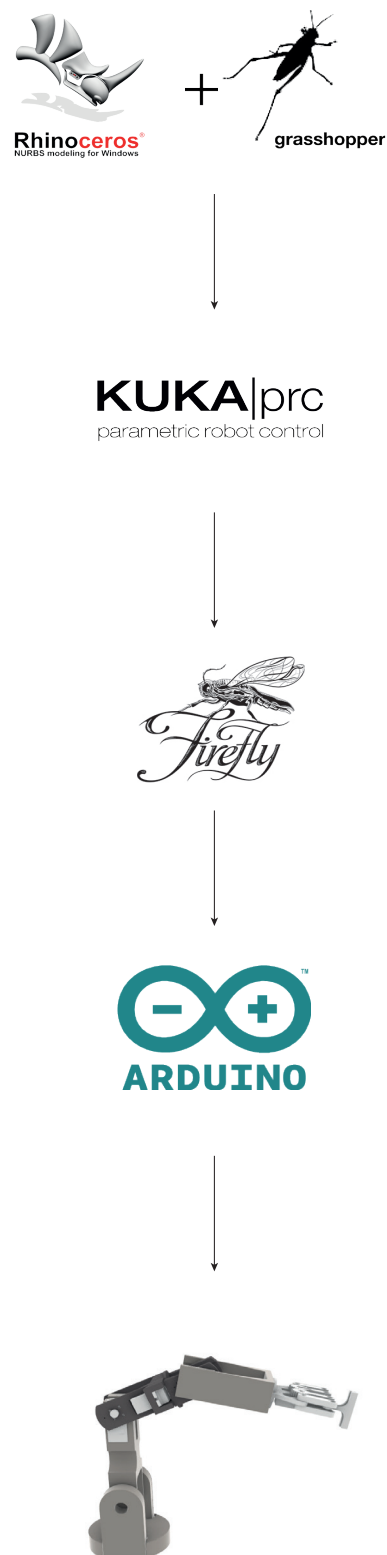


Figura 4.3.5. Encadeamento da informação para controlo do mini braço.

Para que o mini braço Robótico possa ser controlado a partir do Kuka Prc, é necessário em primeiro, criar um Robot customizado. O Kuka Prc contém uma biblioteca de Robots Kuka pré-definidos, mas permite que o utilizador crie o seu próprio Robot. Para isso o Kuka Prc tem um comando específico chamado *Costum Robot*.

Com a finalidade de desenhar o mini braço Robótico no ambiente digital, o mesmo foi modelado em ambiente *Rhinoceros* em 6 partes distintas, cada uma delas correspondente a um eixo. Após esta modelação inicial, as geometrias obtidas foram importadas para *Grasshopper* como malhas (*mesh*). Com a introdução destas malhas, é obtido o modelo digital tridimensional do Robot. De maneira a especificar o centro dos diferentes eixos, foram introduzidas as dimensões de modo que possa assim ser definida a estrutura cinemática do Robot.

Definidas as dimensões do mini braço, é necessário perceber o intervalo de valores de amplitude que cada um dos eixos permite de para que sejam evitados danos no Robot e imprecisões nas simulações que se traduziriam em movimentos incorretos no ambiente real.

A última informação necessária para o funcionamento do Robot é a velocidade máxima de cada eixo. Esta, deve ser ponderada de forma a evitar perda de precisão por parte do Robot bem como possíveis danos na estrutura do mesmo.

Após a criação do *Costum Robot*, foi necessário criar a ferramenta, neste caso trata-se de uma garra. De forma a criar a ferramenta, foi utilizado o comando "*Costum Tool Geometry*". A geometria da ferramenta foi importada do *Rhino* a partir da geometria modelada anteriormente aquando da alteração dos eixos do Robot, uma vez que a pinça original do Braccio não se adequava às tarefas para as quais se propõem que o mini braço seja utilizado. O alinhamento e calibração da ferramenta é conseguido através do mesmo processo demonstrado no capítulo anterior sobre o Kuka Prc.

Após a definição das características físicas e técnicas do Robot, estas são conectadas ao Kuka Core obtendo a primeira pré-visualização do Mini braço Robótico em ambiente *Rhino+Grasshopper*. A partir desse momento, torna-se possível fazer a simulação do controlo paramétrico do mini braço Robótico. No entanto, através destas configurações, é apenas possível exportar este programa para código KRL que de nada servirá para controlo do mini braço cuja unidade de controlo é um Arduino Uno e não tem capacidade de processar este tipo de linguagem.

Para se conseguir obter a informação gerada pelo Kuka Prc sem ser necessário explorar o código KRL, utilizou-se o componente "*Kuka Prc Analysis Data*". Este componente permite um olhar sobre todos os valores obtidos a partir do programa Robótico criado. Entre eles estão por exemplo a geometria do Robot em malhas, o valor de movimento dos eixos de acordo com a simulação que estiver a ocorrer e o acionamento da ferramenta. Aqui retiraram-se os valores dos movimentos dos eixos em tempo real, valores esses medidos em graus.

O esquema generativo em Kuka Prc encontra-se assim concluído e a simulação de controlo com o mini braço robótico já podem ser gerada.

Firefly

O add-on Firefly (Firefly, 2021) foi criado com o objetivo de ser uma ferramenta capaz de ligar o mundo físico ao digital através de programação visual. Entre as diversas funcionalidades deste add-on, destacam-se a capacidade de tornar possível e acessível a ligação ao *Grasshopper* de dispositivos como webcams, controladores de jogos, telemóveis, (...) permitindo assim novas abordagens e possibilidades em relação ao que pode ser construído e enviado a partir do *Grasshopper*.

Apesar de todas as funcionalidades de que este add-on dispõe, a que realmente interessa a esta investigação é a capacidade do mesmo de permitir a comunicação entre o *Grasshopper* e a placa de Arduino. Para que o Firefly consiga comunicar com o Arduino, é necessário enviar um código pré compilado para a placa de Arduino Uno. Esse código denominado de “Firefly Firmata” é responsável pela correta interpretação dos dados enviados pelo Firefly a partir do *Grasshopper* de forma que cada comando enviado seja direcionado para a saída correta a fim de controlar corretamente os servomotores do mini Robot. Para carregar esse código na placa de Arduino é necessário recorrer ao Arduino IDE uma única vez, sendo que a informação enviada fica guardada na memória da própria placa, até que outro código lhe seja enviado através do mesmo software, Arduino IDE.

Em virtude destas configurações, a “ponte” entre o Firefly e a placa Arduino foi criada e permite agora enviar informação diretamente do ambiente *Grasshopper* para o Arduino, sem que seja para isso, necessário escrever qualquer linha de código.

De modo a iniciar o contacto com a placa Arduino Uno a partir do ambiente do *Grasshopper*, é em primeiro lugar necessário especificar qual a porta USB a ser utilizada pelo computador para comunicar com o Arduino. No ambiente *Grasshopper*, a partir do *plug in* Firefly é implementado o componente “Port Number Available” e o mesmo é conectado ao comando “open/close port” o qual permite através de uma operação booleana iniciar ou a encerrar a conexão entre o *Grasshopper* e o Arduino.

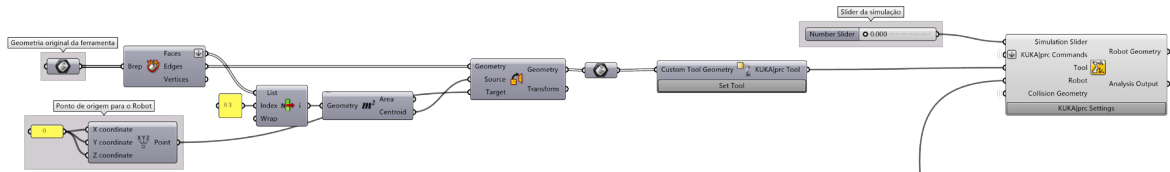
Nesse instante a comunicação com a placa Arduino está estabelecida. O Firefly permite não só o envio, mas também a receção da informação a partir do Arduino. Neste caso, o que se pretende é o envio da informação correspondente ao movimento dos servos existentes no Robot e que estão ligados à placa Arduino em diferentes pinos existentes na mesma. Para isso, utiliza-se o componente “Uno Write”. Este componente exhibe um conjunto de números que correspondem aos pinos com o mesmo número na placa de Arduino. Assim, os valores obtidos a partir do Kuka Prc, que corresponde cada um deles ao movimento de cada um dos eixos, devem agora ser ligados aos pinos correspondentes aos quais se encontram ligados os servomotores que controlam cada um desses eixos.

Através deste conjunto de add-on’s, torna-se possível a alteração do controlo do mini braço Robótico exclusivamente a partir de código escrito para um controlo paramétrico.

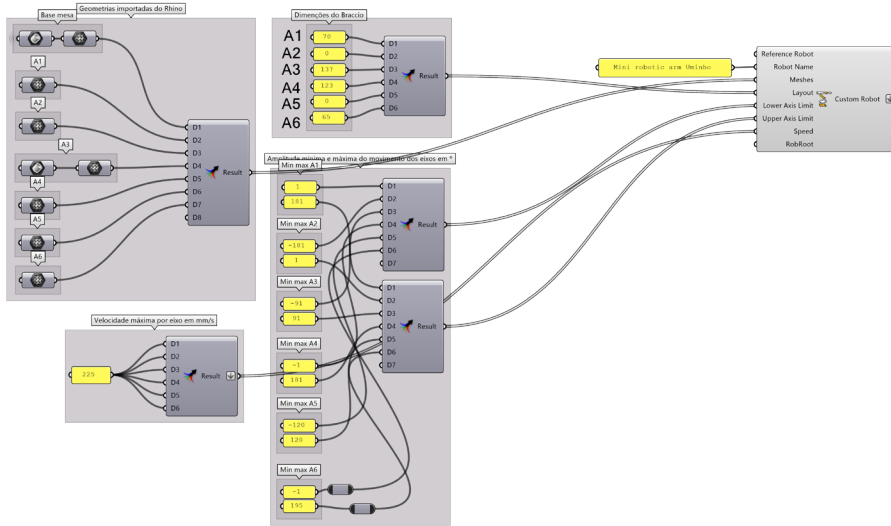
Esquema 4.3.6. Código *Grasshopper*, criação do Custom Robot e respetiva ferramenta com o add-on Kuka Prc para que seja possível o controlo paramétrico do mini braço Robótico.

Esquema 4.3.7. Ambiente de trabalho da API Arduino IDE para controlo da placa Arduino Uno.

Garra



Robot



Firmata_do_braccio | Arduino 1.8.17 Hourly Build 2021/09/06 02:33

Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda

```
Firmata_do_braccio

uint8_t bufferidx = 0; // a type of unsigned integer of length 8 bits
char *parseptr;
char buffidx;

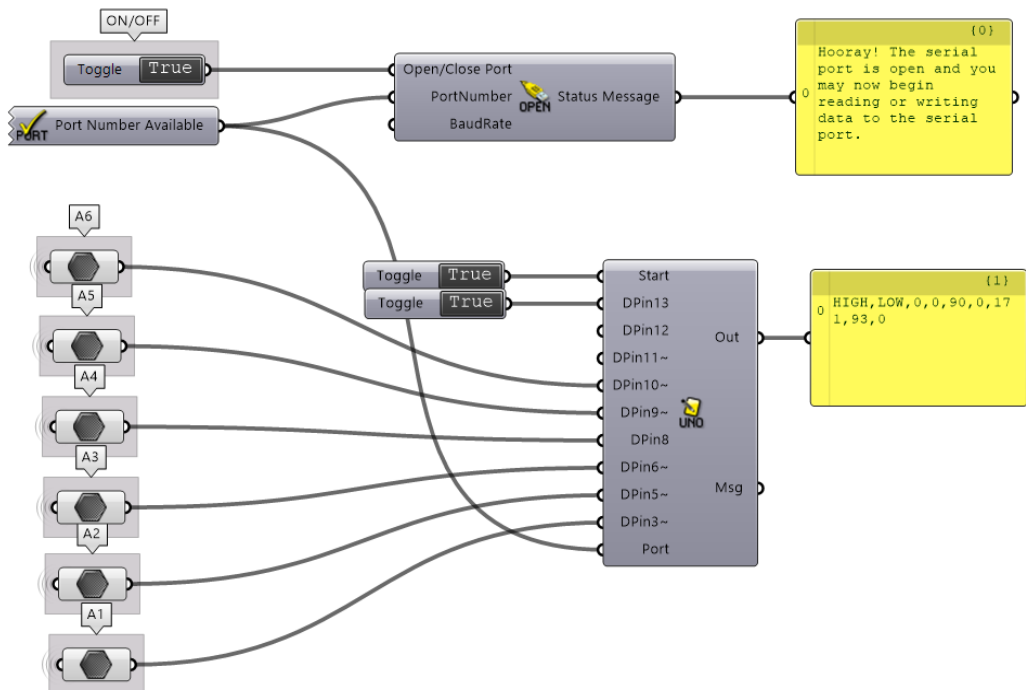
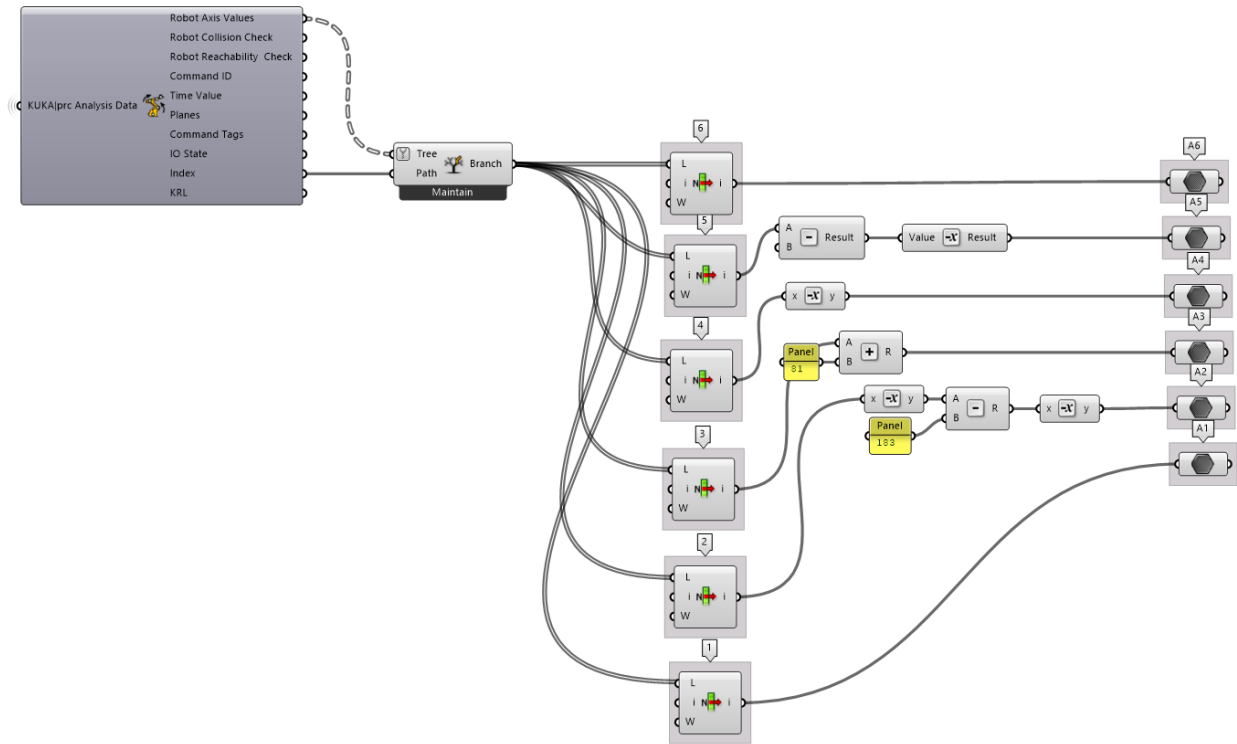
int counter = 0;
int numcycles = 1000;

#if defined(__AVR_ATmega328P__) || defined(__AVR_ATmega168__) // declare variables for STANDARD boards
  Servo Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3}; // declare array of Servo objects
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {13,12,11,10,9,8,6,5,3};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {2,4,7};
#endif

#if defined(__AVR_ATmega32U4__) || defined(__AVR_ATmega16U4__) // declare variables for LEONARDO board
  Servo Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3}; // declare array of Servo objects
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {13,12,11,10,9,8,6,5,3};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {2,4,7};
#endif

#if defined(__AVR_ATmega1280__) || defined(__AVR_ATmega2560__) // declare variables for MEGA boards
  Servo Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33, Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49, Servo50, Servo51, Servo52, Servo53;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33, Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49, Servo50, Servo51, Servo52, Servo53};
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {22,23,24,25,26,27,28,29,30,31};
#endif

#if defined(__SAM3X8E__) // declare variables for DUE boards
  Servo FDC0, FDC1, Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33, Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49, Servo50, Servo51, Servo52, Servo53;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {FDC0, FDC1, Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33, Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49, Servo50, Servo51, Servo52, Servo53};
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {22,23,24,25,26,27,28,29,30,31};
#endif
```

4.4. Caracterização do mini braço Robótico

Figura 4.3.8. Esquema *Grasshopper*, ajuste dos ângulos de saída do Kuka Prc através do componente analysis, para serem enviados para o add-on Firefly.

Figura 4.3.9. Esquema *Grasshopper* do envio do valor dos movimentos de cada eixo do Robot através do add-on Firefly.

Após as alterações efetuadas no mini braço Robótico, as dimensões e especificações do fabricante deixaram de se aplicar, e por isso surgiu a necessidade de realizar medições de forma a caracterizar o Robot.

A caracterização do mini braço Robótico é importante na medida em que permite perceber as limitações do braço, seja no seu alcance máximo, definido pelo seu “Work-envelope” (raio do volume de trabalho), quer na sua capacidade de carga que varia dependendo de múltiplos fatores. Para representar estas diferentes características que norteiam e em último caso limitam o trabalho que pode ser realizado pelo mini braço Robótico, foram elaborados diferentes esquemas e tabelas com o intuito de melhor traduzir as informações anteriormente enumeradas.

A tabela 4.3.10 mostra como se caracteriza o mini braço Robótico. Este é agora composto por 6 eixos e um end effector, a garra. No esquema da figura 4.3.16, estão representadas as dimensões dos diferentes eixos que compõem a cadeia cinemática do Robot e representada a amplitude máxima dos principais ângulos. Esta informação é útil, por exemplo, a fim de uma correta introdução das dimensões na customização do Robot no Kuka Prc. Essa informação é complementada pela informação obtida a partir da análise da tabela na figura 4.3.10, onde estão especificados os intervalos de valores de abertura de cada um dos eixos do Robot.

O Robot com as suas dimensões, vai ter diferentes áreas de trabalho dependendo do tipo de ferramenta que estiver a utilizar. Na figura 4.3.14 e 4.3.15, estão representadas as áreas de trabalho máximas no plano XZ e no plano XY, respetivamente. A área representada corresponde à área máxima de alcance com o braço na sua extensão total. Esta corresponde a um raio de 370mm que se estende por 180° a partir do centro do Robot. Desses 370mm apenas em 240mm é possível colocar a flange do Robot para conseguir acoplar uma ferramenta, ou seja, o eixo da área de trabalho no plano XY é de no máximo 240mm e nunca mais do que isso. No plano XZ, algo semelhante acontece, no entanto, o mini braço Robótico, tem a particularidade de permitir que o eixo 2 faça uma rotação de 180°, fazendo com que, a área de trabalho se estenda por cerca de 270° em redor do centro do mini braço Robótico.

Eixo	Alcance
A1	0° 180°
A2	-180° 0°
A3	-90° 90°
A4	-180° 0°
A5	-90° 90°
A6	0° 180°

Figura 4.3.10. Tabela com os valores das amplitudes de abertura mínima e máxima de cada um dos eixos do mini Robot

Uma última análise foi realizada, respeitante ao peso que o mini braço Robótico consegue elevar em função da posição dos eixos. Para este teste foi utilizada uma pequena carga de pedras de brita com a finalidade de perceber o peso que este conseguia erguer em diferentes posições dos eixos. Os dados obtidos deste teste estão representados no gráfico acima e mostram que a capacidade de carga se reduz em cerca de 100g por cada 100mm de extensão, tanto no plano horizontal como no plano vertical. A carga máxima na sua extensão mínima é de 350g, quanto à extensão máxima, este é capaz de elevar uma carga de 75g sem perda de controlo do mesmo.

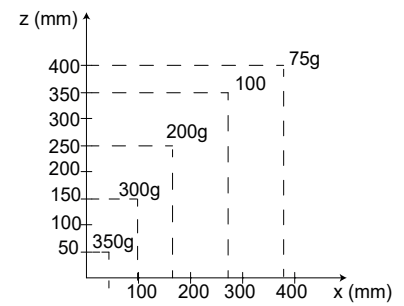


Figura 4.3.11. Gráfico de representação dos dados de carga do mini braço Robótico

Figura 4.3.12. Versão final do mini braço Robótico

Figura 4.3.13. Representação da cadeia cinemática do mini braço após modificações

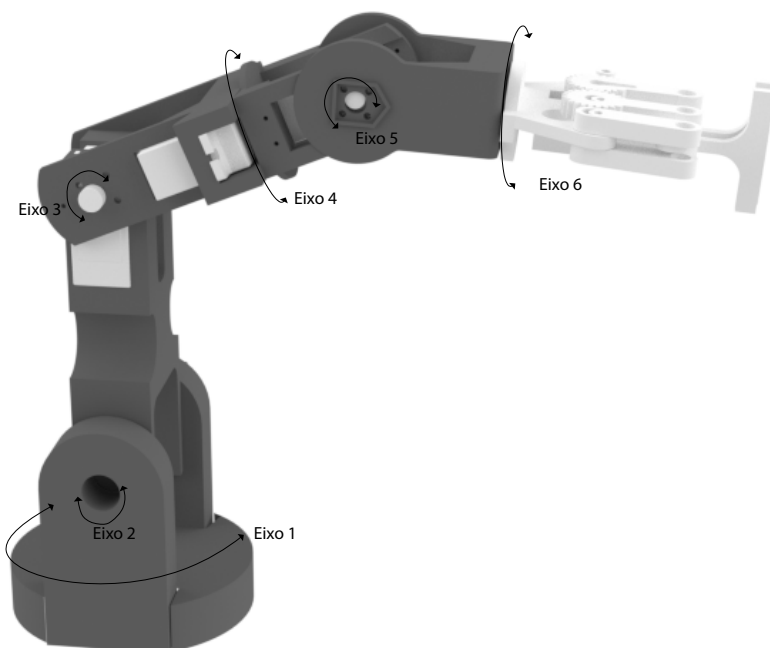
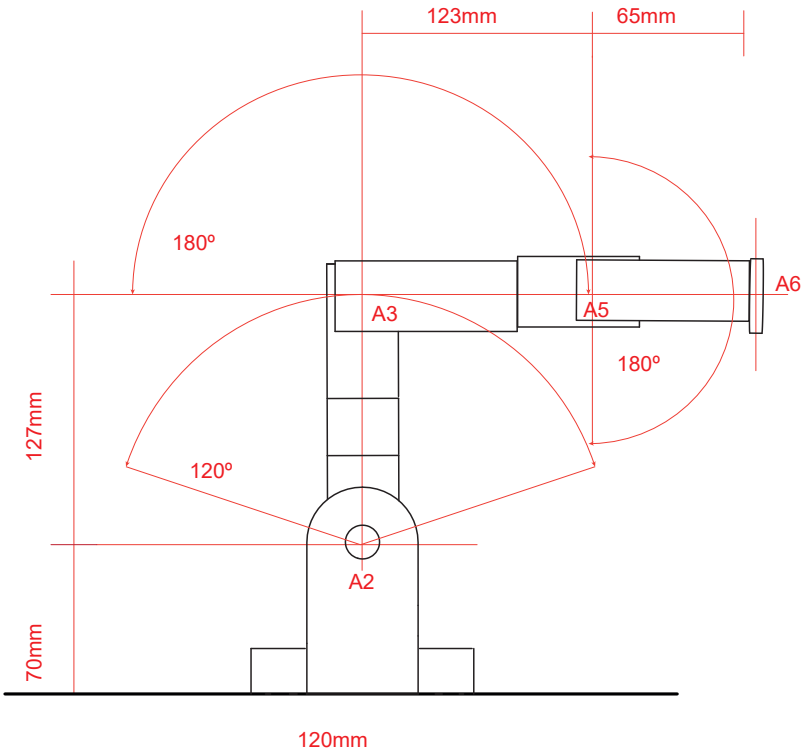
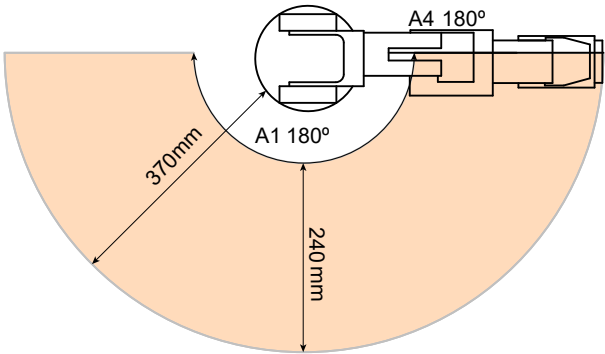
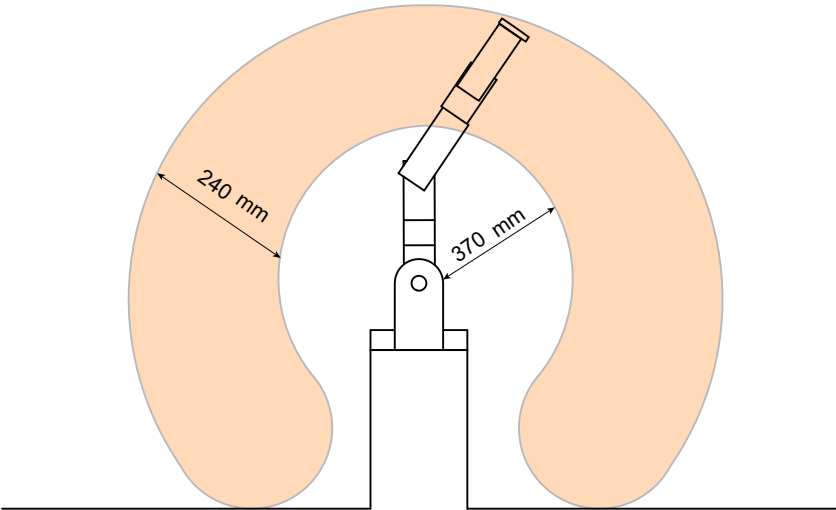


Figura 4.3.14. Especificação da área de trabalho máxima do mini braço Robótico no plano XZ

Figura 4.3.15. Especificação da área máxima de trabalho no plano XY

Figura 4.3.16. Representação das dimensões do mini braço Robótico, assim como a amplitude máxima dos principais eixos



5. Caso práctico

5.1. Contextualização e objetivos

O presente capítulo, encontra-se dividido em duas fases. A primeira tem como objetivo a modelação de um objeto arquitetónico, e a segunda a aplicação prática dos temas abordados ao longo desta investigação, mais concretamente a programação e aplicação de rotinas de controlo robótico construídas a partir de modelos computacionais.

Com o desenho e a montagem dessa estrutura, o principal objetivo é demonstrar a metodologia de trabalho que o processo de fabrico robótico exige desde a fase do conceito até à execução prática.

Seguindo este raciocínio, neste capítulo, é apresentada a conceção de uma estrutura sequencial contruída com barrotes de madeira. O projeto foi desenhado através de modelos computacionais, onde será desenvolvido o modelo digital. Posteriormente, e a partir do mesmo modelo será gerada de forma automatizada a divisão da estrutura em módulos de tamanho compatível com a área de fabrico do braço Robótico, através de uma definição criada para esse efeito.

Na segunda parte deste capítulo, os módulos anteriormente criados são rebatidos para o plano de trabalho horizontal do Robot, de maneira a que o processo de criação da rotina possa acontecer. A rotina criada está também ela dividida em duas partes. Na primeira parte é criada uma rotina para controlo de um braço Kuka de tamanho real. Na segunda parte essa rotina é adaptada ao controlo do mini braço Robótico construído no capítulo anterior, culminando no controlo da montagem do módulo anteriormente rebatido. O objetivo de criar a rotina para um braço Kuka e adaptar a mesma ao controlo do mini braço Robótico é demonstrar que a rotina para o controlo dos dois Robots é exatamente a mesma, com a exceção do envio da informação, que se processa de maneiras diferentes.

O capítulo termina com a montagem do protótipo, como parte de um módulo da estrutura sequencial à escala 1/20.

5.2. A estrutura sequencial

A primeira fase do caso prático é o desenho de uma estrutura sequencial. Esta tem como objetivo demonstrar as possibilidades e mais-valias da articulação entre os processos de desenho e fabrico permitidas pela utilização de modelos computacionais. Estes tipos de estruturas, têm sido amplamente desenvolvidas em diferentes contextos académicos e por grupos de investigação.

Grupos académicos como por exemplo Gramazio & Kholer da escola ETH Zurich ou do Institute for advanced architecture of Catalonia em Barcelona, já desenharam e construíram diversas estruturas deste género, como o caso da *“The Sequential Structure”* em 2010, figura 5.2.3, ou a *“Fusta Robotica”*, figura 5.2.1 em 2015 respetivamente. Em comum, o facto de ambas as estruturas terem sido desenhadas e construídas por alunos de mestrados em estudos avançados em Arquitetura, com o principal objetivo de uma primeira introdução ao mundo das possibilidades da aplicação e integração da fabricação Robótica na Arquitetura, figura 5.2.2.

O objetivo da estrutura sequencial explorada neste capítulo é acima de tudo demonstrar a articulação entre os métodos de desenho computacional e de ferramentas de fabrico Robótico e automação.

A proposta a seguir, parte da ideia de um pequeno pavilhão com uma estrutura de barrotes aparentemente de montagem complexa pela não existência de dois ângulos iguais entre barrotes. A estrutura sequencial caracteriza-se por ser uma estrutura composta por um conjunto de elementos discretos onde cada um é colocado com uma ordem específica, de modo a possibilitar a colocação do seguinte.

Para esta investigação, a estrutura sequencial desenhada tem como propósito ser apenas um pavilhão experimental sem um uso específico definido, uma vez que a mesma se centra muito mais no processo de fabrico e montagem do que no objeto arquitetónico em si, embora o desenho e coerência com a proposta, seja sempre uma preocupação.



Figura 5.2.1. Pavilhão Fusta Robótica, IAAC no âmbito do projeto "Open Thesis Fabrication 2015" em Barcelona. Fonte: <https://iaac.net/project/fusta-robotica-otf-2015/>

Figura 5.2.2. Imagem da montagem de um dos módulos da "The sequential Structure", ETH Zurich, Prof. Gramazio, Prof. Kohler em 2010. Fonte: https://www.rok-office.com/projects/sequential_structure/

Figura 5.2.3. "The sequential Structure" finalizada, ETH Zurich, Prof. Gramazio, Prof. Kohler em 2010. Fonte: https://www.rok-office.com/projects/sequential_structure/



5.2.1. Definição do modelo computacional

O presente subcapítulo, visa expor o processo de geração do objeto arquitetónico, obtido a partir da modelação computacional.

O potencial deste processo de desenho reside na possibilidade de trabalhar para a definição de um desenho proveniente de diferentes parâmetros, que são inteiramente controlados pelo utilizador e que se relacionam entre si. Através do encadeamento destes parâmetros, o resultado deste processo é um desenho que pode ser continuamente alterado em função de novos dados obtidos ou explorados ao longo do processo de procura da forma final.

Definição da forma

O processo de geração da forma iniciou-se pela definição paramétrica de um conjunto de curvas que definem os limites, a forma e a volumetria do pequeno pavilhão. O conjunto destas 6 curvas foram definidas através de 6 pontos, onde as suas coordenadas podem ser movidas parametricamente, o que permite modificar parâmetros como a altura ou comprimento da superfície do pavilhão. No entanto, existem limitações ao esquema paramétrico montado. Neste caso, todas as curvas geradas terão obrigatoriamente que ser paralelas ao plano XZ.

A partir do conjunto das curvas, foi gerada a superfície base. A mesma foi recortada ao longo do comprimento em tramos paralelos ao plano XZ, figura 5.2.4, esquema generativo. As curvas obtidas a partir destes tramos vão dar origem aos “pórticos” que constituem a estrutura sequencial. A distância entre os pórticos vai depender da secção dos elementos construtivos utilizados na estrutura sequencial. Este valor é introduzido como um parâmetro, que pode ser variado de acordo com a secção do material selecionado. Esse parâmetro pode ser variado ao longo do processo de desenho, sendo que toda a estrutura se ajustará aos novos valores introduzidos.

Definida a forma base, o processo seguinte é a divisão das curvas resultantes da aplicação da divisão da superfície. O número de pontos em que estas curvas vão ser divididas, vai influenciar a densidade da malha construtiva e vai depender do comprimento total dos elementos construtivos. No caso da estrutura sequencial, visto existir uma sobreposição dos elementos de modo a possibilitar a sua fixação ao comprimento dos barrotes, é adicionada uma margem para sobreposição do elemento anterior e o seguinte. O valor do comprimento e da margem que lhes é dada, são ambos aplicados parametricamente de modo que possam ser reajustados, caso se justifique.

Os pontos obtidos anteriormente, vão servir para criar os eixos dos elementos construtivos da estrutura. A geração destas linhas foi realizada a partir do movimento dos pontos iniciais provenientes da divisão das curvas na distância que será equivalente ao parâmetro do comprimento do barrote. Para que o cruzamento dos barrotes aconteça, foi criada uma rotação alternada dos eixos.

A amplitude de rotação destes eixos pode também ela ser controlada parametricamente. Obtidos os eixos dos elementos construtivos da estrutura, foi definida a secção dos elementos de madeira a utilizar. Como visto anteriormente, este parâmetro da secção vai influenciar também o afastamento dos pórticos iniciais. A secção gerada para este caso de estudo é de 67mm x 67mm.

Para que esta secção fosse aplicada a todos os eixos, foram criados retângulos nos extremos de cada uma das curvas eixo. Posteriormente foi feita uma extrusão dessa secção retangular ao longo dos eixos criando o elemento construtivo com a secção definida anteriormente.

Através deste esquema generativo, obteve-se uma estrutura de carácter experimental com 4,20 m de largura, 8,00 m de comprimento e 2,60 m de altura no ponto mais alto, e é composta por barrotes de madeira com 1,20 m de comprimento e uma secção quadrada de 14cm.

O objetivo desta estrutura é programar e simular o seu processo de fabrico com recurso a um braço robótico controlado através dos add-ons anteriormente estudados para o efeito.

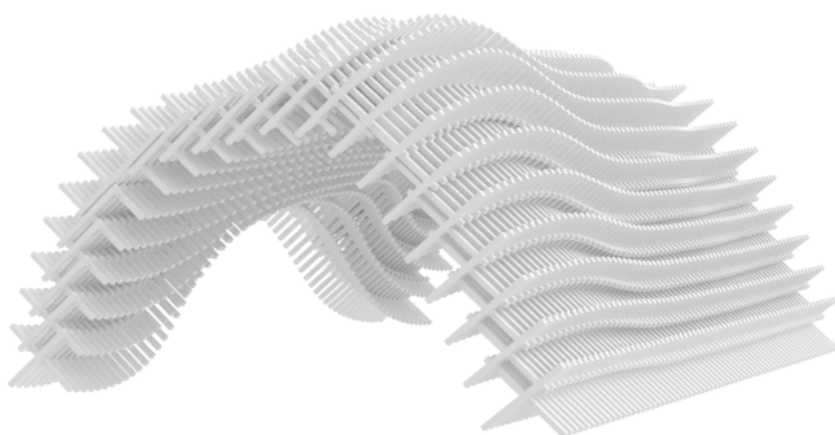
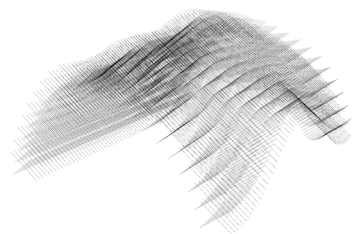
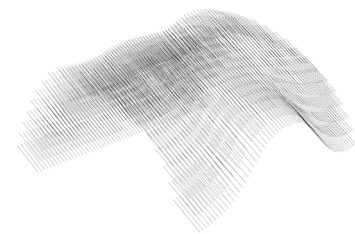
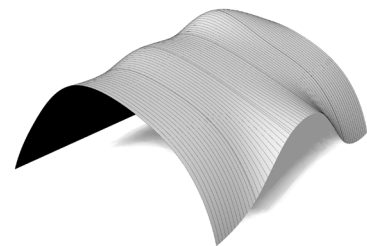
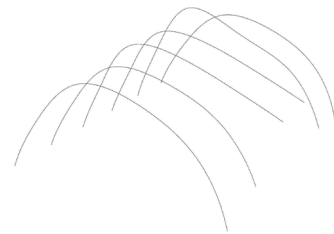
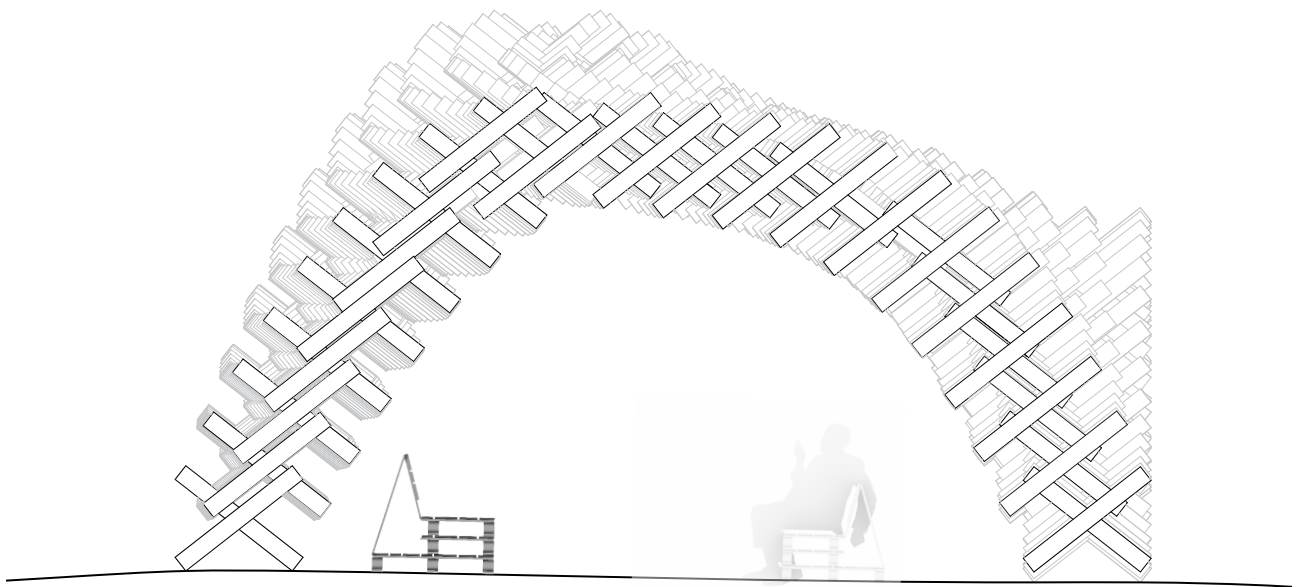
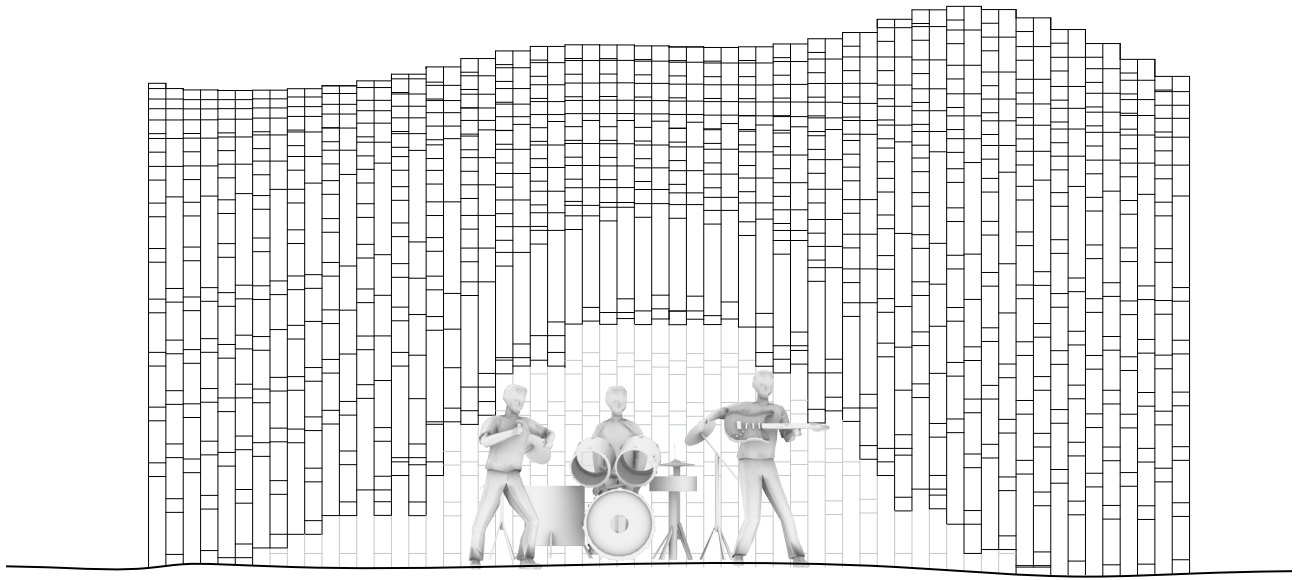


Figura 5.2.4. Esquema generativo da estrutura sequencial

Figura 5.2.5. Renderização da estrutura Final



5.3. Fabrico e Montagem

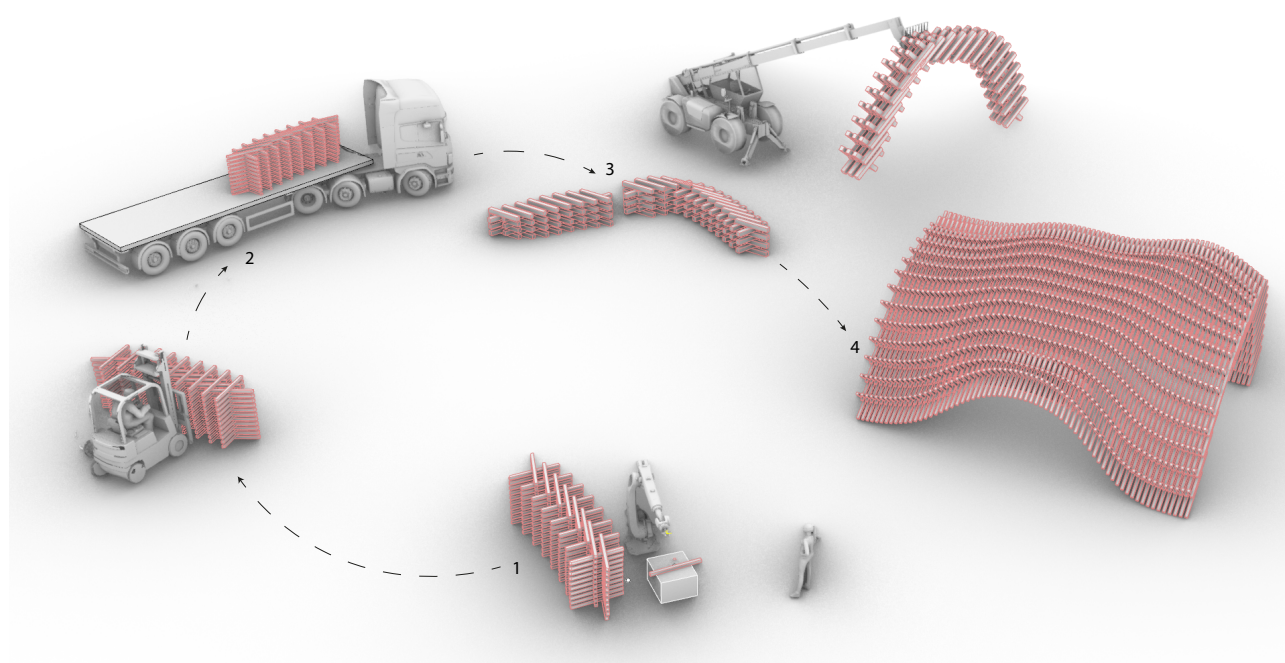
Figura 5.2.8. Alçado lateral da estrutura

Figura 5.2.9. Alçado frontal da estrutura

Figura 5.3.1. Representação do processo de fabrico e montagem, desde a produção dos módulos ao transporte e montagem

O processo de fabrico Robótico é o culminar da aplicação teórica e prática dos conhecimentos abordados ao longo desta investigação. O objetivo deste subcapítulo é demonstrar a articulação e o processo de trabalho entre as diferentes fases de um projeto, com o objetivo final de aplicar à fabricação Robótica.

A partir desta premissa, este subcapítulo pretende demonstrar os passos necessários para simular o processo de fabrico desde a desconstrução da estrutura em módulos para a operação do Robot, até à montagem da estrutura sequencial anteriormente desenhada. Na figura 5.3.3, estão representadas as várias etapas desse processo. A primeira fase é a montagem dos módulos com o Robot a partir do modelo computacional anteriormente criado. Segue-se a fase de transporte até ao local onde a estrutura será montada. Nesta fase, os vários módulos são agregados ainda no plano horizontal para que formem um pórtico. Após esta fase, os pórticos são elevados e colocados na posição final em sequência. O processo de desmontagem também se encontra acautelado através do processo inverso.



5.3.1. Desconstrução da estrutura principal

Após o processo inicial de *form-finding* e parametrização das dimensões de todos os elementos da estrutura, a fase seguinte é a preparação para fabrico e montagem. Os objetivos desta fase são dividir a estrutura em grupos de dimensões compatíveis com o alcance do braço Robótico, e rebater esses grupos no plano XY, de forma que o Robot possa sobrepor os elementos.

Este processo de divisão é extremamente importante, porque não seria possível fabricar a estrutura sem que a mesma fosse dividida em partes, seja pelo alcance do Robot ser limitado, ou pelo peso da própria estrutura. Esses dois fatores condicionariam a estrutura, sendo que a mesma teria de ser montada in situ e não poderia ser pré-fabricada noutro local.

Embora, neste caso específico não haja outras condicionantes com o tamanho dos módulos para além do alcance do Robot, os mesmos podem ser adaptados para se ajustarem, por exemplo ao peso ou às medidas condicionadas pelo tipo de transporte. Com a finalidade de dividir a estrutura em partes, foi criada a partir dos limites da projeção horizontal da estrutura, uma superfície retangular. Esta superfície foi subdividida em retângulos com as dimensões máximas de trabalho do Robot no plano XZ. Estas dimensões variam em função do modelo de Robot que se está a utilizar.

No caso desta investigação considera-se um Robot com um raio de alcance correspondente a 2,70m. Para que não haja a possibilidade de existirem elementos não selecionados, foi feito um scale em 10 % dos retângulos. Assim, a partir da implementação de um código em *Grasshopper*, todos os elementos que tenham metade do seu volume dentro de um retângulo serão adicionados à seleção desse retângulo.

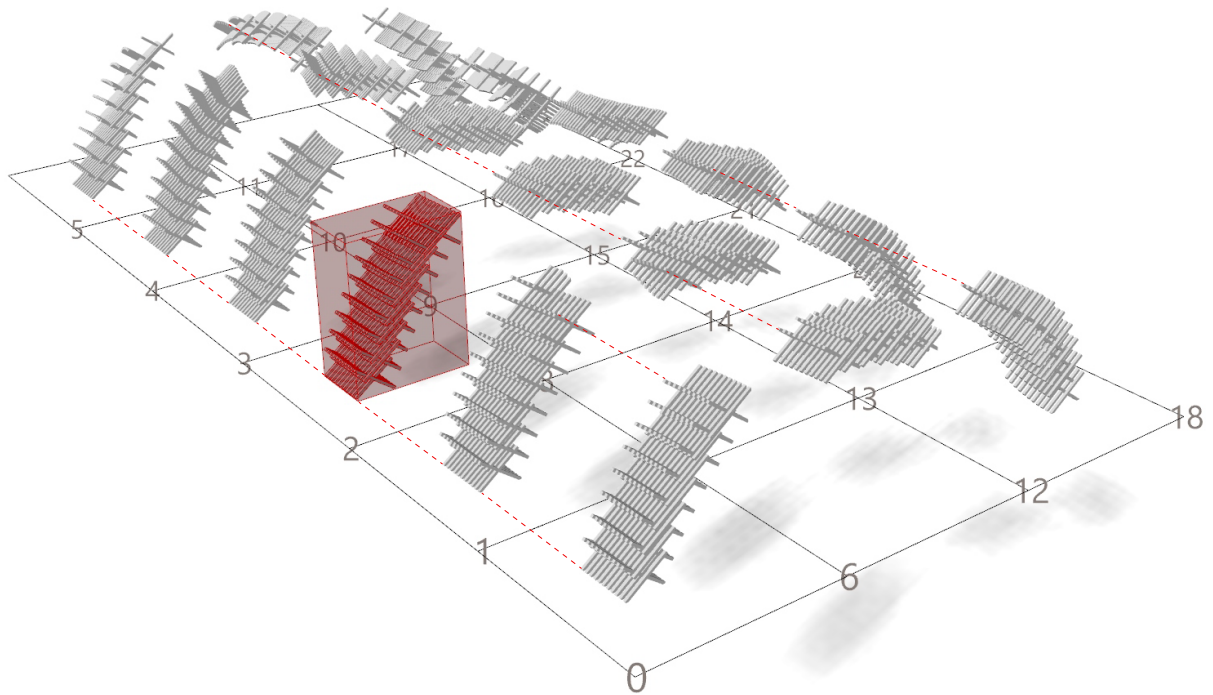
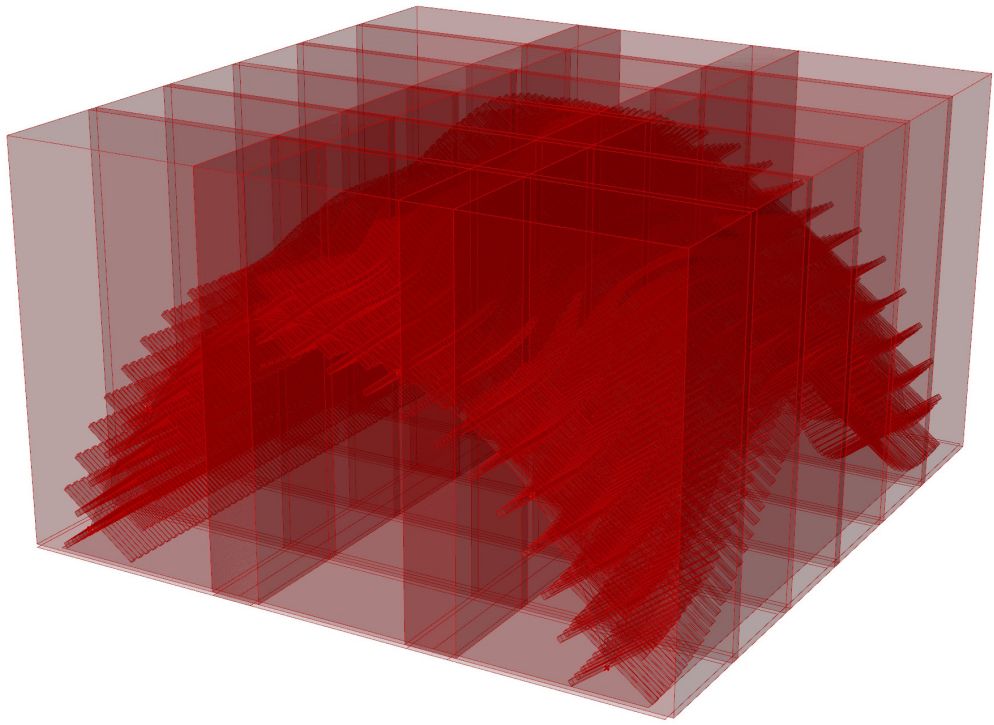
Figura 5.3.2. Criação de volumes que contêm a estrutura com o volume de trabalho do braço Robótico

Figura 5.3.3. Axonometria explodida da divisão dos módulos, para serem individualmente selecionados e rebatidos

Divisão em grupos

A partir desta divisão foram criados 18 retângulos. No entanto, para que o código funcione é necessário fazer a extrusão dos retângulos, de modo a interceptarem a estrutura como um todo. Com a extrusão foram criadas caixas que contêm assim um grupo de elementos, como é possível observar na figura 5.3.2. Cada um desses grupos será um módulo para fabrico e montagem.

De maneira a conseguir uma melhor pré-visualização dos módulos criados, construiu-se a axonometria explodida da figura 5.3.3. É a partir desta axonometria que são selecionados os módulos a trabalhar. Como apresentado nessa figura, os módulos encontram-se ordenados de 0 a 17. A definição construída em *Grasshopper* foi feita de maneira a possibilitar a seleção de cada um desses módulos com base na indicação do seu número correspondente. A partir dessa seleção os elementos são rebatidos no plano horizontal, de forma a permitir a programação da rotina Robótica para o fabrico da estrutura.



5.3.2. Simulação do fabrico e montagem através de métodos Robóticos

Este subcapítulo pretende expor as etapas da criação da rotina de fabricação da estrutura sequencial. Nos subcapítulos anteriores foi efetuada a desconstrução do todo da estrutura em módulos. A partir desses módulos, foi construída uma rotina em *Grasshopper*, para que possam ser selecionados independentemente e rebatidos no plano de trabalho do Robot.

O processo de criação da rotina de fabricação Robótica no Kuka Prc é em certa parte semelhante aos demais exemplos apresentados no subcapítulo 3.8.2, pelo que existirá alguma redundância a esta parte. No entanto, a mesma justifica-se pela correta cadência de comandos necessários ao bom funcionamento da rotina em questão.

Figura 5.3.4. Código *Grasshopper*, rebatimento dos barrotes no plano horizontal de trabalho do Robot

Figura 5.3.5. Rebatimento dos barrotes no plano horizontal de trabalho do Robot

Definição do modelo para controlo do processo de fabricação Robótica

Primeiramente, é necessário especificar o sistema Robótico que será utilizado. Para a criação desse sistema, através do componente *Kuka core*, liga-se o Robot que se pretende utilizar, de acordo com as características do tipo de fabrico ou de acordo com o Robot a que se tem acesso. Neste caso foi utilizado para a simulação o Kuka KR 210 R 2700 por ser o Robot que ficará disponível no laboratório da EAAD.

A segunda parte do sistema Robótico, é a ferramenta. A ferramenta utilizada nesta simulação é uma garra, com a finalidade de conseguir manipular facilmente os barrotes de madeira. Para vincular a ferramenta ao sistema Robótico, esta é importada para o *Grasshopper* preferencialmente como “mesh”. Para a utilização no Kuka Prc a mesma deve ter o seu centro coincidente com as coordenadas da origem (0, 0, 0). A partir da geometria das coordenadas da origem, com o componente “*custom tool-kuka Prc*”, liga-se a geometria da ferramenta no input “*custom tool Geometry*”. Podia ser utilizado apenas o componente “*Kuka tool*”, no entanto, como se trata de uma ferramenta com várias posições de funcionamento, esta vai ter dois estados: aberto e fechado. Para esse efeito, o Comando que deve ser utilizado é o comando “*multi-state tool*”.

A este componente deve ser ligada a geometria da ferramenta aberta, e uma nova *custom tool* com a geometria da garra aberta. Ambas as ferramentas devem ser ligadas ao componente “*multi-state tool*” que depois é conectado ao input do core “*tool*”. Com a ligação destes componentes o sistema Robótico está criado.

Estabelecido o sistema Robótico, o passo seguinte é a programação do percurso, os pontos de paragem e o acionamento do end-effector.

Definição do percurso

A rotina que se pretende realizar com o Robot é para a montagem de cada um dos módulos anteriormente criados. A montagem desses módulos exige a deslocação de uma peça base (ponto base-recolha) e a colocação por parte do Robot da mesma na posição correta, de acordo com o modelo rebatido anteriormente (ponto-posicionamento).

A partir da grelha desenhada anteriormente em 5.3.1 é selecionado um dos grupos de peças de 0 a 18. Este é rebatido na área de trabalho do Robot, plano XY, de modo a permitir a operação da sobreposição dos elementos. O rebatimento deve ser ajustado de acordo com o alcance do Robot não podendo estar muito próximo da base do mesmo de maneira a evitar singularidades. Para assegurar que esse limite é cumprido, foi desenhada uma área circular em redor do Robot a partir das especificações do modelo que se está a utilizar. Para o bom funcionamento do processo, a estrutura deverá ficar contida dentro desta área.

Após o rebatimento, através da desconstrução de cada um dos barrotes é achado o seu centro geométrico. Esses centros, vão ser a base de criação dos planos de orientação da garra para deslocar as peças. Esses planos são construídos de acordo com a orientação que se pretende para o end effector, quando alcançar esse ponto. De forma que a trajetória do end effector seja mais controlada e não atinja quaisquer obstáculos ou colida com peças já colocadas, são necessários pontos adicionais.

Para esta rotina, optou-se por fazer uma cópia e mover tanto os pontos de posicionamento como os pontos de recolha em alguns centímetros na direção do eixo Z. Desta maneira, o trajeto de aproximação e de afastamento destes pontos vai ser sempre vertical, não havendo risco de colidir com as peças que já estejam colocadas nas laterais do ponto de posicionamento.

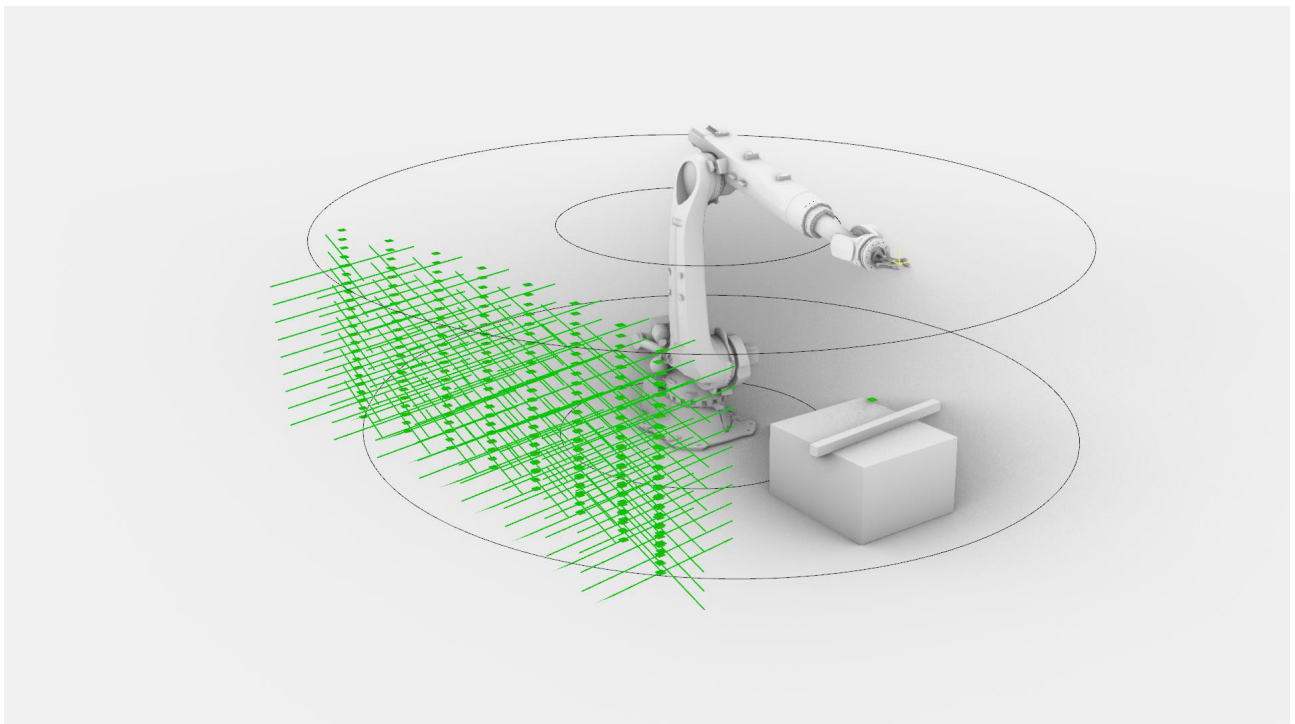
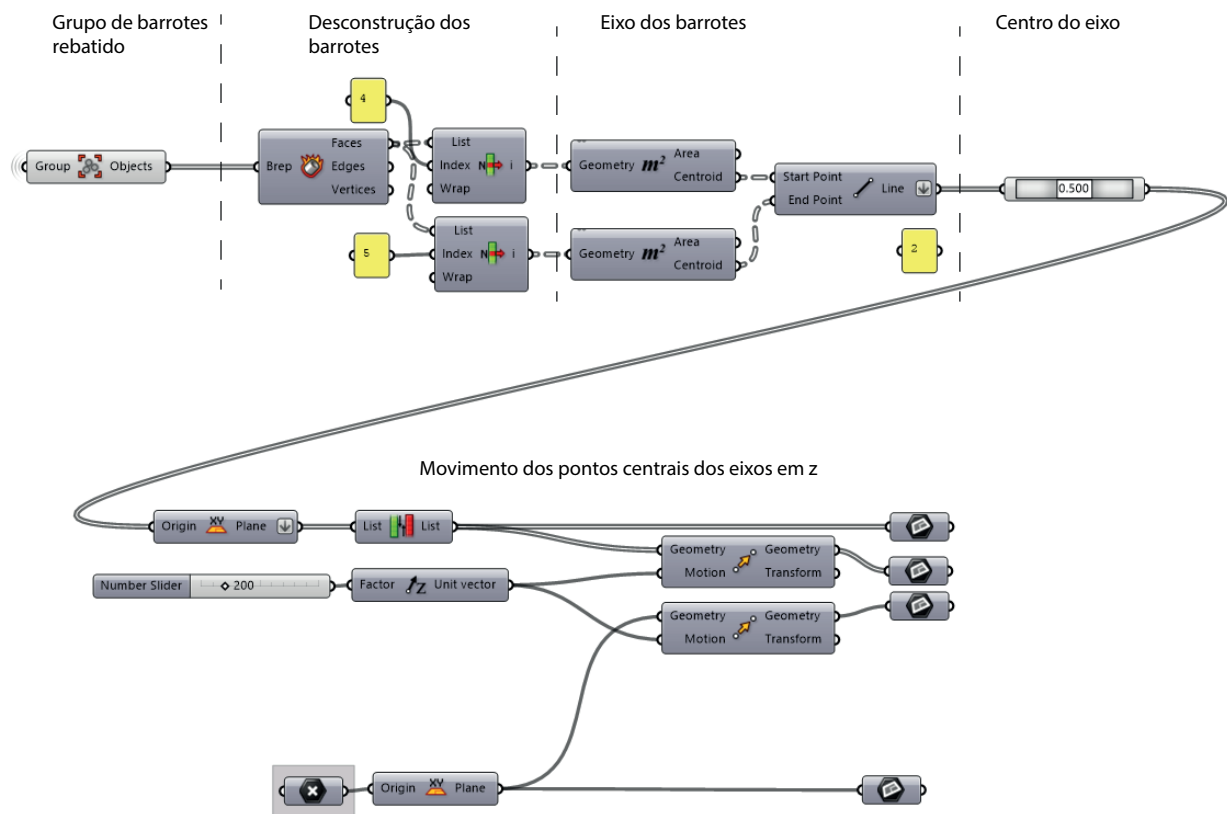
Através deste processo foram obtidos 4 pontos, que vão organizar a trajetória do Robot, que vai seguir a seguinte ordem a partir da posição inicial: 1) Ponto intermédio de recolha, 2) Ponto de recolha, 3) Ponto intermédio de recolha, 4) Ponto intermédio de posicionamento, 5) Ponto de posicionamento, 6) Ponto intermédio de posicionamento e assim sucessivamente. Para adicionar estes pontos ao programa Robótico é necessário transformá-los num comando com função de movimento, para que o controlador possa interpretar a ordem dada.

No caso da rotina a montar, o comando com função de movimento utilizado é o “Linear Movement”. Este comando vai criar um movimento em linha reta entre um ponto e o ponto seguinte. Os pontos devem ser introduzidos neste comando como planos. A orientação desses planos, dita a orientação do end effector ao longo do percurso.

No entanto, existe um conjunto de informações que ainda não foram dadas ao Robot. Essas informações são: a abertura, fecho do *grripper* e o tempo de espera para que isso aconteça. Essas informações vão ser fundamentais para o funcionamento do Robot.

Figura 5.3.6. Código *Grasshopper*, desconstrução dos barrotes, para encontrar o centro do eixo de cada um e assim definir o ponto de pega da garra.

Figura 5.3.7. Desconstrução dos barrotes para encontrar o centro do eixo de cada um, para definir o ponto de pega da garra.



Operação do end-effector

O end effector que foi utilizado nesta rotina foi uma garra com a finalidade de conseguir movimentar os barrotes de madeira.

Como registado anteriormente aquando da criação da custom tool, a garra é uma ferramenta com dois estados, onde um corresponde à garra aberta e outro à garra fechada. Fisicamente, este tipo de controlo é feito através das saídas digitais existentes na unidade de controlo do Robot. Para o controlo dessas saídas digitais, o Kuka Prc dispõem do comando “digital output kuka Prc”. Para que este comando funcione, deve ser especificado o número do digital input ao qual o *gripper* se encontra conectado na unidade de controlo física do Robot. O “output state”, corresponde à ordem que é enviada para a saída digital. Se o comando enviado for verdadeiro, a unidade enviará um sinal para que esta se abra. Se o comando for “false”, a garra fecha.

O “output state” corresponde à geometria da ferramenta que é mostrada na simulação. O número especificado vai corresponder ao mesmo número na criação da multi-state tool na fase inicial de formação do sistema robótico.

Por último, é necessário criar um comando, para que o programa fique em pausa enquanto o *gripper* é acionado. Esse comando chama-se “kuka Prc Wait”. Este permite definir uma pausa de todas as operações durante o mínimo possível de tempo em segundos.

Criação da rotina

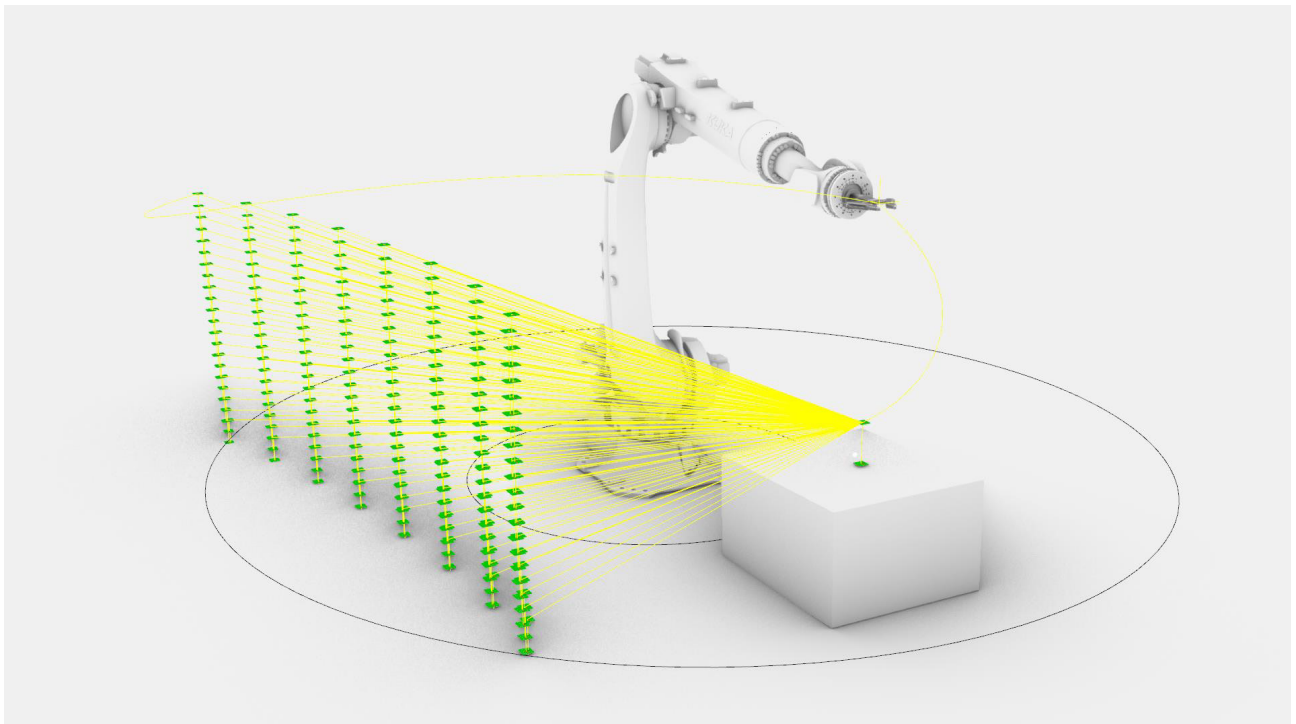
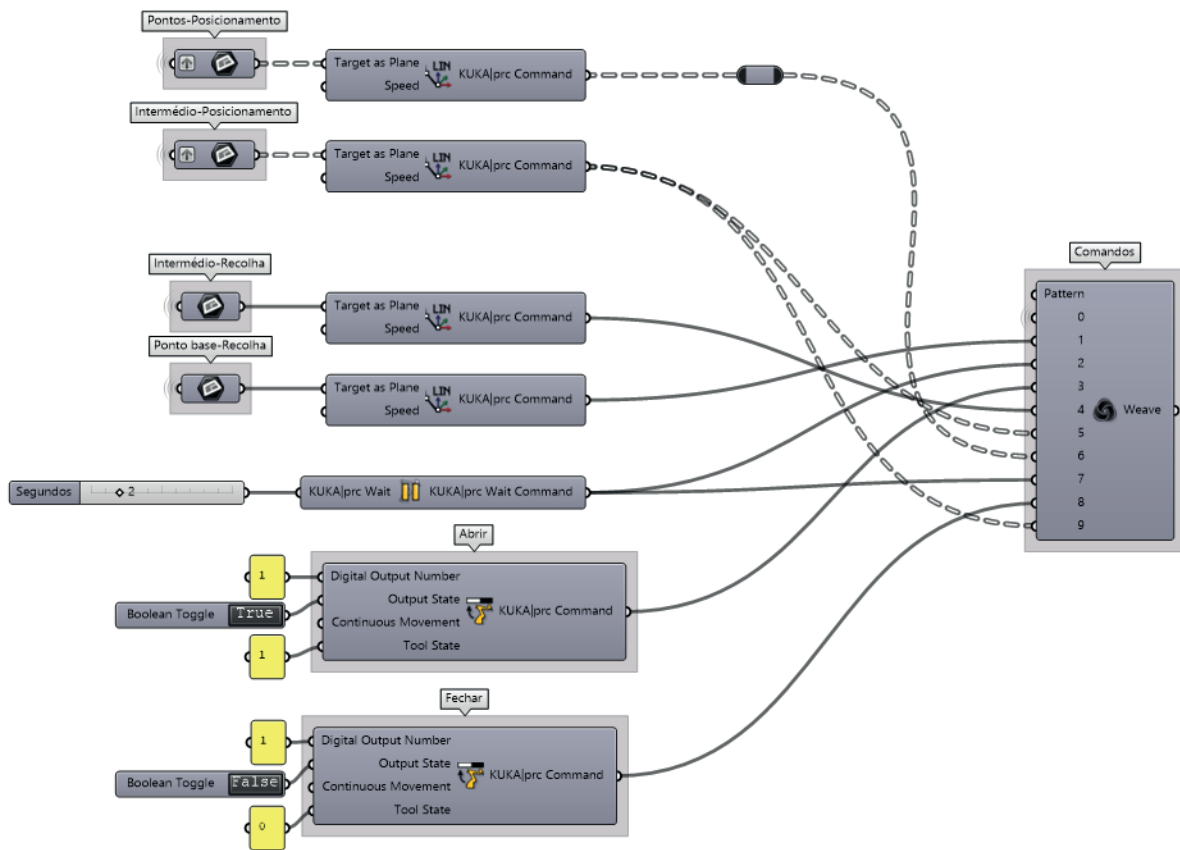
Para a criação da rotina, é necessário especificar a ordem pela qual os diferentes comandos vão ser executados. Existem vários comandos que permitem a agregação dos mesmos. O que apresentou melhores resultados, foi o componente de *Grasshopper* “Weave”. Este permite que um dado conjunto de informação seja enviado de acordo com um padrão específico definido pelo utilizador. É exatamente isso que é realizado nesta fase, em que são encadeados os diferentes comandos que devem ser ligados pela ordem específica em que devem ser acionados. Para esta rotina a ordem de ligação no componente Weave foi: 0- Ponto intermédio de recolha, 1- Ponto de recolha, 2- Kuka Wait 2 segundos, 3- Fechar *gripper*, 4- Ponto intermédio de recolha, 5- Ponto intermédio de posicionamento, 6- Ponto de posicionamento, 7- Kuka Wait 2 segundos, 8- Abrir *gripper*, 9- Ponto intermédio de posicionamento e por fim, volta a repetir o ciclo novamente até terminar o processo de acordo com a lista fornecida a partir do número de planos correspondente ao número de barrotes especificados no comando de movimento.

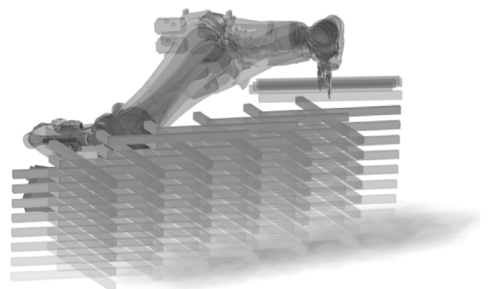
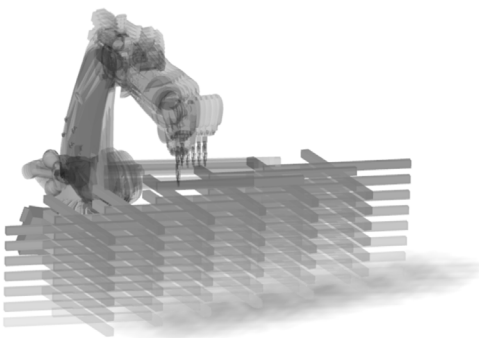
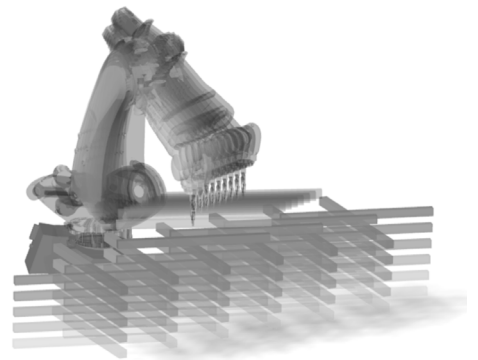
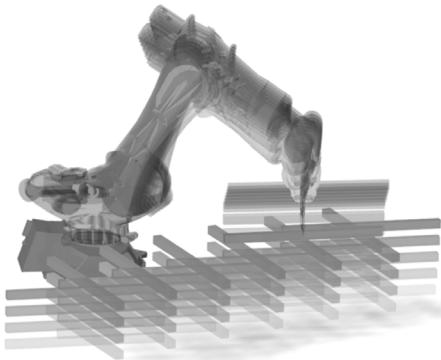
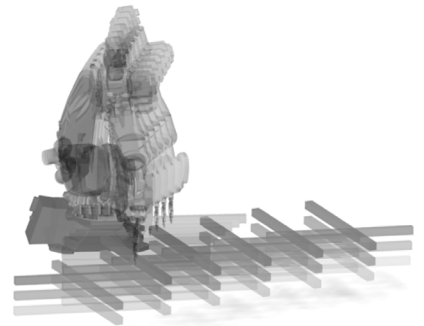
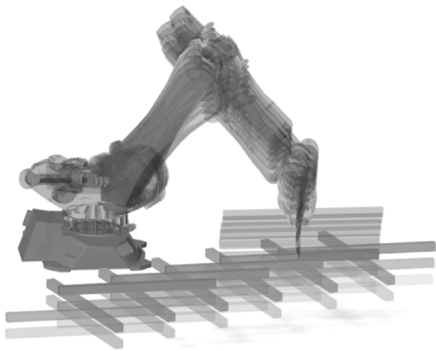
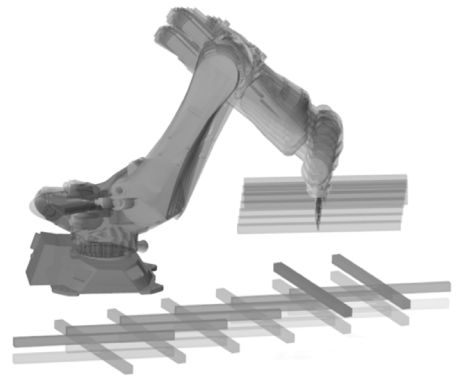
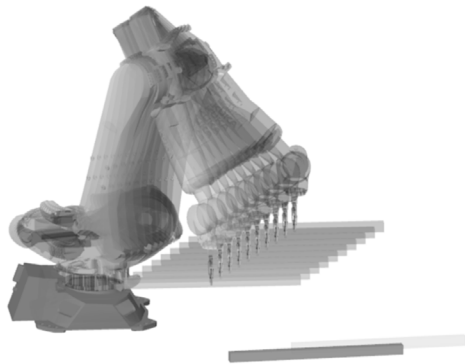
Assim, foi criada a simulação em Kuka prc e consequentemente gerado o código Krl, que pode assim ser carregado na unidade de controlo do Robot Kuka executando desta maneira a rotina.

Não existindo ainda acesso a um Robot Kuka, no subcapítulo seguinte apresenta-se a utilização do mini braço Robótico construído anteriormente.

Figura 5.3.8. Código *Grasshopper*, criação dos comandos com função de controlo de movimento e comandos de operação da garra, para criação da rotina.

Figura 5.3.9. Esquema generativo da criação dos percursos em função dos planos direcionais.





5.3.3. Montagem do protótipo com o mini braço Robótico

Figura 5.3.10. Frames da sequência de fabrico da simulação da rotina de montagem da estrutura sequencial.

Devido à impossibilidade de ter acesso a um braço Robótico antropomórfico de escala real, recaiu sobre o mini braço Robótico a tarefa de validar a rotina criada anteriormente. Como apresentado ao longo do capítulo 4, a construção do mini braço Robótico, tem como objetivo permitir compreender o funcionamento do controlo paramétrico do braço Robótico, ainda que a uma escala reduzida. O mini braço construído, tem como principal vantagem, o facto de a sua programação ser feita através dos mesmos add-ons que fazem a criação de rotinas para controlo de braços robóticos à escala real.

Assim, neste subcapítulo, a rotina anteriormente criada vai ser testada a fim de validar o bom funcionamento do mini braço Robótico a partir de uma rotina criada com a finalidade de ser exportada para a linguagem Krl com o objetivo de ser carregada num Robot Kuka real. Depois da execução dessa rotina, resultará o protótipo do grupo rebatido no plano de trabalho do Robot no capítulo anterior.

Antes da rotina em questão poder ser executada, é necessário adaptar a mesma à escala do mini braço Robótico. Este tem limitações diferentes do Robot utilizado no subcapítulo anterior. Sendo que a estrutura sequencial é uma estrutura constituída por elementos discretos semelhantes, optou-se assim por encaixar um número reduzido de elementos no protótipo, com o fim de demonstrar apenas o bom funcionamento de todo o processo de controlo do mini braço Robótico. Assim sendo, a escala do mini braço é sensivelmente $1/20$ da escala de um braço Robótico antropomórfico de tamanho médio, pelo que faz sentido que a escala do protótipo seja também ela à escala $1/20$. Com base nestas informações, foram cortados os barrotes para ser utilizados. Esses barrotes são de balsa com $7 \times 7 \times 60$ mm, uma vez que são as dimensões que mais se assemelham às utilizadas no desenho da estrutura sequencial e na simulação anteriormente criada.

A execução do protótipo foi dividida em duas fases. Numa primeira fase foi realizada a simulação da rotina, com o intuito de averiguar possíveis erros, colisões ou maus funcionamentos da rotina. A segunda fase é a fase de execução da construção real do mesmo.

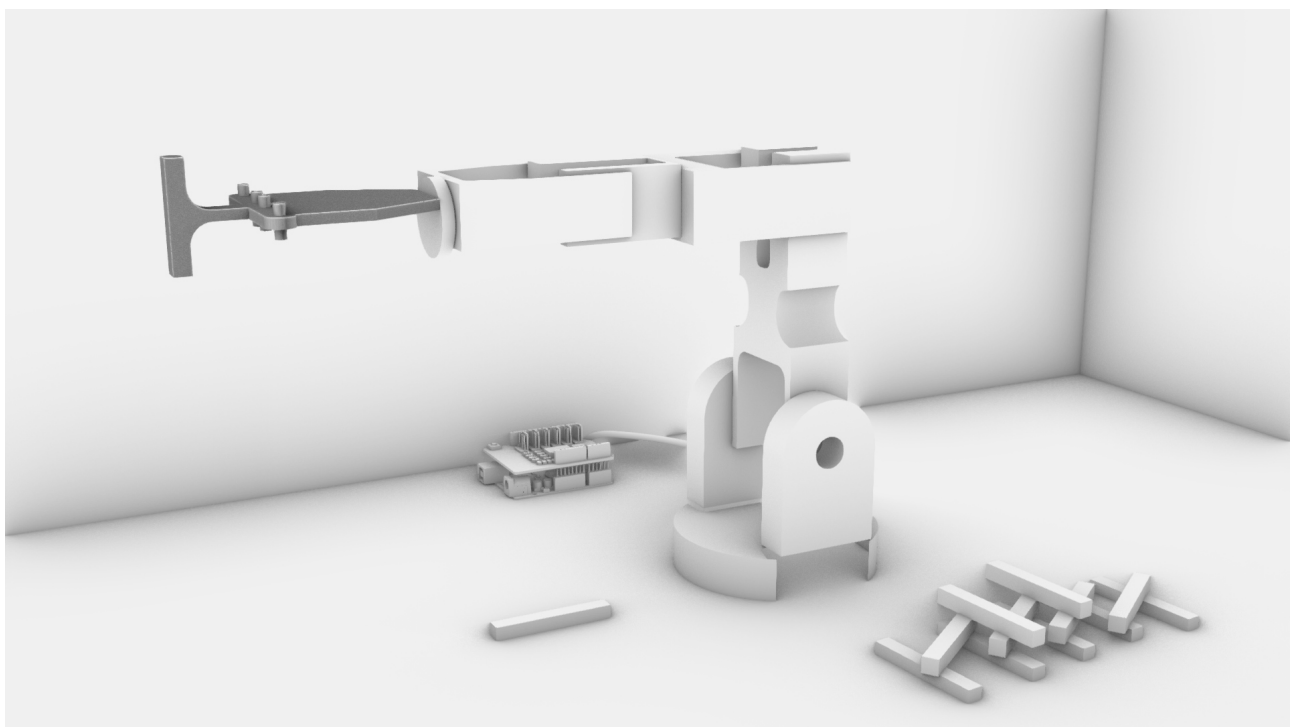
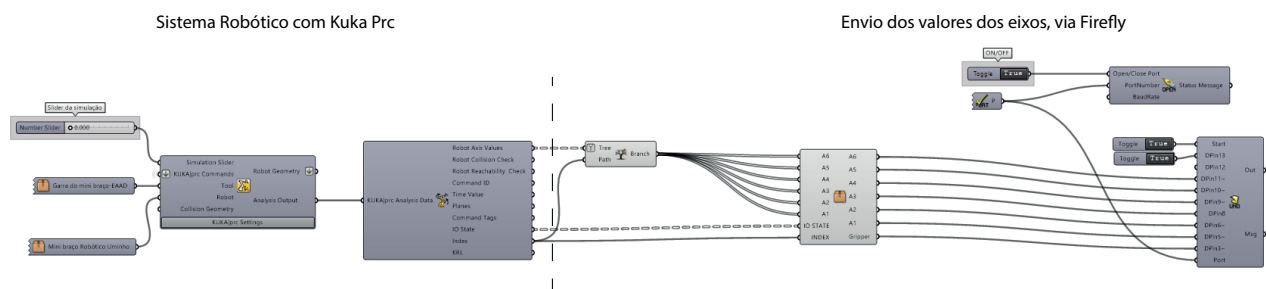
A rotina de controlo de movimentos utilizada para a montagem do protótipo, foi a mesma criada anteriormente para a simulação da montagem com um braço Robótico industrial normal. Para que esta rotina possa ser utilizada da mesma maneira que na simulação, basta que a geometria dos barrotes de madeira do módulo inteiro, seja substituída pela geometria dos barrotes agora rebatidos no plano de trabalho do mini braço Robótico.

O sistema Robótico teve também ele de ser substituído pelo sistema Robótico criado no capítulo 4, para controlo do mini braço. O controlo da garra foi de igual forma alterado e obedece a uma regra específica para controlo da garra do mini braço. Ao invés de o valor especificado ser o valor da saída digital à qual a ferramenta se encontra ligada, aqui o valor especificado é o valor da amplitude de movimento, que por sua vez será enviada para o servomotor que controla o acionamento da garra.

A execução da rotina e envio dos comandos de movimento para o mini braço Robótico, são iniciados com a movimentação do slider da simulação, ou através da opção play existente nas Kuka Settings do Kuka Core.

Figura 5.3.11. Código *Grasshopper*, sistema Robótico de controlo do braço Robótico em Kuka Prc e envio da informação para a placa de Arduino através do add-on Firefly.

Figura 5.3.12. Peças rebatidas na área de trabalho do mini braço Robótico.



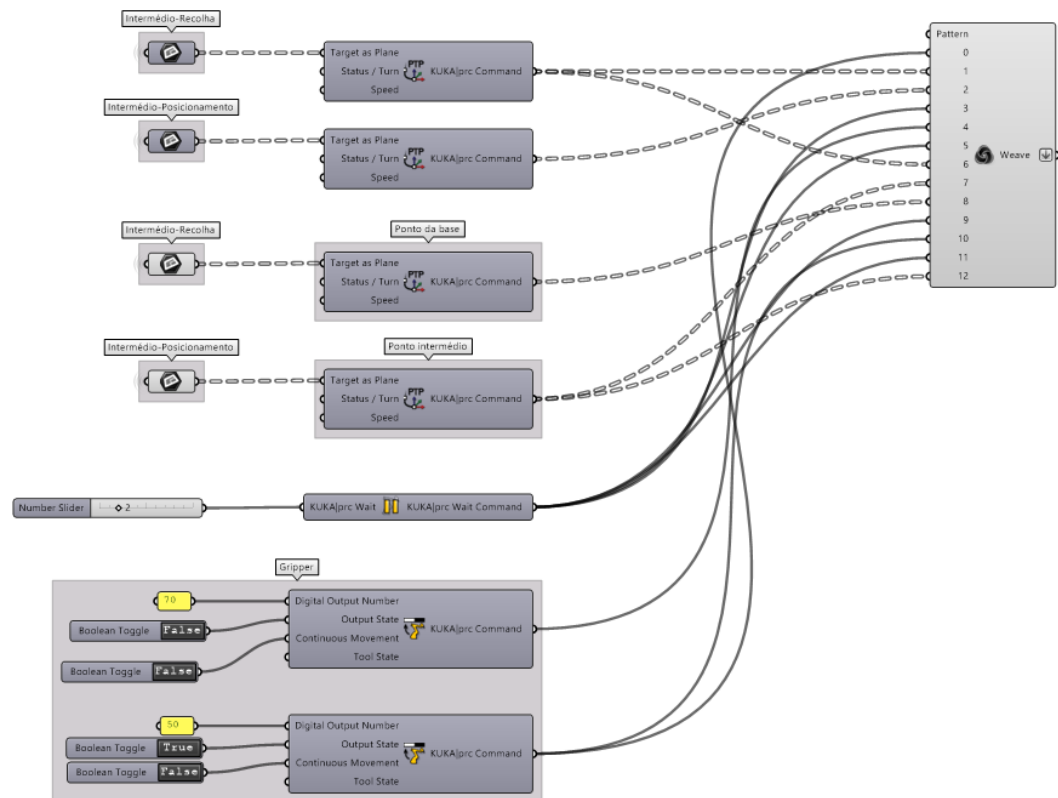
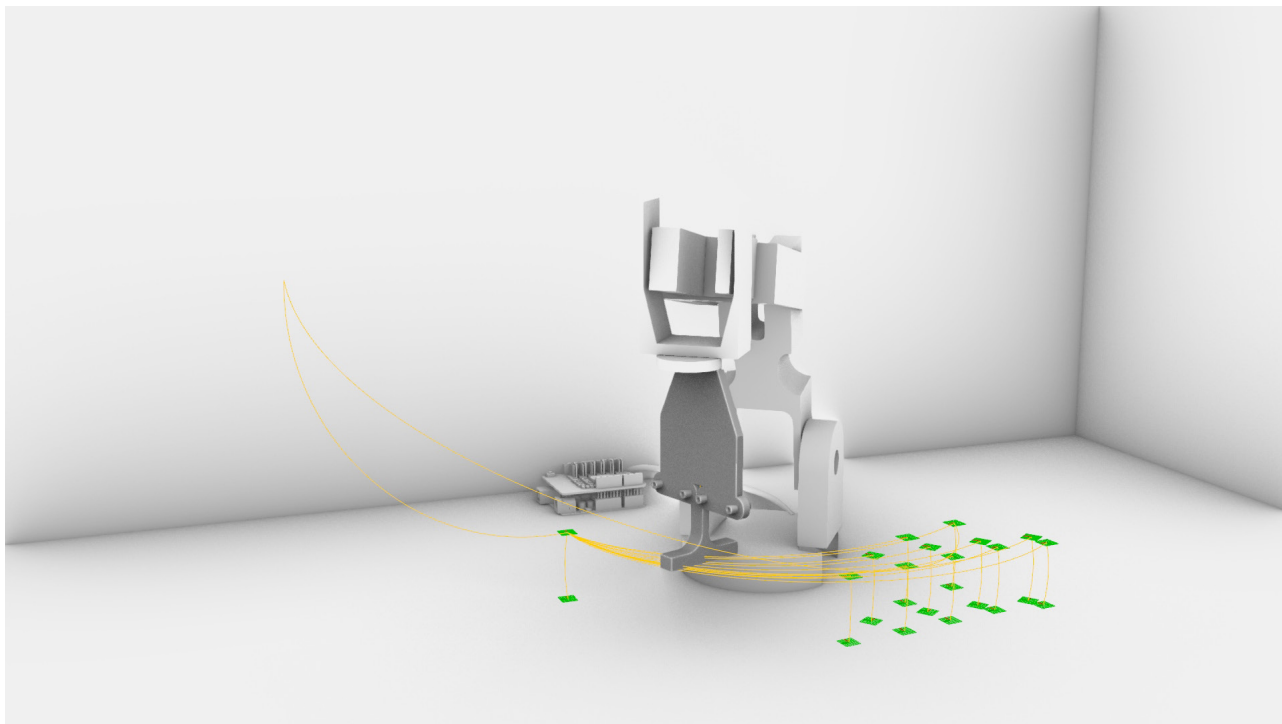


Figura 5.3.14. Código *Grasshopper*, criação dos comandos com função controlo de movimento e comandos de operação da garra, para criação da rotina.

Figura 5.3.15. Esquema generativo da criação dos percursos em função dos planos direcionais.



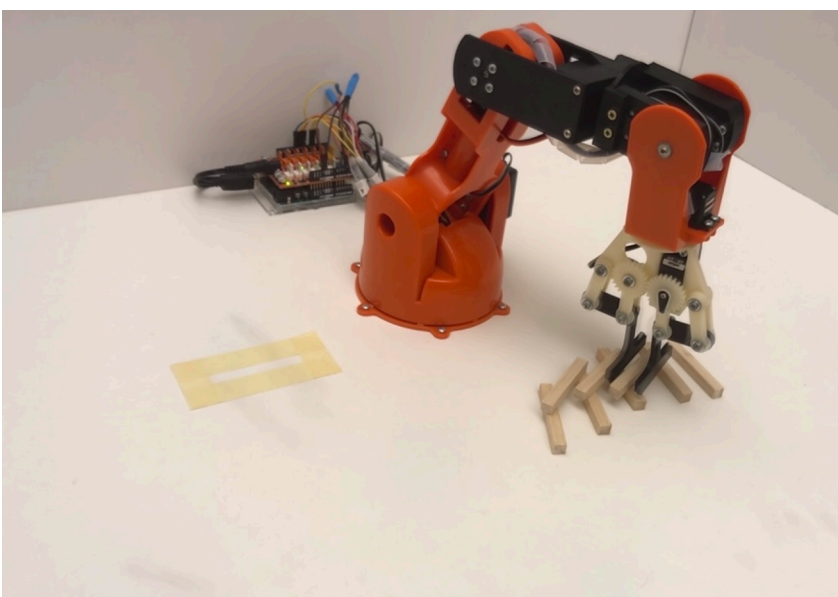
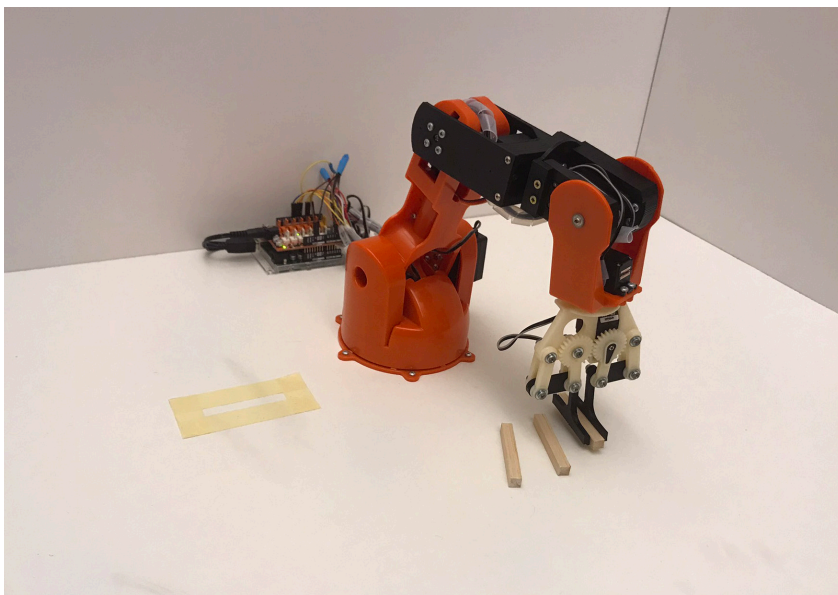
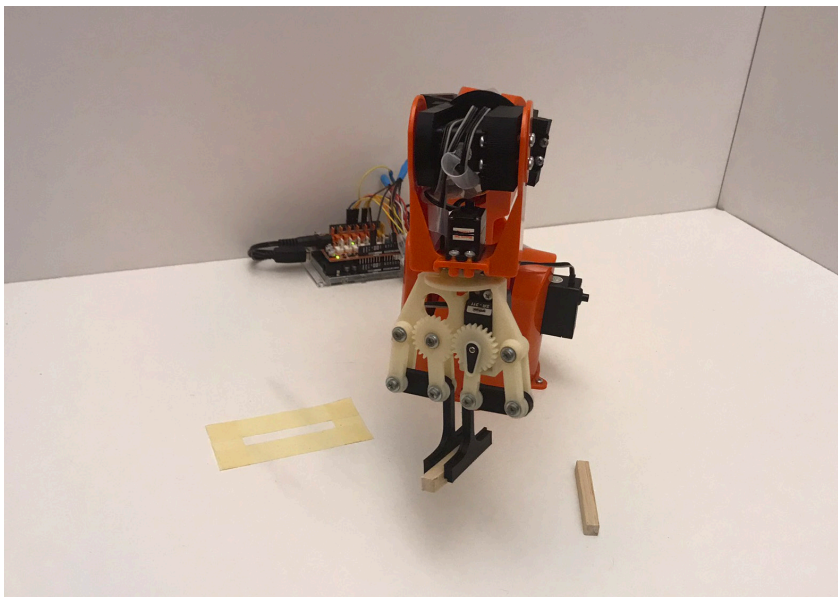


Figura 5.3.16. Sequência de imagens do mini braço Robótico a construir o protótipo final à escala 1/20.

Figura 5.3.17. Sequência de sobreposições da estrutura para completar um módulo.

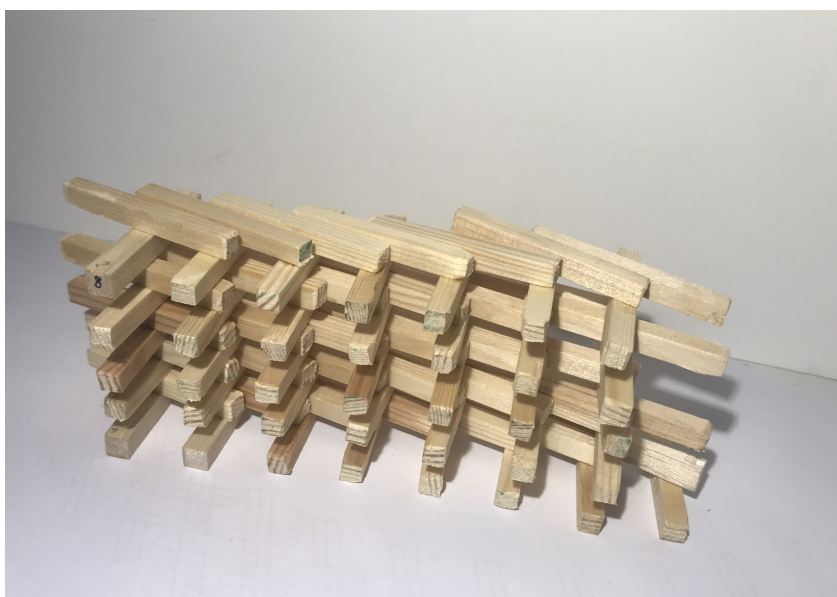
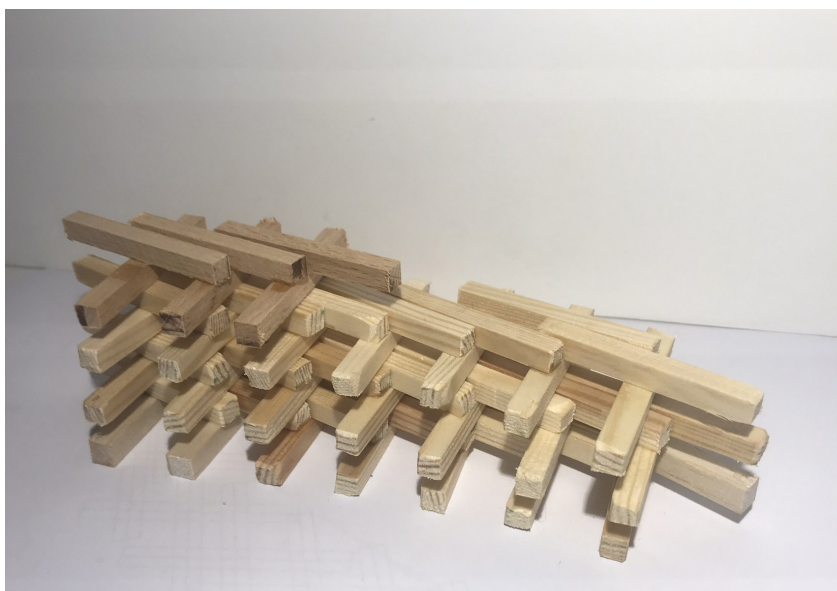
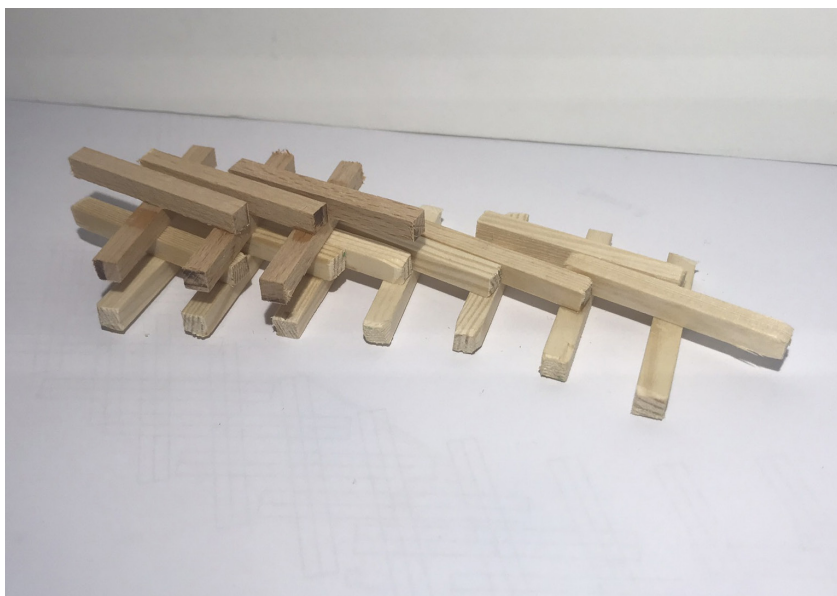
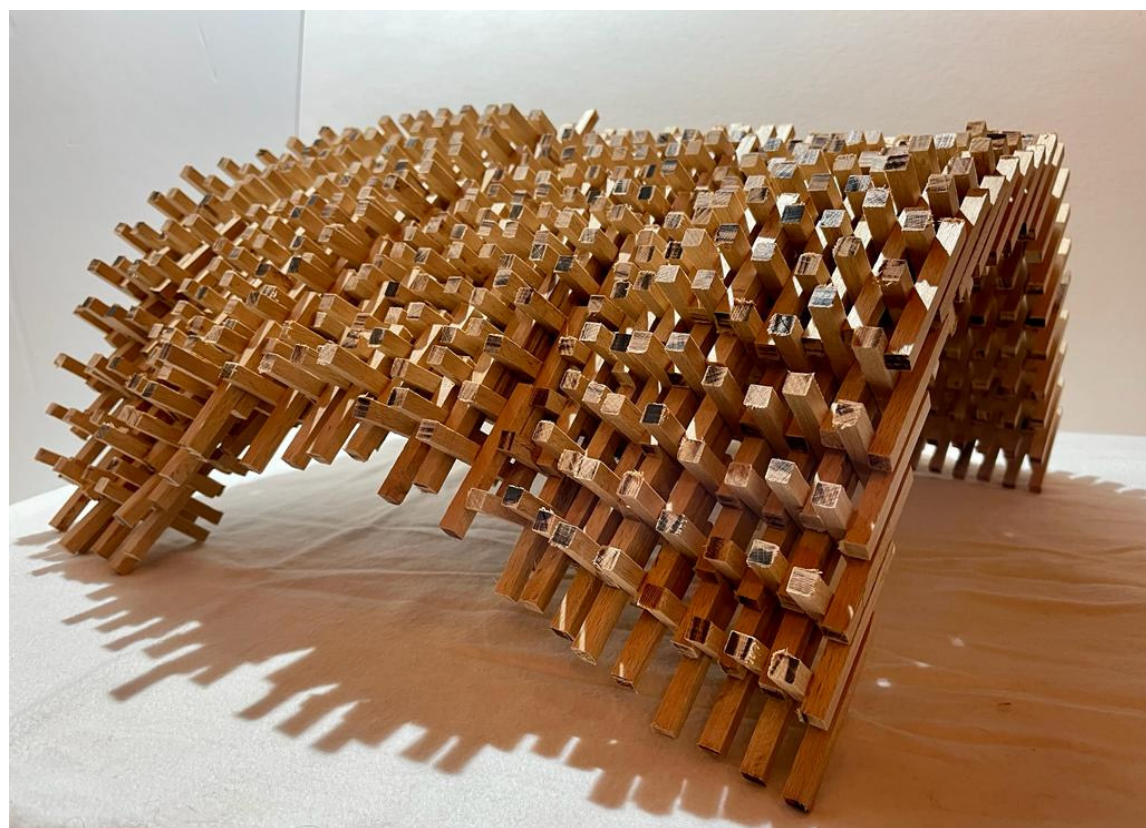
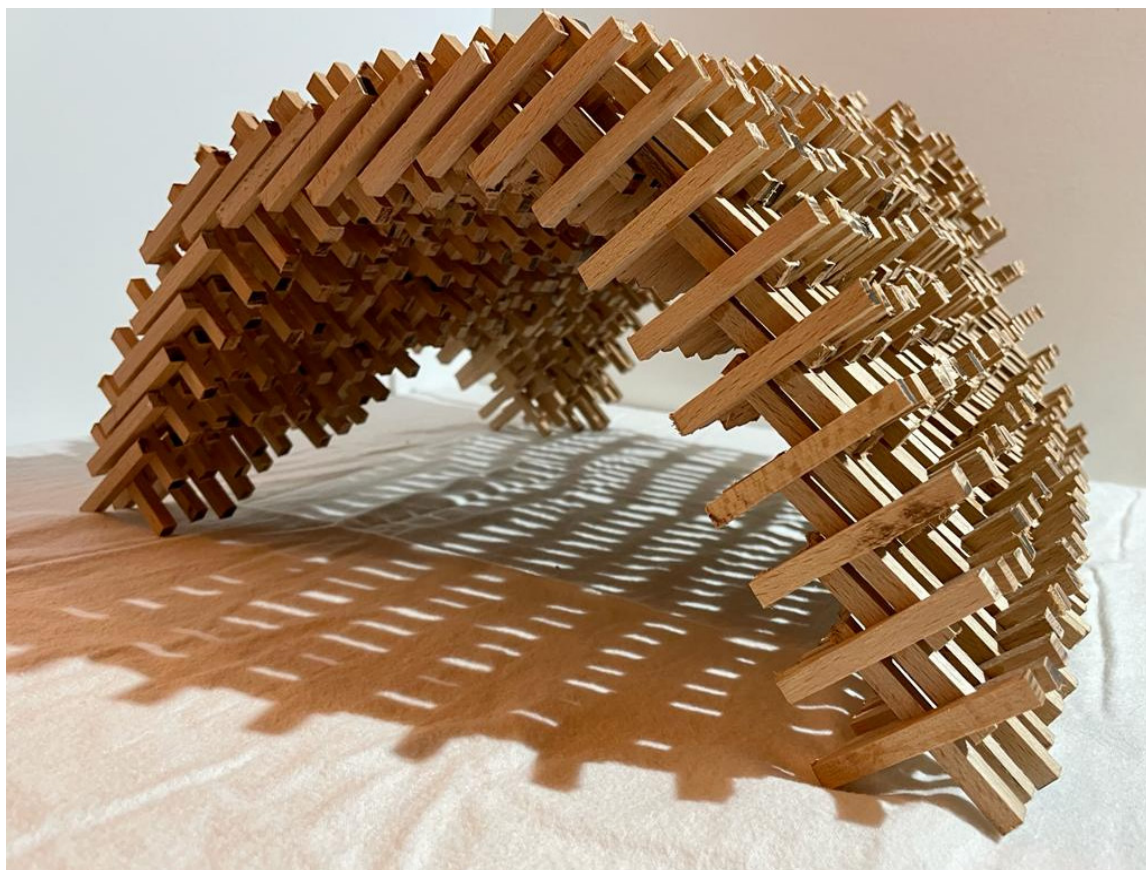
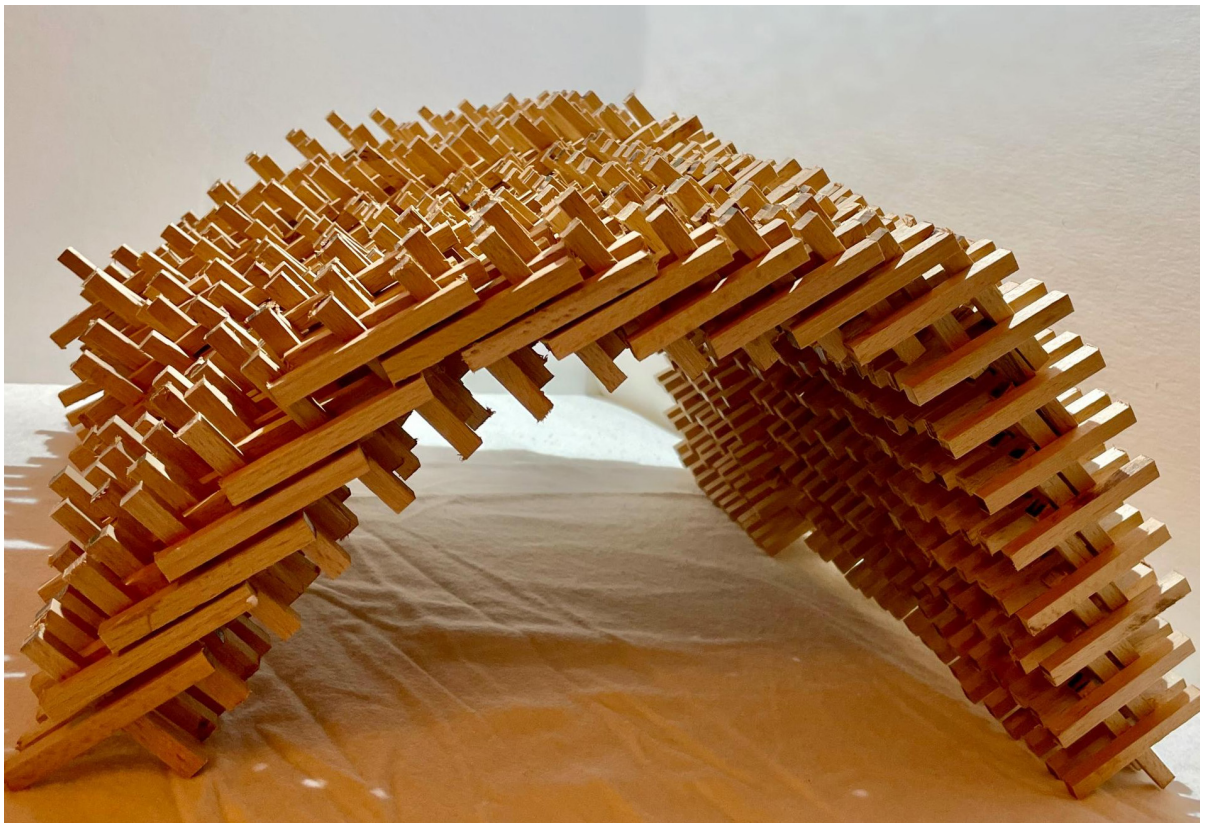


Figura 5.3.18. Sequência de fotografias do protótipo final à escala 1/20.





6. Conclusão

O presente capítulo pretende apresentar uma síntese dos resultados mais relevantes desta investigação. A investigação das ferramentas de automação aliadas ao uso de ferramentas de desenho digital, permitiram a criação do caso de estudo que experimentou a aplicação prática do processo de desenho e fabrico de uma estrutura Arquitetónica através de métodos de fabricação Robótica. Desta investigação destacam-se as seguintes conclusões:

1. Na atualidade, a Arquitetura e Construção apresenta-se como uma das indústrias com menor índice de digitalização. Esta característica leva a que não haja um sentido de atratividade para as gerações mais novas trabalharem neste setor bem como se torna prejudicial ao meio ambiente devido aos métodos de construção inalterados há várias décadas. No entanto, ainda que com atraso, com a adoção de novos processos de desenho e produção trazidos de outras indústrias como a automóvel ou a eletrónica, a Arquitetura tem conseguido implementar novas técnicas de produção mediadas por softwares CAD/CAM possibilitando o aparecimento de novas geometrias não regulares.

2. A evolução do desenho digital, nomeadamente a integração de ferramentas de desenho paramétrico, tem possibilitado uma mudança de paradigma auxiliando a Arquitetura em desenhos mais complexos tornando-os possíveis. Através da integração de algoritmos com vários fins num só modelo, torna-se possível prever e ajustar os parâmetros de uma maneira muito mais eficiente.

3. A indústria 4.0, trará para a Arquitetura e Construção novos desafios, mas também novas possibilidades, permitindo ao setor reinventar-se e inverter o ciclo de estagnação em que está preso há várias décadas no que toca à digitalização. De entre as principais tecnologias a serem implementadas destacam-se a automação do setor que trará inúmeros desafios e benefícios. Se até então a automação no setor se restringia à utilização de máquinas CNC que realizavam tarefas únicas, um novo paradigma começa agora a surgir e traz mudanças a este nível com a implementação de tecnologias Robóticas, nomeadamente a utilização de Braços Robóticos.

4. Imperativamente quando se relaciona a automação com a Arquitetura e Construção surge o termo discretização. A discretização na Arquitetura não é exclusiva dos métodos de desenho digital. No entanto, a maneira como esta se aplica à construção mudou radicalmente com a introdução da utilização de algoritmos para a discretização de estruturas complexas em elementos mais simples, algo que seria impossível ou muito difícil sem o apoio dos modelos computacionais.

5. A Robótica, mais concretamente o braço Robótico antropomórfico, apesar de já ser extensivamente utilizado noutras indústrias, principalmente nas indústrias automóvel e eletrónica, tem nos últimos 15 anos sido lentamente introduzida na Arquitetura através de diversas Universidades e grupos de investigação pela conceção de projetos que tiram partido das potencialidades desta ferramenta.

6. No que respeita à Arquitetura e Construção, para já, o futuro da implementação da Robótica passará apenas pelo ambiente controlado das fábricas ou laboratórios com a produção de elementos e estruturas condicionadas ao regime de pré-fabricação. Apesar de existirem investigações sobre a aplicação da Robótica in Situ, este é um tema altamente complexo devido a todas as condicionantes e fatores externos impossíveis de prever e controlar pelo que a implementação destes sistemas progride a um ritmo mais lento.

7. A criação de rotinas de controlo de braços Robóticos sofreu nas últimas décadas alterações na sua complexidade. Graças ao cada vez maior interesse demonstrado por profissionais de áreas que não as tradicionais utilizadoras deste tipo de tecnologias, têm surgido novos métodos que permitem a programação destes sistemas sem a necessidade de para isso ter grandes conhecimentos de linguagens de programação escrita. Para facilitar a articulação entre o desenho e o fabrico, foram criados add-ons que permitem o controlo de rotinas Robóticas a partir de modelos paramétricos. Esta possibilidade potenciou a implementação de um novo paradigma na Arquitetura e Construção permitindo uma interação em tempo real entre o desenho e o processo de fabrico.

8. Os métodos de desenho paramétrico, através de API'S como o *Grasshopper* e com recurso a add-on's criados para esse efeito, permitem enviar e receber informação a partir de dispositivos periféricos como sensores, microcontroladores e outro tipo de hardware. Esta possibilidade permite, à semelhança do que acontece com a programação de rotinas Robóticas, que se consiga interagir com dispositivos periféricos através de modelos computacionais em *Grasshopper*.

9. A criação de um mini braço Robótico com hardware da Arduino através de modelos computacionais em *Grasshopper* mostrou-se possível. O add-on de criação da rotina Robótica para controlo do mini braço Robótico é exatamente o mesmo que permite criar a rotina de um braço Robótico de escala real, podendo a mesma ser utilizada desde que devidamente escalada.

10. A utilização de métodos de desenho paramétrico no processo de desenho e fabrico de um projeto, torna viável a automatização de todo o processo. A partir do desenho é possível prever a subdivisão da estrutura em partes compatíveis com o tipo de fabrico Robótico a partir de parâmetros pré-estabelecidos. A partir dos mesmo a estrutura, é rebatida no plano de trabalho e a rotina é executada.

11. As estruturas sequenciais têm sido utilizadas nos últimos anos, como meio para introduzir alunos e pessoal não familiarizado com a utilização da tecnologia Robótica em várias Universidades. A opção por este tipo de estrutura é justificada com as características que este tipo de estrutura discreta permite explorar no processo de construção da rotina. O facto de ser uma estrutura composta por vários elementos com diferentes ângulos entre si, torna a construção da rotina pertinente, no sentido em que exige um domínio sobre o posicionamento do end effector que é transversal às demais ferramentas que podem ser operadas com um braço Robótico industrial.

12. A possibilidade de controlo e operação de um braço Robótico através do mini braço, mostrou-se útil ao permitir testar as rotinas criadas para o fabrico da estrutura sequencial desenhada. Esta espécie de simulador de fabricação Robótica, permitiu um primeiro contacto com a aplicação de uma rotina a um Robot e assim ter um feedback real para além da simulação virtual. A utilização do mini braço Robótico, permitiu que a rotina pudesse ser implementada, testada e consequentemente validada ou adaptada, apesar da impossibilidade de ter acesso a um braço Robótico Industrial de escala Real.

Ao longo da investigação que se sintetizou neste documento, foram adquiridos um conjunto de conhecimentos que contribuíram para um maior interesse pessoal acerca destes tópicos.

Nesse sentido, como proposta de trabalhos futuros prevê-se uma abordagem aos seguintes tópicos:

1. Dar continuidade ao caso prático através da aplicação dos conhecimentos adquiridos ao fabrico da estrutura sequencial com recurso a um Robot de escala real;

2. Aprofundar conhecimentos noutro tipo de aplicações de ferramentas Robóticas para além da garra;

3. Implementação de sistemas de visão computacional para deteção de objetos de modo a prever uma maior automação dos processos de controlo e fabrico Robótico.

7. Bibliografia

Tinoco, André (2016). O desenho paramétrico no processo de projeto arquitetónico O caso de estudo de um projeto para o porto de recreio de Sines, Dissertação de Mestrado para obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Ribeiro, Joaquim (2017). O conceito da Indústria 4.0 na confeção: Análise e Implementação, Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Têxtil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Junqueira, Alexandre (2020). A Quarta Revolução Industrial e o Potencial Impacto da Indústria 4.0 sobre o Emprego, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Economia Social, Escola de Economia e Gestão da Universidade do Minho, Braga, Portugal

Marques, Luís (2008). O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção, Dissertação para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil-Especialização em Construções Cíveis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Leite, Rui (2015). Métodos Construtivos de Edifícios- Comparação entre Pré-Fabricação e Construção Tradicional em Betão Armado, Dissertação para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

Pedro, Ana (2016). Sistemas Paramétricos de Modelação Visual por Nodos, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Design de Produto, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Almeida, Filipe (2012). A Madeira como Material Estrutural- Projeto da Estrutura da Cobertura de um Edifício, Dissertação para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Teodoro, N. F. (2011). Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Gaisset, I. (2011). Designing Buildings for Disassembly: Stimulating a Change in the Designer's Role, Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, Paris, França

Antunes, J. P. (2015). Programação de robôs industriais em operações de maquinaria, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Bigdoli, A. (2016). Towards An Integrated Design-Making Approach in Architectural Robotics, The Pennsylvania State University The Graduate School College of Arts and Architecture, Pennsylvania, USA

Campos, J. C. (2013). Fabricação Robótica em Arquitetura, Principios, processos e aplicações, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Carvalho, J. A. (2018). Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a personalização do desenho e fabrico de componentes arquitetónicos, Dissertação de Mestrado em Arquitetura, Escola de Arquitetura da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Martins, Raquel (2015). O Aspeto Social da Fabricação Digital, Trabalho Teórico Submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura, Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, Portugal

Veldhuis, G. (2020). Integral Design Process of CLT Structures and Robotic Fabrication, An integral Workflow for the preliminary structural design of CLT connection panels with the use of customized robotic fabrication, A thesis in Civil Engineering, Master Building Engineering// Structural Design track, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands

Baptista, Inês. (2016). Percursos de Maquinagem Realizados com Robôs, Mestrado integrado em Engenharia Mecânica, Especialização em Automação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Nilsson, Daniel (2016). G-Code to RAPID translator for RobotStudio, A Thesis Submitted to the Department of Engineering Science in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science with specialization in Robotics. University West, Trollhättan, Sweden

Mason, Molly. (2015) Carfting Decisions, integrating design, fabrication, and assembly for six axis robotic arms, Submitted to the Department of Architecture in Partial Dillfillmento of the Requirements for thr degree of Master of Science in Architecture studies, Massachusestts Institute of Techonology, Massachusetts, USA

Gameiro, José. (2019) Programação de Braço Robótico Industrial para tarefas de Corte por Disco Circular em chapas de Pedra Natural, Dissertação paraobtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica,Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal

Palermo, H. (2006) O Sistema Dom-ino, Disseração de Mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil

Kolarevic, Branco. (2003). Architecture in the Digital Age, Design and Manufacturing. Taylor &FrancisLTD.

Dunn, Nick. (2012). Digital Fabrication in Architecture. 361-373 City Road, London EC1V 1LR,: Laurence King Publishing Lda

Burry, J., Sabin, J., Bob, S., Skavara, M. (2020). Fabricate 2020: Making Resilient Archn, Mpllitecture, London: UCL Pressz. Consultado em 20 de Outubro de 2021 em <https://www.uclpress.co.uk/>

Susskind, Daniel. Janeiro de 2020. Um Mundo sem Trabalho,1ªedição, Porto editora, Porto

Pine, B. Joseph (1993). Masse Customization – The New Frontier in Business Competition. Harvard Business School Press. p. 13. ISBN 978-0-87584-372-8.

Kolarevic, B., Duarte, j. (2019) Mass Costumization and Design Democratization. Routledge

Hovestadt, L., Et al. (2020) Atlas of Digital Architecture. Birkhäuser, Base

Çokcan, Sigrid, Braumann, Johannes Braumann, Et al. (2013) Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design. Springer-Verlag/Wien, New York

Willmann, Jan, Block, Philippe Et al. (2018) Robotic Fabrication in Architecture, Art and design 2018. Springer Nature Switzerland AG, ISBN 978-3-319-92294-2.

Retsin, Gilles. (2019). Digital Assemblies: From Craft to Automation. Discrete Reappraising the digital in architecture, 89 (2), 39 a 45.

Dino, I. G. (2012, Janeiro 1). METU Journal of the Faculty of Architecture. Creative design exploration by parametric generative systems in architecture, pp. 208-209.

Construction, G. A. (2020). 2020 Global Status Report For Buildings And Construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings, pp. 20-24.

IFR, I. F. (24 de September de 2020). World Robotics 2020 Report.

Standardization, I. O. (03 de 2012). ISO 8373:2012. Robots and robotic devices-Vocabulary, p. 38.

Abreu, P. (2001). Robótica Industrial,Acetatos. Fundamentos de Robótica, Aspetos Tecnologicos da Robótica, FEUP, p. 8.

Larsen, Niels Martin & Aagaard, Anders. (2020). Robotic processing of crooked sawlogs for use in architectural construction. Construction Robotics. 4. 10.1007/s41693-020-00028-7.

Archtrends (2021).Indústria 4.0 e a arquitetura: veja as tecnologias que são comuns entre as duas. Acedido em 16 de dezembro de 2021. Disponível em Referências-<https://archtrends.com/blog/industria-4-0/>

Porto Editora – discretização no Dicionário infopédia da Língua Portuguesa [em linha]. Porto: Porto Editora. [consult. 2022-01-21 01:38:45]. Disponível em <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/discretizacao>

Association for Robots in Architecture. (18 de Novembro de 2021). Kuka Prc. Obtido de Association for Robots in Architecture: <https://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc>

Arduino. (2021). Software. Obtido de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/software>

Firefly. (Novembro de 18 de 2021). Firefly Experiments. Obtido de Firefly: <http://fireflyexperiments.com/>

Hoover, R. (2021). Xylinus. Obtido de Grasshopper Docs. www.grasshopperdocs.com

Johannes Braumann (Robots in Architecture). (26 de Fevereiro de 2020). Kuka Prc. Obtido de Grasshopper Docs: <https://grasshopperdocs.com/addons/kuka-prc.html>

KUKA. (3 de Novembro de 2021). KUKA.Sim. Obtido de KUKA: <https://www.kuka.com/pt-pt/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4/software/planejamento-proje%C3%A7%C3%A3o-service-seguran%C3%A7a/kuka,-d,-sim>

Rajat Agarwal, S. C. (18 de Junho de 2016). Imagining construction's digital future. Obtido de McKinsey&Company: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future>

Research, G. K. (2016). GramazioKohlerResearch. Obtido de Projects: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/52.html>

Universal, R. (2021). Universal Robot UR3e. Obtido de Universal Robots: <https://www.universal-robots.com/pt/produtos/ur3-robot/>

Wallén, J. (2008). The history of the industrial robot. Linköping, Sweden: Department of Electrical Engineering.

Chui, M. Mischke, J. (2019). The impact and opportunities of automation in construction, McKinsey & Company, disponível em <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-impact-and-opportunities-of-automation-in-construction>

8.Anexos

8.1. Atlas de Investigação

Para que seja possível perceber a utilização dos métodos de fabrico Robótico ao longo dos últimos 15 anos, foi elaborado o seguinte Atlas que compila algumas das investigações mais relevantes. Para a seleção dos projetos foi importante o seu método de fabrico, mas também a sua escala e pertinência. Em comum, todos privilegiam a pré-fabricação de elementos através da discretização das superfícies geradas. Esta característica foi propositadamente condicionada ao longo da investigação para a elaboração deste Atlas devido à intenção de perceber o impacto dos métodos de fabricação Robótica com dois temas em comum. O uso da discretização de elementos, e o uso de elementos de madeira para fabrico Robótico de estruturas de grande escala.

O levantamento de projetos, centrou-se na pesquisa de obras com temas comuns aos que foram abordados ao longo da dissertação. O tema da discretização e a madeira como material foram os principais fatores tidos em conta para a lista que se segue.

A utilização de modelos computacionais e recurso a modelos de otimização estrutural foram alguns dos temas transversais aos demais projetos.

Através da análise deste Atlas, constata-se que a madeira é um material com excelentes características para ser trabalhada com métodos de fabrico Robótico. Algumas das características que permitem esta afirmação são a existência de diversos materiais com diferentes características construídos a partir da madeira, a facilidade de corte e fresagem destes materiais, a leveza e ainda a grande capacidade de resistência.

Figura 8.1.1. Localização global dos projetos abordados no Atlas que se segue.

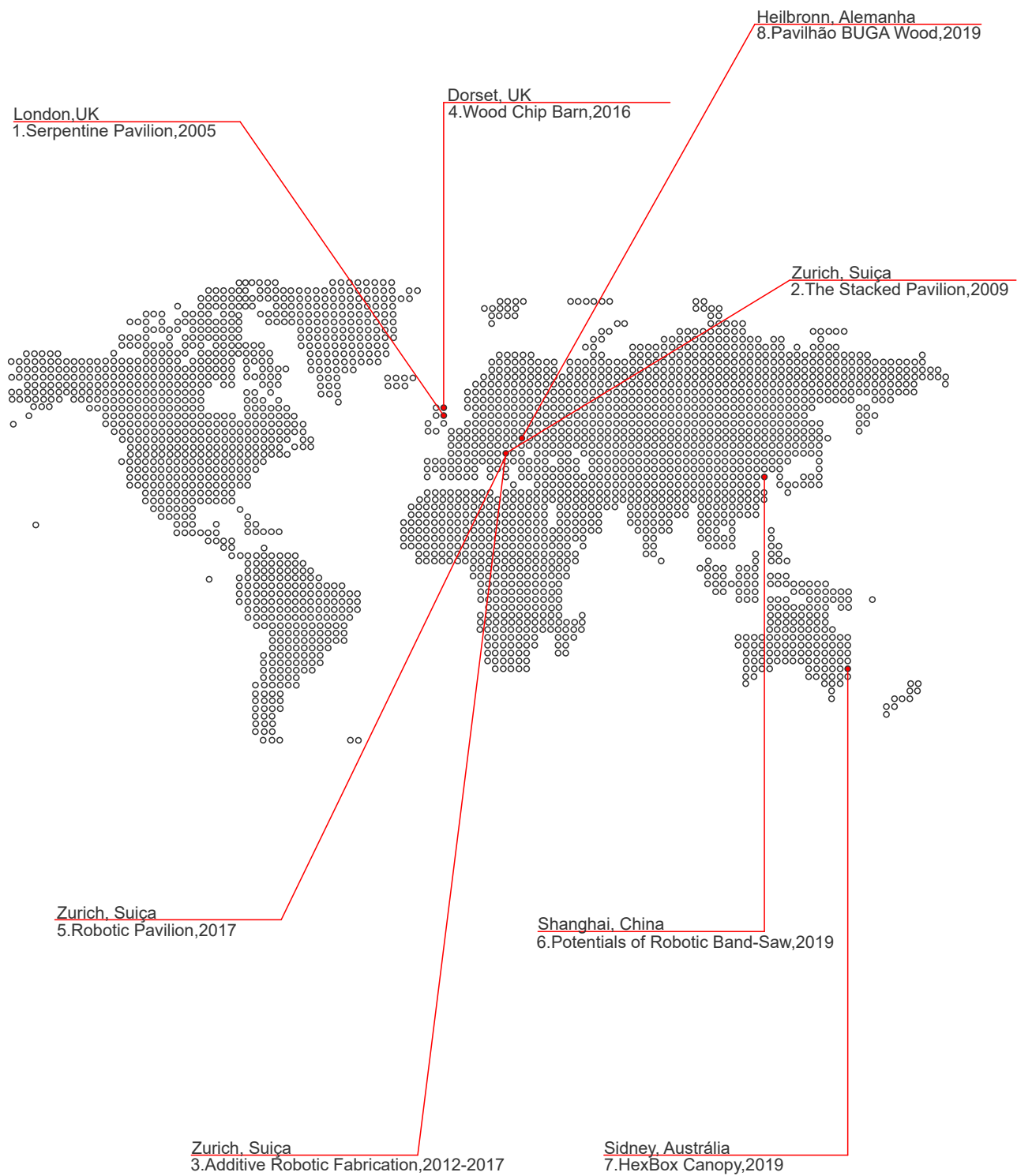
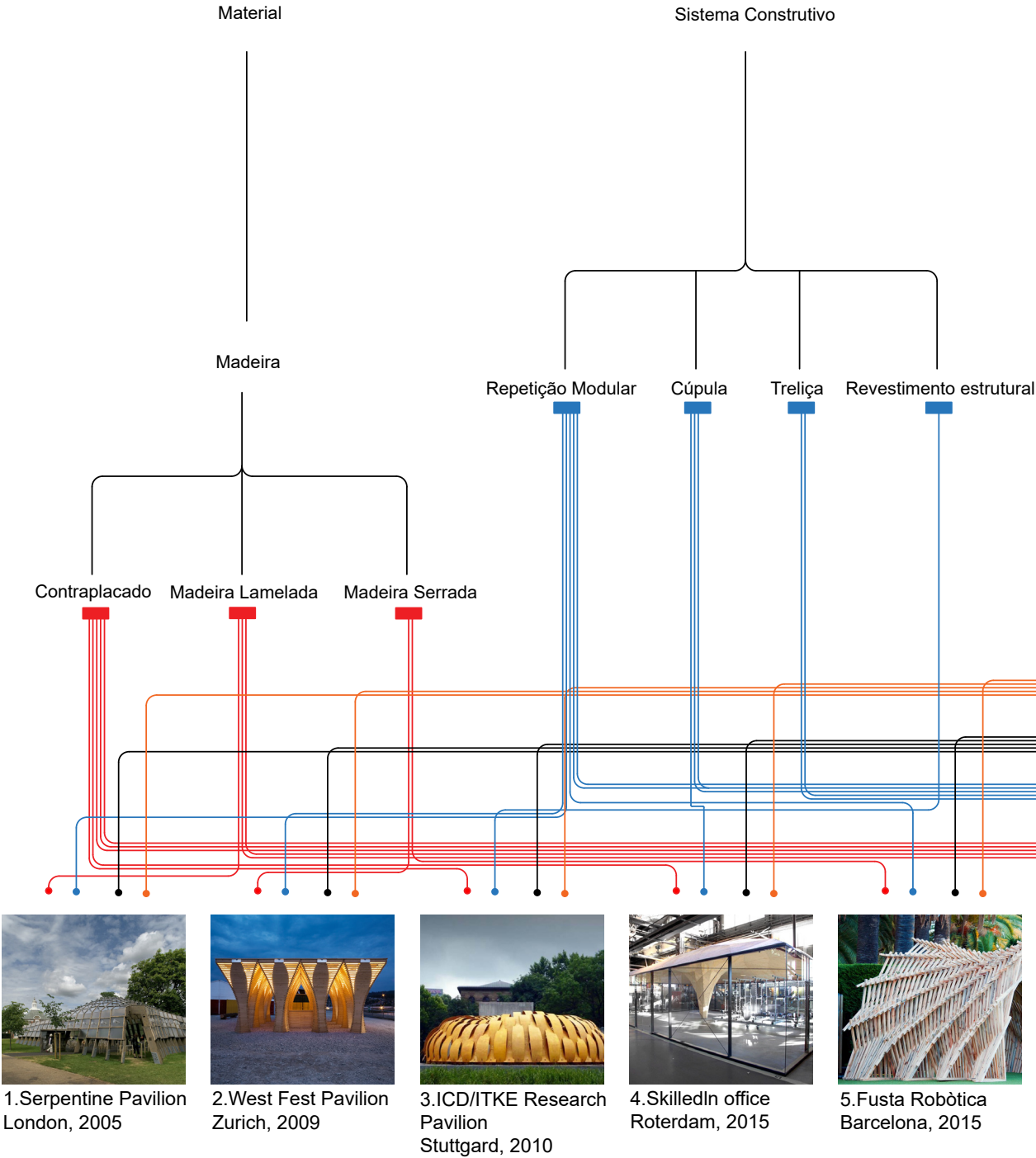
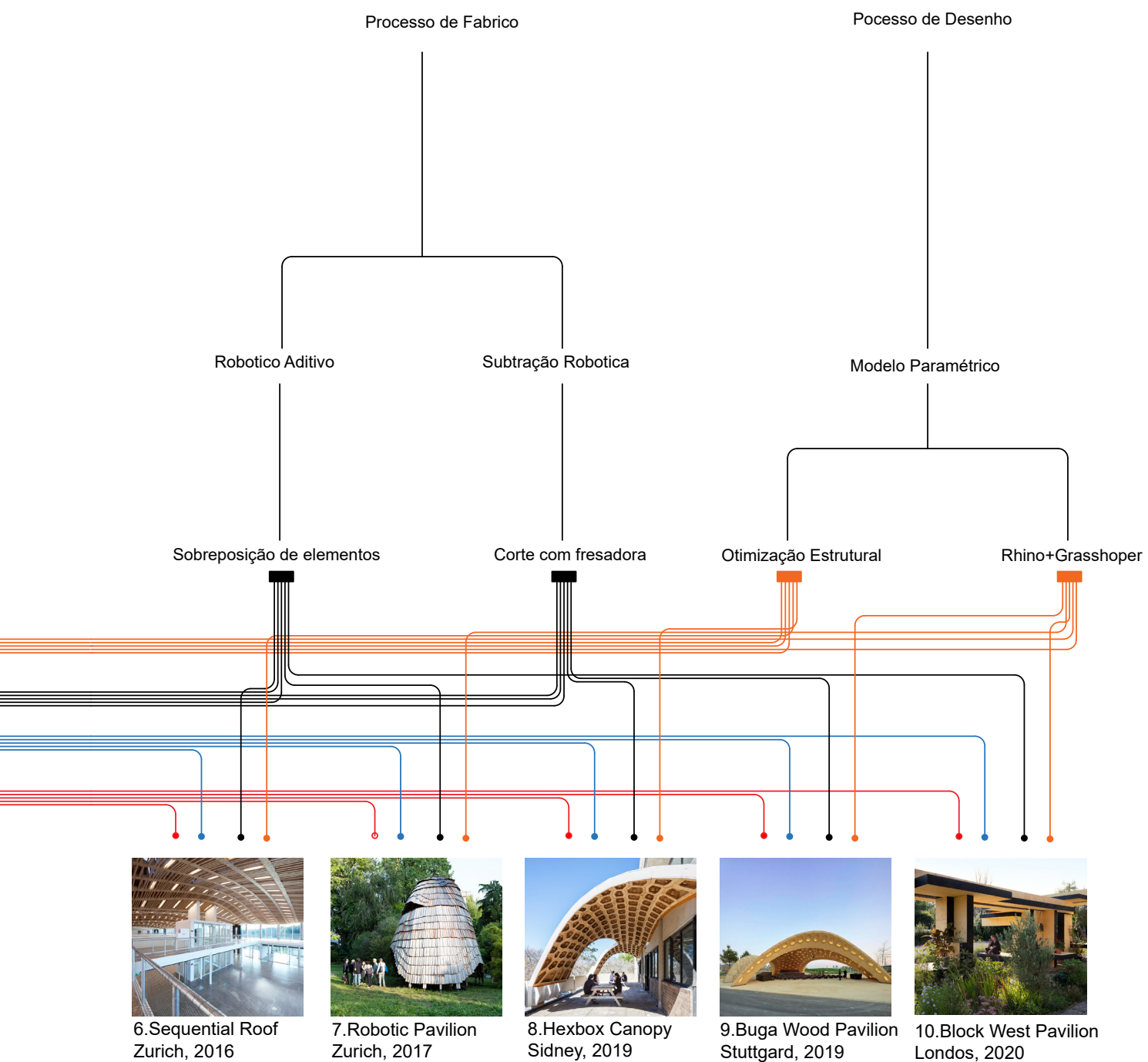


Figura 8.1.2. Caraterização de cada um dos projetos de acordo com o material utilizado, sistema construtivo, método de fabrico e desenho.





1.Serpentine Pavilion,Londres, 2005



Figura 8.1.3. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://divisare.com/projects/288650-alvaro-si-za-vieira-cecil-balmond-eduardo-souto-de-moura-duccio-malagamba-serpentine-pavilion-2005>

Figura 8.1.4. Processo de fresagem de uma das ligações. Fonte: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tradition-and-Innovation-in-Digital-Architecture-Almeida/0761cfd70ff3844bd035eb-469be73c21a3955e84/figure/4>

Figura 8.1.5. Vista do pormenor de encaixe e fixação mecânica com parafusos. Fonte: <https://www.balmondstudio.com/work/serpentine-pavilion-2005.php>



Tipo: Projeto construído

Autores: Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura em colaboração com Cecil Balmond

Título: Serpentine Gallery Pavilion

Ano: 2005

Local: Londres

Material: Madeira lamelada (lvl), com 69 mm de espessura e altura máxima de 500mm

Método de desenho: Desenho paramétrico

Método de Fabrico: Braço Robótico Kuka de 5 eixos equipado com uma fresadora

Objetivos: Não utilizar gruas na sua montagem e desmontagem; Mão de obra de apenas um ou dois homens; Controlo apertado dos custos.

Descrição: Através de métodos de desenho computacional, conseguiu-se integrar o desenho com a estrutura percebendo de imediato as repercussões do desenho nas cargas exercidas sobre os diferentes elementos possibilitando uma resposta mais adequada por parte dos Arquitetos em conjunto com a equipa de Engenheiros. Este projeto foi desenhado em Portugal pela equipa constituída pelo Arquiteto Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura, O projeto de Engenharia desenvolvido em Inglaterra, e o seu fabrico a cargo de uma empresa alemã. Todo o processo foi agilizado pelo uso de softwares computacionais que se regem por regras paramétricas previamente definidas pelos Arquitetos encarregues do design. Recorrendo a este tipo de softwares a equipa minimizou o risco de erros na fase de construção das peças, todas elas diferentes. Permitiu também que a “tradução” do desenho fosse mais facilmente transmitida ao braço Robótico, que se encarregou do corte de todos os entalhes para a sua construção, assim como possibilitou a etiquetagem delas todas, ajudando na montagem e desmontagem da estrutura no final da exposição.

2. West Fest Pavilion, Zurich, 2009



Figura 8.1.6. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <http://blog.fabric.ch/index.php?/archives/612-Gramazio-Kohler-Installation-West-Fest-Zuri-ch.html>

Figura 8.1.7. Processo de sobreposição dos elementos de madeira. Fonte: [http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/165.html/\(23.01022\)](http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/165.html/(23.01022))

Figura 8.1.8. Implementação dos módulos no local final do pavilhão. Fonte: [http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/165.html/\(23.01022\)](http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/165.html/(23.01022))



Tipo: Projeto construído, estrutura temporária

Autores: ETH Zurich, Architecture and Digital Fabrication, Prof. Gramazio, Prof. Kohler

Título: West Fest Pavilion

Ano: 2009

Local: Wettswil am Albis, Zurique, Suíça

Material: Madeira, não especificada

Método de desenho: Desenho computacional

Método de fabrico: Braços robóticos industriais de 5 eixos

Objetivos: Construir um pequeno pavilhão de 8x8 metros com elementos de madeira com comprimento nunca superior a 1m. O objetivo deste pequeno pavilhão era acolher a celebração da inauguração de um novo túnel construído na região.

Descrição: O pavilhão West Fest, foi construído como estrutura temporária para a celebração da inauguração de um túnel. A sua função foi a de abrigar informações sobre a data e um pequeno bar para servir os presentes.

Trata-se de um pavilhão de conceção simples, composto por 16 pilares com 372 elementos de madeira cada um. A principal característica desses pilares está na disposição de cada um dos elementos que os compõem. Os pilares foram desenhados para que façam um movimento de torção ao longo da sua altura. Para isso, cada elemento de madeira vai rodando em relação ao anterior para conferir esse efeito em direção ao topo. Ao mesmo tempo, também o tamanho dos elementos de madeira vai aumentando até chegar ao topo onde o elemento maior terá obrigatoriamente de ter no máximo 1 metro de comprimento. Esses pilares, servem de suporte a uma cobertura construída também ela com elementos de madeira.

Os pilares, foram pré-fabricados com recurso a um Robot. A esse Robot, coube a tarefas de cortar os elementos e posicionados de acordo com o modelo criado para esse efeito.

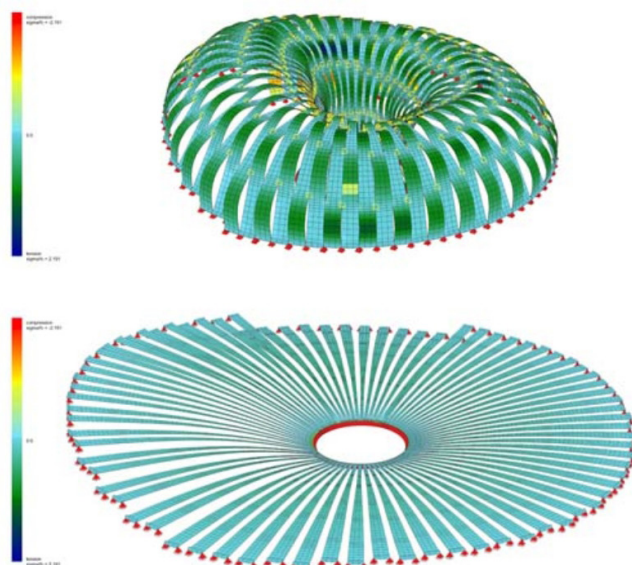
3.ICD/ITKE Research Pavilion, Stuttgart, 2010



Figura 8.1.9. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/icd-itke-research-pavilions/icd-itke-research-pavilion-2010/>

Figura 8.1.10. Processo de fresagem de corte das folhas de contraplacado com um Robot equipado com uma fresa. Fonte: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/icd-itke-research-pavilions/icd-itke-research-pavilion-2010/>

Figura 8.1.11. Modelo computacional de análise da flexão de cada “lâmina” que constitui o pavilhão. Fonte: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/icd-itke-research-pavilions/icd-itke-research-pavilion-2010/>



Tipo: Projeto de investigação académico, construído

Autores: ICD Institute for Computational Design (Stuttgart University-Prof. Achim Menges, ITKE Institute of Building Structures and Structural Design (Stuttgart University) – Prof. Jan Knippers.

Título: ICD/ITKE Research Pavilion 2010

Ano: 2010

Local: Stuttgart, Alemanha

Material: Contraplacado de Bétula de 6.5mm

Método de desenho: Métodos de desenho computacional para desenho e otimização estrutural

Método de Fabrico: Robot KUKA Roboter GmbH com 6 eixos

Objetivos: Este Pavilhão tem como objetivo explorar as características físicas e mecânicas do contraplacado aliadas às suas características formais e estéticas.

Descrição: Em 2010, o Institute for Computational Design (ICD) e o Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) colaboraram para a construção temporária de um pavilhão exploratório.

O objetivo da construção deste pavilhão foi inverter o tradicional pensamento e, que a estrutura vem depois da forma. Aqui, o objetivo foi trabalhar os modelos computacionais a partir das limitações impostas pelo material, neste caso folhas extremamente finas de contraplacado que permitem que este seja dobrado. Os limites para implementação em modelos paramétricos, forma definidos através de um conjunto de testes físicos para averiguar os limites das placas de contraplacado. Assim, os dados foram introduzidos e através de um modelo estrutural foi otimizado o equilíbrio entre a energia armazenada na deformação da placa e a energia resultante do peso próprio do pavilhão sobre cada painel.

Com esta abordagem, a colaboração entre estes dois institutos testou uma nova abordagem onde o desenho arquitetónico resulta não de um desenho inicial esteticamente relevante, mas resulta de um conjunto de testes e de cargas que conferem à estrutura uma estética relevante.

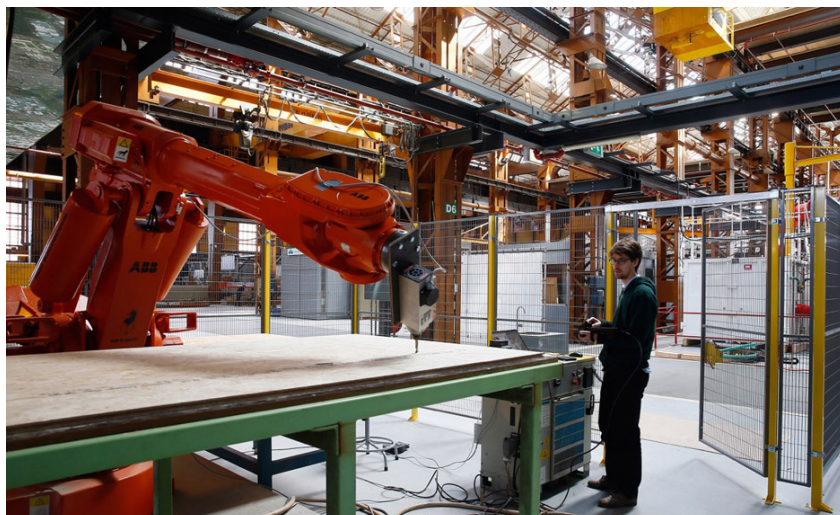
4.SkilledIn office, Rotterdam, 2015



Figura 8.1.12. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://www.dezeen.com/2015/11/20/studio-rap-skilledin-office-first-robotically-fabricated-building-netherlands-innovation-dock-rotterdam/>

Figura 8.1.13 Processo de fresagem de corte das folhas de contraplacado com um Robot equipado com uma fresa. Fonte: <https://www.dezeen.com/2015/11/20/studio-rap-skilledin-office-first-robotically-fabricated-building-netherlands-innovation-dock-rotterdam/>

Figura 8.1.14. Detalhe da montagem e vista em secção da cobertura do pavilhão. Fonte: <https://www.dezeen.com/2015/11/20/studio-rap-skilledin-office-first-robotically-fabricated-building-netherlands-innovation-dock-rotterdam/>



Tipo: Projeto construído

Autores: Studio RAP (Robotics, Architecture, Production)

Título: Skilledin Office

Ano: 2015

Local: Roterdão, Holanda

Material: Contraplacado de 37mm

Método de desenho: Paramétrico através do add-on Rhino Vault

Método de Fabrico: Robótico com recurso a um Robot ABB 6400

Método de Montagem: Manual

Objetivos: O estúdio ARM procurou com este projeto criar o primeiro pavilhão construído com recurso à robótica na Holanda. Procurar estabelecer no projeto os valores do cliente: transparência, conexão e inovação.

Descrição: O estúdio de Arquitetos e Robótica ARM, foram contratados pelo Porto de Roterdão para construir um dos espaços que iriam fazer parte de um centro de treino para pessoal. O local de implantação situa-se dentro de um antigo pavilhão portuário. As dimensões de implantação eram de 13x9m obtendo um pequeno pavilhão de 120m². O conceito começou com a decisão de que todos os paramentos verticais seriam de vidro sem existência de elementos estruturais nas fachadas.

Dessa forma, a cobertura ficou condicionada e tiveram de arranjar uma estratégia de suporte da mesma. Utilizaram para esse efeito o Add-on de *Grasshopper Rhino Vault*, que lhes permitiu desenhar uma estrutura paramétrica onde através das simulações computacionais obtidas pela implementação dos modelos estruturais foi obtida a forma final. A forma final foi uma cobertura em cone invertido onde o pilar central se encarrega de receber todas as forças de compressão da estrutura.

O material escolhido para a elaboração desta cobertura foi o contraplacado por duas razões. A sua leveza aliada à integridade estrutural e ainda a facilidade com que este material aceita as tarefas de fresagem a que foi necessário recorrer para a construção dos 230 módulos triangulares que compõem a cobertura do escritório. Para além de ter sido criada a rotina para maquinação dos elementos triangulares, foi paralelamente criada uma rotina que permitiu a furação de 3200 parafusos de alta performance que permitiu a montagem mais eficiente e rápida de toda a cobertura.

5.Fusta Robòtica , Barcelona, 2015



Figura 8.1.15. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://cargocollective.com/andreaquartara/filter/triangulation/Fusta-Robotica-Pavilion>

Figura 8.1.16. Corte e montagem das peças com um Robot Kuka e uma serra circular. Fonte: <https://cargocollective.com/andreaquartara/filter/triangulation/Fusta-Robotica-Pavilion>

Figura 8.1.17. Pórticos montados pelo braço Robótico. Fonte: <https://cargocollective.com/andreaquartara/filter/triangulation/Fusta-Robotica-Pavilion>



Tipo: Projeto de investigação académico, construído

Autores: IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Faculty: Alexandre Dubor, Silvia Brandi, Areti Markopoulou, Students: Mohamad Mahdi Najafi, Fathimah Sujna Shakir, Nada Shalaby, Monish Siripurapu, Ji Won Jun, Josep Alcover Llubia, Yanna Haddad, Andrea Quartara, Angelo Figliola.

Título: Fusta Robótica

Ano: 2015

Local: Barcelona, Espanha

Material: Madeira serrada

Método de desenho: Paramétrico

Método de Fabrico: Robótico através de um Robot Kuka

Método de Montagem: Robótica e manual

Objetivos: Um dos principais objetivos do desenho e fabrico desta estrutura foi o de criar a primeira estrutura de fabrico robótico em Espanha a partir de madeira proveniente do local demonstrando as potencialidades do uso deste material num protótipo de grande escala.

Descrição: O projeto “Fusta Robótica” foi um projeto realizado ao abrigo do programa “Open Thesis Fabrication 2015”, onde pela primeira vez em Espanha foi construída uma estrutura totalmente em madeira recorrendo à tecnologia Robótica. Devido ao seu processo de fabrico e de montagem, esta pode ser considerada uma estrutura sequencial. Para o seu fabrico foi utilizado um Robot Kuka equipado com um *gripper* com as características necessárias para manusear o material. Paralelamente ao trabalho do Robot, uma serra de corte e um berbequim foram adicionados de modo que as deslocações do Robot pré-programadas para que esse efeitos conduzissem o barrote de madeira para o corte e posterior furação onde mais tarde eram manualmente inseridos os elementos de fixação mecânicos. A análise estrutural do modelo e programação da rotina do Robot foram controlados através de modelos paramétricos. Devido ao processo de fabrico em camadas, este pavilhão pode facilmente ser montado ou desmontado em pórticos, permitindo a reversibilidade da estrutura em fim de vida ou a sua realocação tirando partido da utilização de elementos discretos.

6.Sequential Roof, Zurich, 2016

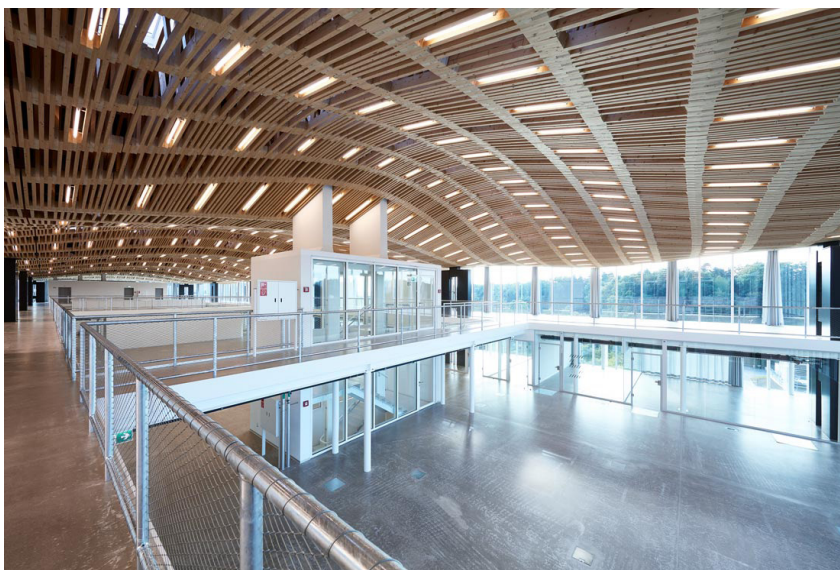
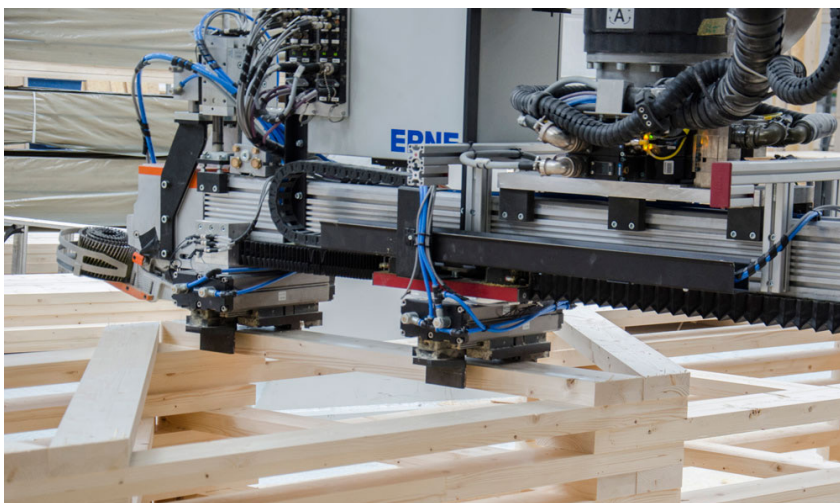


Figura 8.1.18. Vista geral da cobertura construída com os pórticos montados. Fonte: <https://urbannext.net/the-sequential-roof/>

Figura 8.1.19. Pormenor da montagem dos elementos que compõem os pórticos. Fonte: <https://urbannext.net/the-sequential-roof/>

Figura 8.1.20. Fotografia elucidativa do movimento dos pórticos pré-montados em módulos para serem colocados na posição final. Fonte: <https://urbannext.net/the-sequential-roof/>



Tipo: Projeto construído

Autores: ETH Zurich, Architecture and Digital Fabrication, Prof. Gramazio, Prof. Kohler, Arch-Tec-Lab AG and manufactured by ERNE AG Holzbau

Título: Sequential Roof , Arch_Tec_Lab

Ano: 2016

Local: Zurich, Suíça

Material: Madeira Lamelada

Método de desenho: Desenho computacional

Método de Fabrico: Robótico

Método de Montagem: Robótico através de um sistema pórtico fabricado pela ERNE AG Holzbau

Objetivos: Construir a cobertura de 2308 m² do novo Arch_Tec_Lab do Institute of Technology in Architecture (ITA). Demonstrar as potencialidades da madeira como material sustentável, de origem local em combinação com as mais recentes tecnologias digitais.

Descrição: A cobertura do novo Laboratório do Instituto de Tecnologia e Arquitetura, foi o mote para demonstrar as potencialidades da automação na fabricação de grande escala. O desenho da estrutura partiu de uma colaboração entre os alunos de várias disciplinas do ETH (Instituto Federal de Tecnologia de Zurique) e a indústria, demonstrando assim as vantagens da articulação entre a academia e a indústria. A articulação entre as diferentes fases foi potenciada pelo planeamento totalmente digital que permitiu que o processo de desenho, análise estrutural e de geração de informação para o fabrico fosse condensada num só.

A cobertura consiste num conjunto de 168 treliças contruídas com recurso a 48.624 elementos individuais de madeira. As treliças foram primeiro pré-fabricadas em fábrica com recurso a um Robot pórtico equipado com uma ferramenta específica para agarrar o tipo de elemento de madeira que foi utilizado neste projeto. O papel do Robot consistiu na colocação dos elementos de madeira na ordem e posição correta.

7.Robotic Pavilion, Zurich, 2017



Figura 8.1.21. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <https://www.dezeen.com/2017/02/07/eth-zurich-gramazio-kohler-research-lab-pavilion-robotic-construction-wood-shingles-students/>

Figura 8.1.22. Vista interior do Pavilhão . Fonte: <https://www.dezeen.com/2017/02/07/eth-zurich-gramazio-kohler-research-lab-pavilion-robotic-construction-wood-shingles-students/>

Figura 8.1.23. Processo de Montagem com os Robots a sobreporem os elementos de madeira que compõem a estrutura da Pavilhão
Fonte: <https://www.dezeen.com/2017/02/07/eth-zurich-gramazio-kohler-research-lab-pavilion-robotic-construction-wood-shingles-students/>



Tipo: Construído

Autores: Master students of Gramazio Kohler Research lab

Título: Robotic Pavilion, 2017

Ano: 2017

Local: Zurich, Suíça

Material: Madeira de abeto serrada

Método de desenho: Computacional

Método de Fabricação: Robótico, Robot ABB

Método de Montagem: Manual com recurso a uma grua

Objetivos: Conseguir através da otimização da fase de planeamento e construção reduzir os desperdícios de materiais causados pela construção através do uso da Robótica.

Descrição: O foco principal deste projeto foi o de construir o primeiro “edifício” de dois pisos com recurso à Robótica. O objeto foi construído ao longo de 5 semanas, dividido em várias partes construídas num ambiente controlado e depois unidas no local definitivo com recurso a uma grua. Do ponto de vista arquitetónico, o piso inferior é um espaço aberto e amplo. Já o superior é composto por uma série de bancos embutidos a estrutura do pavilhão que é rasgado com grandes aberturas que possibilitam que o mesmo seja utilizado como posto de observação. A estrutura foi deixada à vista pelo interior sendo constituída por elementos que conformam uma espécie de estrutura em treliça. Pelo exterior foi colocado pelos Robots, um revestimento semelhante a umas escamas que forma cortadas de forma a otimizar o uso da madeira reduzindo os desperdícios. Um dos objetivos da equipa de projeto responsável pelo projeto, foi o da capacidade dos Robots utilizados para a montagem dos elementos de madeira da estrutura se adaptarem a peças de diferentes tamanhos pondo de parte a ideia da necessidade do uso de elementos standardizados para um correto workflow.

O objetivo da investigação no qual se enquadra este projeto, é o de desenvolver técnicas e métodos inovadores para serem aplicados em projetos de construção Robótica de maior escala, como por exemplo a construção de habitações.

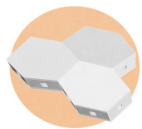
8. HexBox Canopy, Sidney, 2019



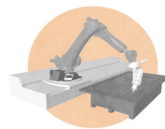
Figura 8.8.24. Vista geral do Pavilhão. Fonte: https://images.adsttc.com/media/images/5e-fd/4587/b357/6540/5400/009b/slideshow/HexBox_6.jpg?1593656682

Figura 8.8.25. Esquema do processo desde o desenho, fabrico, até à montagem final . Fonte: https://images.adsttc.com/media/images/5e-fd/4587/b357/6540/5400/009b/slideshow/HexBox_6.jpg?1593656682

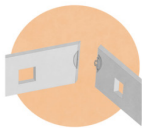
Figura 8.1.26. Exemplo dos encaixes e entalhes criados para a montagem da estrutura. Fonte: <https://www.architektur.uni-kl.de/dtc/2019/08/17/hexbox-canopy-sydney/>



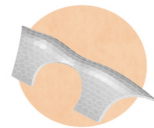
Prefabricated hexagon-shaped boxes made from plywood plates



Robotic fabrication and computational design



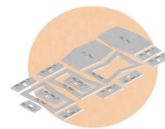
Lamello Tensio connectors for the simple and safe 1K PUR adhesive joining of thousands of miter joints



Freeform tiling through planar hexagonal meshes



Wood-only connectors inspired by handcrafted carpentry and cabinet-making



1531 shapes
201 modules
508 connectors
3.85 m² of plywood



Tipo: Projeto de investigação académico, construído

Autores: Professor Eduardo de Oliveira Barata, Christopher Robeller em colaboração com estudantes da Universidade de Sydney, na Austrália e da Universidade técnica de Kaiserslautern em Raimsten na Alemanha

Título: HexBox Canopy

Ano: 2019

Local: Escola de Arquitetura de Sidney

Material: 103 placas de Contraplacado estrutural

Método de desenho: Paramétrico e computacional

Método de Fabrico: Robot Kuka com 7 eixos, Programado com Kuka Prc

Método de Montagem: Manual

Objetivos: Criar uma cobertura em madeira com o objetivo de sombrear e abrigar da chuva a esplanada da Escola de Arquitetura de Sidney.

Descrição: A ideia deste projeto surgiu de um seminário de uma disciplina chamada “Code to production” que tem como objetivo introduzir aos alunos métodos de desenho e fabrico digital incidindo intensivamente sobre a fabricação Robótica e o desenho computacional.

O projeto parte da premissa da não utilização de qualquer tipo de ligação metálica entre as partes. Para isso o desenho proposto foi a de “caixas” hexagonais, ocas, que vão servir de estrutura e de revestimento através da sua geometria. As ligações entre os elementos que compõem os módulos hexagonais são pequenas “cunhas” de madeira que são introduzidas no entalhe comum aos dois módulos e sujeitas à aplicação de pressão fixando a agregação dos módulos.

O braço Robótico traz para este projeto o benefício da sua elevada precisão. Para que fosse possível construir a cobertura com a geometria proposta a precisão teria de ser maior do que a que qualquer humano conseguiria ter. Aliado a isso também o facto de ser um processo desenhado e controlado por computador desde o início possibilita um maior controlo dos desperdícios e sobras das placas de contraplacado sendo que a fase de projeto e construção estão obrigatoriamente interligadas.

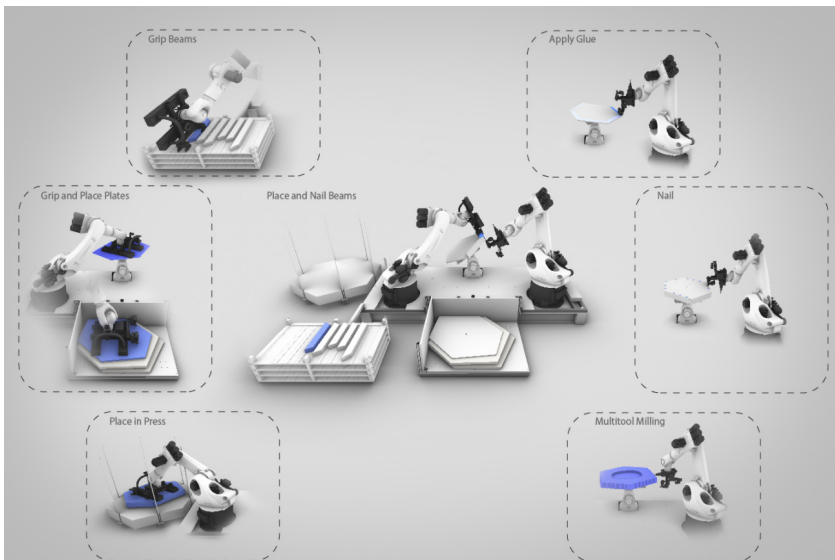
9. Buga Wood Pavilion , Stuttgart, 2019



Figura 8.1.27. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>

Figura 8.1.28. Esquema do processo de fabrico e montagem dos módulos. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>

Figura 8.1.29. Robots a executarem a montagem de um dos módulos através das tarefas de posicionamento e fixação, com recurso a uma pistola de pregos. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>



Tipo: Projeto construído

Autores: (Principais), Prof. Achim Menges, Martin Alvarez, Monika Göbel, Abel Groenewolt, Oliver David Krieg, Ondrej Kyjanek, Hans Jakob Wagner

Título: Buga Wood Pavilion

Ano: 2019

Local: Institute for Computational Design and Construction da Universidade de Stuttgart (ICD)

Material: Contraplacado

Método de desenho: Computacional

Método de Fabrico: Plataforma Robótica de 14 eixos composta por mesas rotativas e dois Robots Kuka de 6 eixos

Método de Montagem: Fabrico e montagem Robótica das partes que formam um módulo; Montagem manual dos módulos no local.

Objetivos: Pré-fabricar um pavilhão de grandes dimensões com um vão superior a 30 metros possível de reutilizar, montar e desmontar.

Descrição: O ICD desenvolveu um pavilhão inovador de construção leve em madeira para a Bundesgartenschau 2019 (exposição nacional de jardinagem da Alemanha), cuja produção só foi possível com a ajuda de dois robots kuka. O pavilhão BUGA Wood foi concebido sob o conceito de Co-Design, onde novas possibilidades em design, engenharia e fabricação são exploradas através do recurso a softwares de desenho computacional que lhes dá um feedback em tempo real das possibilidades e das limitações do desenho. Neste projeto, os algoritmos de Co-Design desenvolvidos pela equipa de projeto (Arquitetos e Engenheiros estruturais) geraram a forma de cada elemento do pavilhão de acordo com a intenção do projeto arquitetónico e os requisitos estruturais, enquanto todos os aspetos de fabricação Robótica foram diretamente incorporados no desenho. O design do pavilhão ocorre simultaneamente e em coordenação com as possibilidades da fabricação Robótica. Este processo, ao ser gerido pelo mesmo software de desenho e mediado por algoritmos computacionais, permitiu a produção de 376 módulos hexagonais com 17.000 encaixes diferentes com uma margem de erro de no máximo 0.03mm.

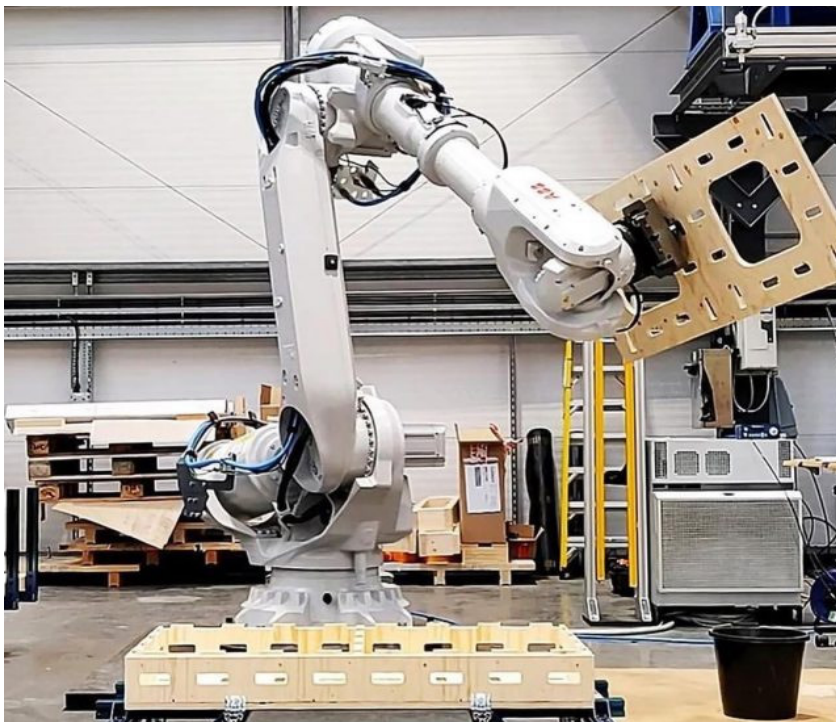
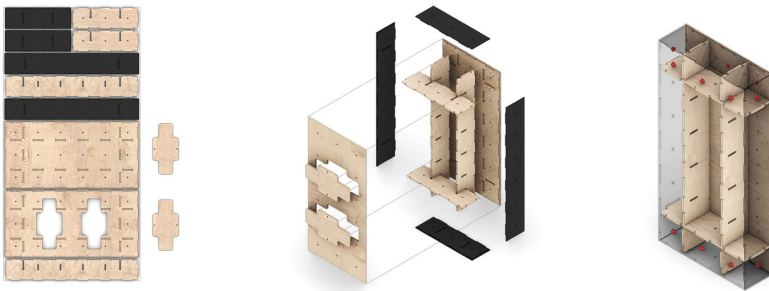
10. Block West Pavilion , Londres, 2020



Figura 8.1.30. Vista geral do Pavilhão. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>

Figura 8.1.31. Esquema do processo de fabrico e montagem dos módulos. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>

Figura 8.1.32. Robots a executarem a montagem de um dos módulos através das tarefas de posicionamento e fixação, com recurso a uma pistola de pregos. Fonte: <http://www.achimmenges.net/?p=20987>



Tipo: Projeto de investigação, construído

Autores: Automated Architecture (AUAR) Labs, Mollie Claypoo, The Bartlett School of Architecture, UCL, organização de artes digitais Knowle West Media Centre (KWMC) e da cientista social Dra Claire McAndrew (The Bartlett School of Architecture)

Título: Pavilhão Block West / Automated Architecture (AUAR) Labs

Ano: 2020

Local: Knowle West, Bristol BS4 1PY, Reino Unido

Material: Contraplacado de 20 mm

Método de desenho: Não especificado, no entanto foi criada uma aplicação que permite o desenho do objeto arquitetónico a partir dos módulos base.

Método de fabrico: CNC e possibilidade futura de utilizar a Robótica para processos de fabrico e montagem.

Método de Montagem: Manual e Robótica

Objetivos: Criar metodologias que permitam que as comunidades locais menos favorecidas possam criar as suas próprias habitações sem precisarem de recorrer a terceiros para a sua edificação utilizando para isso métodos de tecnologia e automação criados para o efeito.

Descrição: O projeto *Block West* é o protótipo de uma habitação construída com uma metodologia semelhante à montagem de legos, a partir de 145 módulos pré-fabricados recorrendo a métodos tecnologicamente avançados como o fabrico com fresadora CNC e à Robótica na sua montagem. O protótipo foi construído com a utilização de módulos com o nome “Block Type A”. Este módulo foi desenvolvido no contexto de um projeto de investigação promovido pela AUAR Labs, uma unidade da Bartlett school of Architecture (UCL). Os módulos, Figura.8.1.32, constituídos por vários elementos discretos que se combinam para formar o módulo, permitem a criação de paredes, lajes e escadas. Ao mesmo tempo, devido à sua geometria tridimensional de forma a criar rigidez, permite que o seu interior oco seja preenchido com material isolante para um melhor desempenho enquanto solução construtiva. A utilização da Robótica permite que exista uma automatização do processo de fabrico e montagem, melhorando a eficiência do processo construtivo, diminuindo custos e diminuindo o tempo de construção de uma nova habitação com este sistema construtivo em relação aos tradicionais sistemas.

Bibliografia:

Almeida, Daniel, sousa, Pedro (2017). Tradition and innovation in Digital Architecture, Reviewing the Serpentine Gallery Pavilion 2005. consultado em 12 de dezembro. disponível em: http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2017_184.pdf

Rock office, West Fest Pavilion, Temporary timber structure. consultado em 21 de novembro de 2021. disponível em: <https://www.rok-office.com/projects/west-fest-pavilion-0084/>

University of Stuttgart, ICD/ITKE Research Pavilion. consultado em 27 de julho. disponível em: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/icd-itke-research-pavilions/icd-itke-research-pavilion-2010/>

StudioRAP. Skilledin Office. consultado em 28 de Dezembro. disponível em: <http://www.studiorap.nl/#/skilledin>

Patrick Keller. Gramazio & Kohler Installation: West Fest, consultado em 16 de Junho de 2021. disponível em: <http://blog.fabric.ch/index.php/?archives/612-Gramazio-Kohler-Installation-West-Fest,-Zurich.html>

laac. Fusta Robotica. consultado em 16 de Setembro de 2021. disponível em: <https://iaac.net/project/fusta-robotica-otf-2015/>

Mairs, Jessica. 2017. ETH Zurich students create robot-built pavilion with a skin of wood. consultado em 6 de janeiro de 2022. disponível em: <https://www.dezeen.com/2017/02/07/eth-zurich-gramazio-kohler-research-lab-pavilion-robotic-construction-wood-shingles-students/>

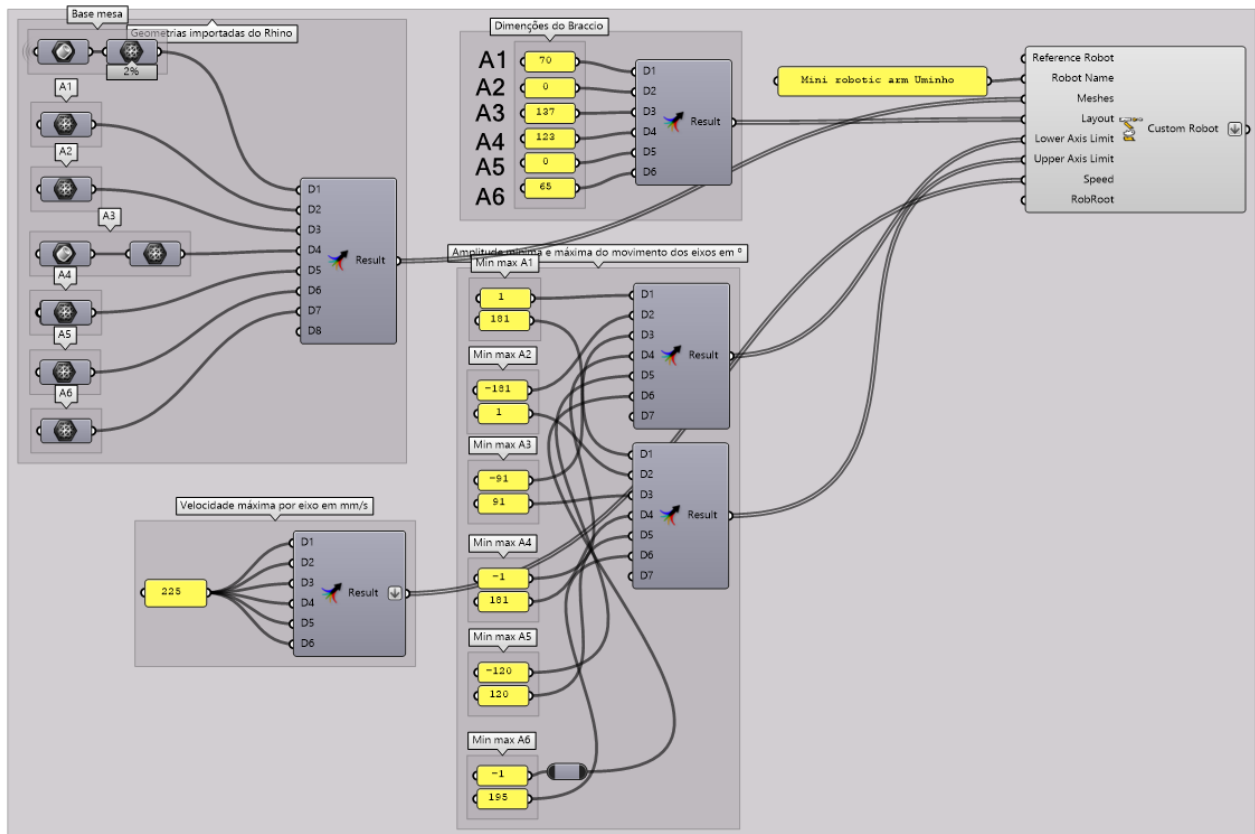
University of Stuttgart, 2019. BUGA Wood Pavilion 2019. consultado em 26 de Junho de 2021. disponível em: <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>

Robotically fabricated Canopy adorns brutalist Sydney architecture school. (2019) consultado em 01 de março de 2021. Disponível em: <https://architectureau.com/articles/robotically-fabricated-canopy-adorns-brutalist-sydney-architecture-school/>

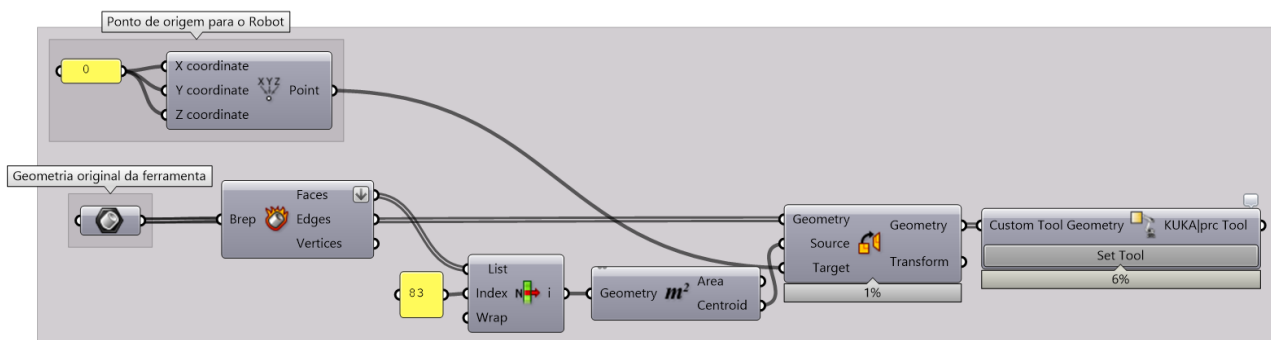
Pavilhão Block West / Automated Architecture (AUAR) 2021. ArchDaily Brasil. consultado em 23 Jan 2022. disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/969657/pavilhao-block-west-automated-architecture-auar-labs>> ISSN 0719-8906

8.2. Outros

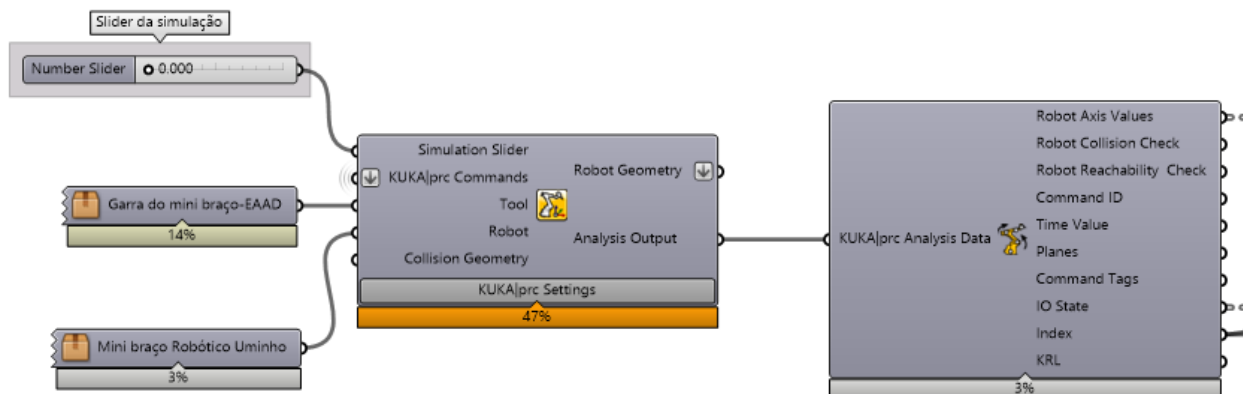
Anexo 1_Código de Grasshopper, criação do Custom Robot para controlo do mini braço Robótico a partir do Kuka Prc.



Anexo 2_Código de Grasshopper, criação da Custom Tool,neste caso a garra.

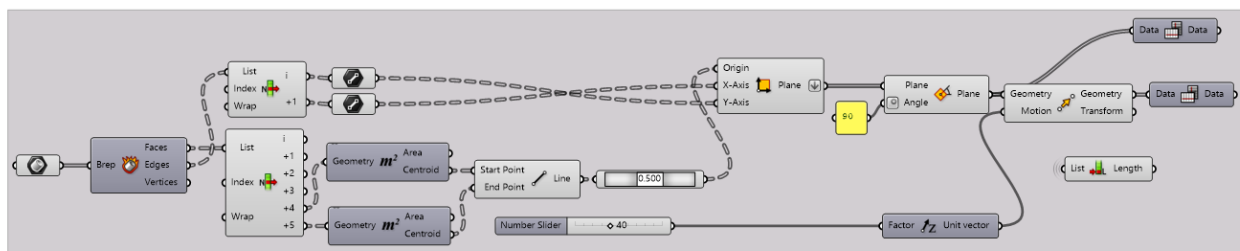
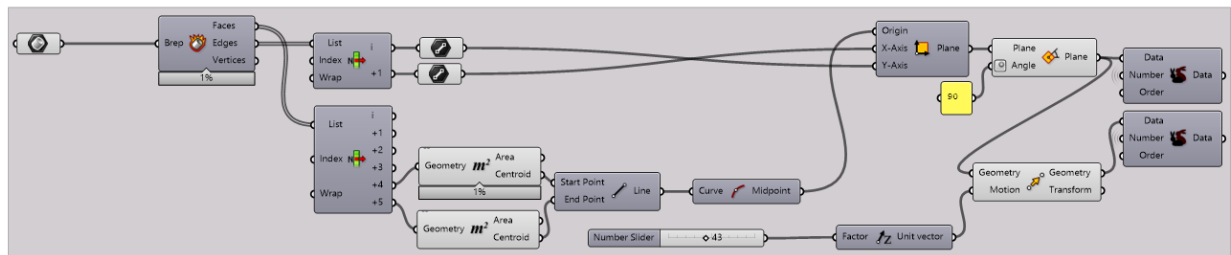


Anexo 3_Código de Grasshopper, Kuka core do Mini Robot.

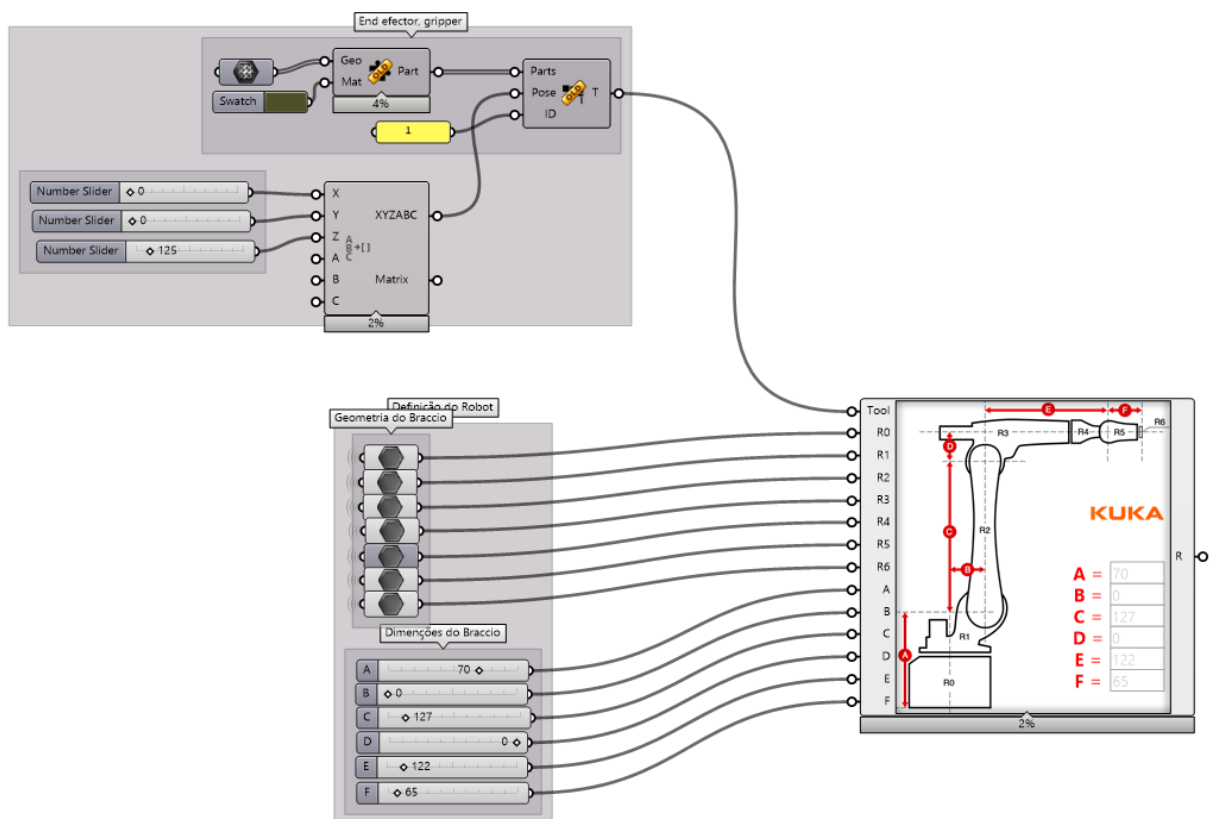




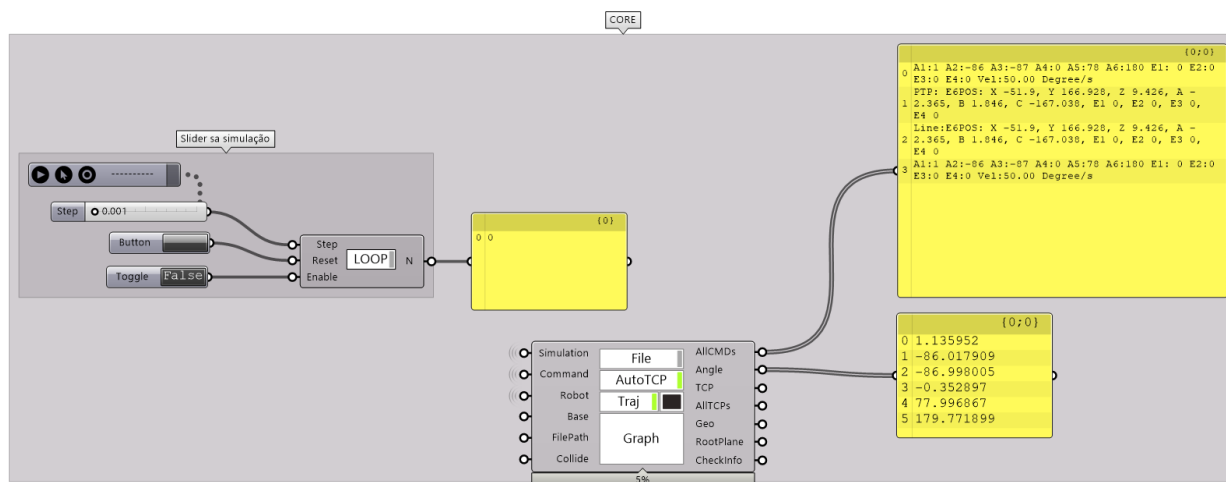
Anexo 6_Código de Grasshopper, desconstrução dos barrotes para criação da rotina Robótica de montagem.



Anexo 7_Código de Grasshopper, exemplo de programação criação e controlo do mini Robot com o addon Furobot.



Anexo 8_Código de Grasshopper, core de controle do mini braço Robótico em Furobot



Anexo_9 Firefly Firmata

```
#include <Servo.h>          // attach Servo library (http://www.arduino.cc/playground/ComponentLib/Servo)
#include <pins_arduino.h>    // attach arduino pins header file to determine which board type is being used

#define BAUDRATE 115200     // Set the Baud Rate to an appropriate speed
#define BUFFSIZE 512        // buffer one command at a time

/*=====
 * GLOBAL VARIABLES
 *=====*/

char buffer[BUFFSIZE];      // declare buffer
uint8_t bufferidx = 0;      // a type of unsigned integer of length 8 bits
char *parseptr;
char buffidx;

int counter = 0;
int numcycles = 1000;

#if defined(__AVR_ATmega328P__) || defined(__AVR_ATmega168__)                // declare variables for STANDARD boards
  Servo Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3}; // declare array of Servo objects
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {13,12,11,10,9,8,6,5,3};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {2,4,7};
#endif

#if defined(__AVR_ATmega32U4__) || defined(__AVR_ATmega16U4__)              // declare variables for LEONARDO board
  Servo Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {Servo13, Servo12, Servo11, Servo10, Servo9, Servo8, Servo6, Servo5, Servo3}; // declare array of Servo objects
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {13,12,11,10,9,8,6,5,3};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {2,4,7};
#endif

#if defined(__AVR_ATmega1280__) || defined(__AVR_ATmega2560__)              // declare variables for MEGA boards
  Servo Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33, Servo34, Servo35,
  Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49, Servo50, Servo51,
  Servo52, Servo53;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33,
  Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49,
  Servo50, Servo51, Servo52, Servo53}; // declare array of Servo objects
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53};
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {22,23,24,25,26,27,28,29,30,31};
#endif
```

```

#if defined(__SAM3X8E__)          // declare variables for DUE boards
  Servo FDAC0, FDAC1, Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13, Servo32, Servo33,
  Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47, Servo48, Servo49,
  Servo50, Servo51, Servo52, Servo53;
  Servo SERVO_CONFIG[] = {FDAC0, FDAC1, Servo2, Servo3, Servo4, Servo5, Servo6, Servo7, Servo8, Servo9, Servo10, Servo11, Servo12, Servo13,
  Servo32, Servo33, Servo34, Servo35, Servo36, Servo37, Servo38, Servo39, Servo40, Servo41, Servo42, Servo43, Servo44, Servo45, Servo46, Servo47,
  Servo48, Servo49, Servo50, Servo51, Servo52, Servo53}; // declare array of Servo objects
  int WRITE_PIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53}; //Note: first two
  values correspond to the DAC pins
  int READ_APIN_CONFIG[] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11};
  int READ_DPIN_CONFIG[] = {22,23,24,25,26,27,28,29,30,31};
#endif

/*=====
* SETUP() This code runs once
*=====*/
void setup()
{
  Init();          //set initial pinmodes
  Serial.begin(BAUDRATE); // Start Serial communication
  #if defined(__SAM3X8E__) //if the connected board is an Arduino DUE
    analogReadResolution(12); //Set the analog read resolution to 12 bits (acceptable values between 1-32 bits). This is only for DUE boards
    analogWriteResolution(12); // Set the analog write resolution to 12 bits (acceptable values between 1-32 bits). This is only for DUE boards
  #endif
}

/*=====
* LOOP() This code loops
*=====*/
void loop()
{
  if(Serial){
    ReadSerial(); // read and parse string from serial port and write to pins
    if (counter >= numcycles){ // Wait every nth loop
      ReadInputs(); // get input data and print data to the serial port
      counter = 0; // reset the counter
    }
    counter ++; // increment the writecounter
  }
}

/*=====
* FUNCTIONS()
*=====*/

/*

```

```

* Initializes the digital pins which will be used as inputs
*/

void Init(){
    int len = sizeof(READ_DPIN_CONFIG)/sizeof(READ_DPIN_CONFIG[0]); //get the size of the array
    for(int i = 0; i < len; i++){
        pinMode(READ_DPIN_CONFIG[i], INPUT);
    }
}

/*
* Reads the incoming ADC or digital values from the corresponding analog and digital input
* pins and prints the value to the serial port as a formatted comma separated string
*/
void ReadInputs(){
    int len = sizeof(READ_APIN_CONFIG)/sizeof(READ_APIN_CONFIG[0]); //get the size of the array
    for(int i = 0; i < len; i++){
        int val = analogRead(READ_APIN_CONFIG[i]); //read value from analog pins
        Serial.print(val); Serial.print(",");
    }

    len = sizeof(READ_DPIN_CONFIG)/sizeof(READ_DPIN_CONFIG[0]); //get the size of the array
    for(int i = 0; i < len; i++){
        int val = digitalRead(READ_DPIN_CONFIG[i]); //read value from digital pins
        Serial.print(val); Serial.print(",");
    }
    Serial.println("eol"); //end of line marker
}

/*
* Retrieve the latest incoming serial value and split the string at the comma delimiter.
* When a comma is found, the value is offloaded to a temporary variable and written
* to the corresponding digital pin.
*/
void ReadSerial(){
    char c; // holds one character from the serial port
    if (Serial.available()) {
        c = Serial.read(); // read one character
        buffer[bufferidx] = c; // add to buffer
        if (c == '\n') {
            buffer[bufferidx+1] = 0; // terminate it
            parseptr = buffer; // offload the buffer into temp variable
            int len = sizeof(WRITE_PIN_CONFIG)/sizeof(WRITE_PIN_CONFIG[0]); //get the size of the array
            for(int i = 0; i < len; i++){
                //parse all incoming values and assign them to the appropriate variable
                int val = parsedecimal(parseptr); // parse the incoming number
                if(i != len - 1) parseptr = strchr(parseptr, ',')+1; // move past the ","
                WriteToPin(WRITE_PIN_CONFIG[i], val, SERVO_CONFIG[i]); //send value out to pin on arduino board
            }
        }
    }
}

```

```

}

bufferidx = 0;          // reset the buffer for the next read
return;                // return so that we don't trigger the index increment below
}                      // didn't get newline, need to read more from the buffer
bufferidx++;           // increment the index for the next character
if (bufferidx == BUFFSIZE-1) bufferidx = 0; // if we get to the end of the buffer reset for safety
}
}

/*
* Send the incoming value to the appropriate pin using pre-defined logic (ie. digital, analog, or servo)
*/

void WriteToPin(int _pin, int _value, Servo _servo){
    if (_value >= 10000 && _value < 20000)    // check if value should be used for Digital Write (HIGH/LOW)
    {
        if (_servo.attached()) _servo.detach();    // detach servo is one is attached to pin
        pinMode(_pin, OUTPUT);
        _value -= 10000;          // subtract 10,000 from the value sent from Grasshopper
        if (_value == 1) digitalWrite(_pin, HIGH);
        else digitalWrite(_pin, LOW);
    }
    else if (_value >= 20000 && _value < 30000)    // check if value should be used for Analog Write (0-255)
    {
        if (_servo.attached()) _servo.detach();    // detach servo is one is attached to pin
        pinMode(_pin, OUTPUT);
        _value -= 20000;          // subtract 20,000 from the value sent from Grasshopper
        analogWrite(_pin, _value);
    }
    else if (_value >= 30000 && _value < 40000)    // check if value should be used for Servo Write (0-180)
    {
        _value -= 30000;          // subtract 30,000 from the value sent from Grasshopper
        if (!_servo.attached()) _servo.attach(_pin);    // attaches a Servo to the PWM pin (180 degree standard servos)
        _servo.write(_value);
    }
    else if (_value >= 40000 && _value < 50000)    // check if value should be used for Analog Write (0-4096) for DACs
    {
        if (_servo.attached()) _servo.detach();    // detach servo is one is attached to pin
        pinMode(_pin, OUTPUT);
        _value -= 40000;          // subtract 40,000 from the value sent from Grasshopper
        WriteToDAC(_pin, _value);
    }
}

/*
* Parse a string value as a decimal
*/

```