



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**FILIPPE MEDÉIA DE CAMPOS**

**Robôs em Arquitetura:**  
**Projeto para Fabricação e Montagem**

**CAMPINAS**

**2023**

**Filipe Média de Campos**

**Robôs em Arquitetura:  
Projeto para Fabricação e Montagem**

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

**Orientadora: Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO FILIPE MÉDIA DE  
CAMPOS E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MARIA  
GABRIELA CAFFARENA CELANI.

ASSINATURA DA ORIENTADORA



---

**CAMPINAS**

**2023**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C914r Campos, Filipe Medéia de, 1989-  
Robôs em arquitetura : projeto para fabricação e montagem / Filipe  
Medéia de Campos. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Maria Gabriela Caffarena Celani.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Robôs. 2. Indústria 4.0. 3. Robotica. 4. Projeto Arquitetônico. I. Celani,  
Maria Gabriela Caffarena, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Robots in architecture : design for manufacturing and assembly

**Palavras-chave em inglês:**

Robots

Industry 4.0

Robotic

Architectural design

**Área de concentração:** Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Titulação:** Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Banca examinadora:**

Maria Gabriela Caffarena Celani [Orientador]

Gonçalo Lencastre Torres de Castro Henriques

Paulo Eduardo Fonseca de Campos

Renata La Rocca

Ana Regina Mizrahy Cuperschmid

**Data de defesa:** 21-11-2023

**Programa de Pós-Graduação:** Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-2675-3687>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/66667204560620376>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**Robôs em Arquitetura:  
Projeto para Fabricação e Montagem**

**Filipe Medéia de Campos**

**Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

**Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani  
Presidente e Orientadora/UNICAMP**

**Prof. Dr. Gonçalo Lencastre Torres de Castro Henriques  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ**

**Prof. Dr. Paulo Eduardo Fonseca de Campos  
Universidade de São Paulo - USP**

**Profa. Dra. Renata La Rocca  
Universidade de São Paulo - USP**

**Profa. Dra. Ana Regina Mizrahy Cuperschmid  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 21 de novembro de 2023

## Dedicatória

Gostaria de dedicar esta pesquisa a todos que exploram o novo. Aqueles que sonham com algo e buscam formas de alcançá-lo. Pois nem sempre o caminho é fácil, e muitas vezes mais longo e tortuoso que o esperado. Mas ao fim dele, se alcança um sonho. Ainda que este mude ao longo do próprio caminho.

## Agradecimentos

À minha orientadora, Gabriela Celani, que me apresentou ao mundo da parametrização e fabricação digital, me orientando desde a graduação.

À minha família, que sempre me apoiou e acreditou em mim. Mesmo não sendo arquitetos, sempre puderam me auxiliar e colocar questionamentos que foram muito importantes.

À minha mulher, pela paciência e incentivo. Para quem tantas vezes expus minhas dúvidas e decisões, me ouvindo falar horas sobre métodos de modelagem paramétrica.

Ao LAPAC e ao Espaço Plasma, pelos pesquisadores e infraestrutura, que permitiram o desenvolvimento da pesquisa.

À FECFAU-UNICAMP e seus professores, pela oportunidade e conhecimentos passados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa concedida, sem a qual eu não poderia ter desenvolvido esta pesquisa, nem as anteriores, me permitindo explorar novos horizontes (processo 2018/07786-3).

Ao CNPq, pela verba proveniente pelo Edital Universal MCTIC/CNPq 28/2018.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

A todos os colegas arquitetos e pesquisadores que conheci nestes últimos anos e, seja por um simples artigo ou uma longa conversa, me transmitiram conhecimentos e me ajudaram a chegar até aqui.

Aos amigos, que, mesmo sem saber exatamente o que eu estava fazendo, também sempre me incentivaram.

## Resumo

Desde a 2ª metade do séc. XX a automação começou a ser introduzida nos processos de produção das mais diversas indústrias. Apesar de algumas áreas terem rapidamente absorvido estes conceitos (como a indústria automobilística), outras tiveram uma absorção mais lenta. Na arquitetura, existem processos de automação que podem ser incorporados nas fases de projeto e fabricação. Já a montagem ainda é feita manualmente, com exemplos de montagem por robôs quase restritos à área acadêmica. A montagem robótica pode permitir a montagem de estruturas com formas complexas que seriam muito difíceis – ou impossíveis - de serem realizadas manualmente. A sua exploração criativa pode abrir portas para novas soluções inovadoras e integradas, sendo necessário explorar e analisar como viabilizar estas aplicações, considerando os robôs, usos e outros fatores. O objetivo desta pesquisa foi analisar como a montagem robótica em arquitetura pode ser viabilizada através de questões projetuais. A pesquisa foi realizada por meio da metodologia Research by Design, com desenvolvimento exploratório e experimental, através de experimentos em escala com tecnologias robóticas, mais especificamente braço robótico e cablebot. Estes foram aplicados em estudos de montagem de estruturas com encaixes em madeira, considerando os princípios do Projeto Para Fabricação e Montagem (DFMA) e a precisão dos processos. Tem-se como resultado principal a análise de como soluções projetuais podem viabilizar a montagem robótica, sendo o fluxo de trabalho resultante descrito na forma de um método de aplicação de robôs em arquitetura. São resultados secundários também (1) a identificação das principais lacunas e tendências das pesquisas na área de robôs em arquitetura, (2) o desenvolvimento de um cablebot, (3) o desenvolvimento de uma metodologia para adaptação de encaixes e (4) a identificação das principais barreiras para o desenvolvimento do uso de robôs em arquitetura.

## Abstract

Since the 2<sup>nd</sup> half of the XX century, automation was introduced in the production processes of the most diverse industries. Although some areas quickly absorbed these concepts (such as the automobile industry), others had a slower absorption. In architecture, some automation processes can already be incorporated in the design and manufacturing phases. The assembly, however, is still done manually, with examples of assembly by robots restricted to the academic area. The robotic assembly can enable the assembly of complex-shaped structures that would be very difficult – if not impossible – to be done manually. Its creative exploration can unlock new possibilities to innovation and integrated solutions, and it is necessary to explore and analyze how to make these applications viable, considering the robots, its uses, and other factors. The objective of this research was to analyze how to enable robotic assembly in architecture through design. The research was carried out using the Research by Design methodology, with exploratory and experimental development, through scaled experiments with robotic technologies, more specifically robotic arm and cablebot. These were applied in assembly studies of structures with wooden joints, considering the principles of Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) and the processes precision. The main result is the analysis of how design solutions can enable robotic assembly, with the resulting workflow described in the form of a method for applying robots in architecture. Secondary results are also (1) the identification of the main gaps and trends in research in the area of robots in architecture, (2) the development of a cablebot, (3) the development of a methodology for adapting joints and (4) the identification of the main barriers to development the use of robots in architecture.

## Sumário

Dedicatória .....	5
Agradecimentos .....	6
Resumo .....	7
Abstract .....	8
1. Introdução .....	11
1.1. Objetivos .....	15
1.2. Estrutura da tese .....	16
1.3. Materiais e Métodos .....	17
1.3.1. Procedimentos metodológicos .....	17
2. Estado da arte .....	22
2.1. Dos primeiros autômatos aos robôs em arquitetura .....	22
2.1.1. História dos robôs .....	23
2.1.2. Definições .....	39
2.1.3. Classificação de Robôs .....	44
2.1.4. Robôs em arquitetura .....	56
2.1.5. Estudo bibliométrico da literatura .....	66
2.1.6. Nichos e lacunas em pesquisa .....	93
2.2. Visitas Técnicas .....	98
3. Experimentação: Provas de conceito .....	104
3.1. Robôs utilizados – Desenvolvimento e integração .....	107
3.1.1. Cablebot .....	108
3.1.2. Braço robótico MyCobot Pi .....	129
3.2. Testes iniciais de montagem .....	138
3.3. Aplicação na Montagem de Estruturas .....	142
3.3.1. Encaixes como solução para montagem robótica .....	142

3.3.2. Desenvolvimento e Experimentos de Montagem.....	154
3.4. Modelagem paramétrica dos elementos .....	172
3.4.1. Encaixe por pinos em blocos .....	172
3.4.2. Encaixe rabo-de-andorinha em elementos lineares.....	175
3.4.3. Encaixe rabo-de-andorinha em painéis .....	177
4. Discussão dos resultados e conclusões .....	184
4.1. Discussão dos resultados .....	186
4.2. Conclusões .....	192
Bibliografia.....	200
Apêndice I – Visitas Técnicas.....	213
Apêndice II – Sombreamento e Iluminação de Precisão .....	221
Apêndice III – Relação de artigos das bases do estudo bibliométrico.....	244

## 1. Introdução

Na segunda metade do século XIX iniciou-se a segunda revolução industrial, na qual as fábricas começaram a apresentar progressos que reduziam os custos e tempo de produção, como a divisão do trabalho e especificação, padronização da produção e emprego de mão de obra não qualificada, tendo como princípios a organização do trabalho e a descentralização da produção (BERG, 1985). Estes conceitos e métodos permitiram a fabricação em massa e a padronização e, conseqüentemente, a redução de custos, tornando os produtos mais acessíveis. Nas décadas seguintes, estes métodos de produção se intensificaram, sendo absorvidos pelas mais diversas áreas, principalmente com a adoção do fordismo por diversas empresas (WOOD, 1992; RIBEIRO, 2015). Na primeira metade do século XX, Le Corbusier apontava que os engenheiros e a indústria de diversos setores já buscavam utilizar ao máximo a tecnologia presente, tirando vantagem de seu potencial. Também indica que este mesmo avanço deveria ser usado pelos arquitetos em relação à habitação (CORBUSIER, 1931), reduzindo seus custos e tornando-as mais acessíveis.

Pouco depois, na segunda metade do século XX, tem-se o início da terceira revolução industrial, marcada pela automação e robotização do processo de produção, na qual as indústrias automobilística, naval e aeronáutica foram as primeiras a implementar estas tecnologias (REINHARDT et al, 2016). Se na segunda revolução industrial aplicava-se o conceito de produção em massa, como forma de baratear a produção, na terceira revolução industrial foi introduzido o conceito de customização em massa (BUNNELL, 2004). Viabilizado pelas novas formas de produção (automação e robotização), este conceito logo foi adotado por empresas de diversos setores, inclusive em função da demanda, como a Nike (BUNNELL, 2004), a qual permite a customização de seus tênis pela seleção de cores, tecidos, cadarço etc.

Alguns setores rapidamente adotaram estes conceitos e formas de produção, enquanto outros tiveram uma absorção mais lenta destes. No ramo da arquitetura, podemos considerar o uso de automação em, pelo menos, três principais fases: projeto, produção e montagem, sendo que cada uma destas fases absorveu a automação em diferentes velocidades. Existem ainda as fases de uso e desmonte, as quais não são, normalmente, tratadas diretamente pela arquitetura

Na fase de projeto, desde os anos 1960, iniciou-se a introdução das ferramentas CAD (Computer Aided Design). Apesar de seus primeiros usos estarem ligados à exploração criativa de formas complexas, sua disseminação se deu, principalmente, pela automação do processo de desenho manual. Com a introdução das ferramentas CAD, tornou-se possível desenhar, modificar e copiar o desenho com maior rapidez e precisão. Em um segundo momento, as ferramentas CAD passaram a ser amplamente utilizadas para gerar modelos 3D e, a partir deles, renderings e imagens que ajudavam na visualização dos projetos. Posteriormente, com os avanços digitais, disseminou-se também o uso de ferramentas paramétricas, que se baseiam em relações topológicas e parâmetros variáveis (BURRY; BURRY, 2010), inicialmente utilizadas por escritórios como SOM, Zaha Hadid, Foster+Partners, Arup e outros.

Outras ferramentas diversas foram introduzidas, indo além do desenho 2D, modelos 3D e ferramentas paramétricas, como simulações computacionais, algoritmos, BIM (Building Information Modelling), realidade virtual, realidade aumentada etc, cada uma destas buscando responder a problemas encontrados no processo de projeto em arquitetura. É importante salientar que o uso destas ferramentas e princípios de automação não reduz a função do arquiteto enquanto projetista e criador, mas apenas automatiza os processos repetitivos, abrindo espaço para maior expressão da criatividade, com foco na resolução dos problemas de projeto.

Se, por um lado, o uso de novas tecnologias conceitos e métodos foi bem disseminado na fase de projeto, permitindo, inclusive explorar formas e geometrias que antes eram difíceis ou inviáveis de serem geradas (KOLAREVIC, 2005), nas demais fases, pesquisas vêm sendo realizadas para a implementação destas técnicas de automação. Na fase de fabricação é utilizado o conceito de fabricação digital, baseado no sistema file-to-factory, com o uso de máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado)<sup>1</sup>, onde o modelo é enviado diretamente do computador para uma máquina que produz a peça de modo automatizado (CANEPARO, 2014). Este processo pode ser utilizado desde a produção de componentes construtivos até a construção de um edifício inteiro, como ocorre na impressão 3D de concreto de grande porte.

---

<sup>1</sup> Apesar do termo CNC ser utilizado, principalmente, para tornos, fresadoras e centros de usinagem, este pode ser utilizado para qualquer sistema que permite o controle de uma máquina de forma computadorizada, englobando corte a laser, impressão 3D etc.

A última fase da sequência, a automação da montagem<sup>2</sup>, é a que ainda se encontra em menor estágio de desenvolvimento, apenas com usos experimentais (JAN et al, 2015), exceto por alguns poucos exemplos na indústria. Mesmo para peças fabricadas digitalmente, a montagem em arquitetura ainda é, fundamentalmente, manual, quer seja com mão de obra especializada ou não, ou quer seja com o auxílio de outras máquinas, como guias, porém não há uma automação dos processos.

O desenvolvimento dos robôs após o início da 4ª Revolução Industrial, principalmente no que diz respeito à inserção de sensores, ao uso de Big Data e uso de visão robótica, tem permitido maior flexibilidade e uso colaborativo com pessoas. Estes dispositivos de segurança retiram antigas restrições com o uso de robôs, como áreas de segurança e a necessidade de “gaiolas”. Se a 3ª Revolução Industrial teve como foco a automação, a 4ª Revolução Industrial se baseia em sistemas de colaboração ciber-físicos, por meio do uso de sensores, Big Data, IOT e outros.

De modo geral, os robôs apresentam dois principais usos: aumento de produtividade (com substituição de mão de obra) e exploração criativa. Inegavelmente o uso de robôs tem o potencial de redução de custos e tempo de produção e execução, sendo inclusive uma opção futura para a construção de moradias de baixo custo. Os robôs podem trabalhar quase ininterruptamente, em condições adversas, e poderiam ser usados para a construção de obras de emergência ou obras em locais de difícil acesso. Existem até mesmo projetos que vislumbram seu uso para a construção de obras em possíveis colonizações de outros planetas, como Marte.

Ao mesmo tempo, os robôs são ferramentas capazes de produzir e montar formas de extrema complexidade e precisão, permitindo explorar formas e geometrias que não seriam possíveis – ou muito difíceis de se obter - com a fabricação e montagem manuais. Além disso, a exploração criativa dos robôs e seu potencial podem permitir o desenvolvimento de soluções inovadoras e integradas.

Tendo em vista esse panorama, esta pesquisa teve como objetivo analisar como a montagem robótica em arquitetura pode ser viabilizada considerando questões

---

<sup>2</sup> Existem debates a respeito da classificação de certas etapas e processos como sendo “fabricação” ou “montagem”. Neste trabalho, considera-se que processos que levem à modificação da forma dos elementos, como ocorre na impressão 3D, fresamento e corte a laser, como fabricação. Já processos que usam objetos ou peças prontas para gerar, em seu agrupamento, uma forma específica, como montagem.

projetuais, por meio de experimentos de montagem em escala com uso de braço robótico e cablebot<sup>3</sup>. Seguindo a metodologia de *Research By Design*, foram usados os princípios do Projeto Para Fabricação e Montagem (DFMA), em uma solução integrada com robôs (BOOTHROYD et al, 2011). Foram utilizados encaixes adaptados nos elementos, buscando viabilizar a montagem robótica, em quesitos relacionados à tolerância e precisão durante os processos de montagem com os robôs.

Pelo foco da pesquisa, foram consideradas aplicações referentes à exploração criativa, ou seja, aplicações arquitetônicas de robôs, como na criação de formas complexas<sup>4</sup>. As aplicações relacionadas à simples substituição de práticas tradicionais, substituição de mão de obra manual e aplicações com foco em produtividade não serão incluídas neste estudo, por serem consideradas como aplicações da área da construção civil. Realizou-se desde uma revisão da definição e classificação de robôs, tipos e usos de robôs em arquitetura até o desenvolvimento de um robô, integração com modelo virtual e experimentos de montagem em escala.

---

<sup>3</sup> Cablebot é um tipo de robô que utiliza cabos para movimentar o atuador, seu funcionamento e tipos estão descritos no capítulo “3.1.1. Cablebot”

<sup>4</sup> Em geometria, uma forma ou superfície é classificada como complexa quando não pode ser contida por um plano euclidiano (*complex manifold*), sendo descrita no espaço através de funções matemáticas. Entre as formas complexas, podemos citar a esfera, toros, superfícies regradas e outras.

## 1.1. Objetivos

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar como a montagem robótica em arquitetura pode ser viabilizada através de questões projetuais, com base em parâmetros como (1) robô utilizado, (2) método de montagem, (3) tipo de fixação/encaixe, (4) projeto dos encaixes e (5) geometria final. Os objetivos específicos da pesquisa foram:

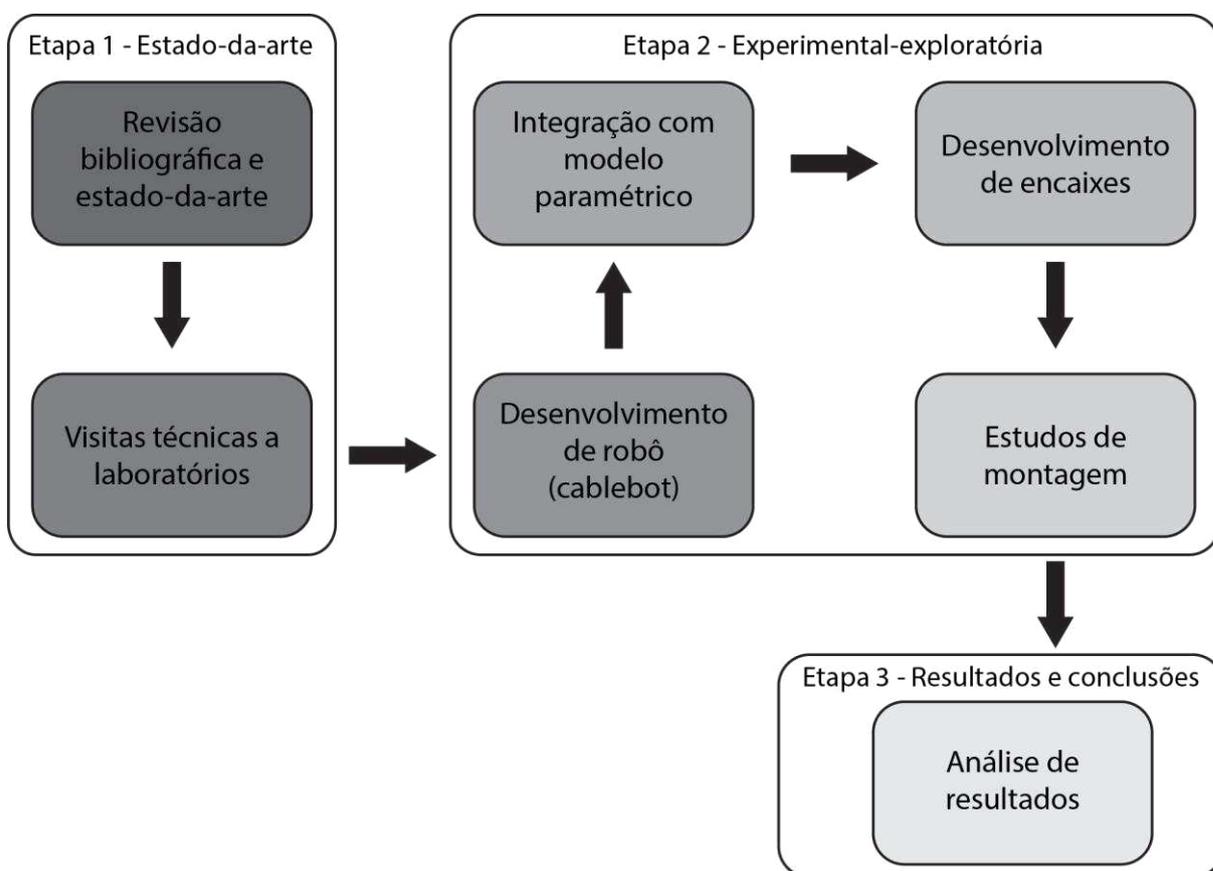
- Realizar uma revisão do estado da arte das aplicações de robôs em arquitetura;
- Desenvolver experimentos práticos de montagem robótica em escala, utilizando encaixes em madeira;
- Realizar uma análise das principais oportunidades e desafios para o uso da montagem robótica em arquitetura no Brasil.

Para isso, se explorou o uso de dois tipos de robôs para experimentos de montagem em escala reduzida de elementos do edifício (building parts). Os experimentos em escala reduzida permitiram identificar potenciais problemas e limitações dos processos, bem como possíveis soluções, que podem ser aplicadas em pesquisas futuras a experimentos em escala real.

Como já citado, os processos de montagem robótica buscam automatizar processos e podem ser usados visando a substituição de mão de obra e aumento de produtividade (como ocorre na construção civil) ou visando a exploração criativa (como ocorre no campo da arquitetura). Esta pesquisa trata da montagem robótica com foco na exploração criativa e as possibilidades criadas pelas soluções integradas entre projeto, fabricação digital e montagem robótica.

## 1.2. Estrutura da tese

A pesquisa foi desenvolvida em sete fases (Figura 1): (1) revisão bibliográfica e estado da arte, (2) visitas técnicas a laboratórios, (3) desenvolvimento de robô, (4) integração com modelo paramétrico, (5) desenvolvimento de encaixes em madeira visando montagem robótica, (6) estudos de montagem com os robôs selecionados e (7) análise dos resultados. Estas foram agrupadas em três etapas da pesquisa: estado da arte (fases 1 e 2), experimental-exploratória (fases 3 a 6) e análise de resultados e conclusões (fase 7).



**Figura 1: Fases da pesquisa separadas por etapas**

Fonte: do autor

O capítulo 2 “Estado da arte” corresponde à Etapa 1, sendo dividido nos subcapítulos “2.1. Dos primeiros autômatos aos robôs em arquitetura” (fase 1: revisão) e “2.2. Visitas técnicas” (fase 2: visitas técnicas). O capítulo 3 “Experimentações: Provas de

conceito” corresponde à Etapa 2. O subcapítulo “3.1. Robôs utilizados” apresenta as fases 3 e 4, apresentando o desenvolvimento e integração pertinente a cada robô utilizado na pesquisa. Os subcapítulos 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam de modo integrado as fases 5 e 6, tendo em vista que estas foram realizadas de modo simultâneo. Por fim, o capítulo 4 “Discussão dos resultados e conclusões” corresponde à Etapa 3 (que contém a fase 7).

### 1.3. Materiais e Métodos

A pesquisa é do tipo experimental e exploratória (GROAT; WANG, 2013), pelo foco em novos métodos de montagem e sua integração com os processos de projeto e fabricação. Por basear-se em experimentações práticas, buscando desenvolver provas-de-conceito como parte da pesquisa, a pesquisa se insere na metodologia de *Research By Design*, no qual o conhecimento é produzido através das ferramentas e processos de projeto do arquiteto relacionados aos novos métodos de projeto e produção (HAUBERG, 2011).

#### 1.3.1. Procedimentos metodológicos

Como apontado, a pesquisa foi desenvolvida em sete fases: (1) revisão bibliográfica e estado da arte, (2) visitas técnicas a laboratórios, (3) desenvolvimento de robô, (4) integração com modelo paramétrico, (5) desenvolvimento de encaixes em madeira visando montagem robótica, (6) estudos de montagem com os robôs selecionados e (7) análise dos resultados.

Na revisão bibliográfica e estado da arte (primeira fase), buscou-se identificar as tendências e lacunas de pesquisa através da comparação entre a definição e classificação de robôs com os resultados da revisão quantitativa de artigos. Deste modo, dividiu-se a revisão em duas partes. A primeira levantou as definições, conceitos e classificação dos robôs de autores, órgãos legisladores, representantes

da indústria e outras fontes relevantes. A segunda analisou artigos de modo quantitativo, levantando suas aplicações, usos e outras características relevantes.

Para a análise quantitativa, a base de dados utilizada compõe-se por: (1) artigos do Cumulative Index of Computer Aided Design (CumInCAD), (2) anais da conferência Robotic Fabrication In Architecture, Art and Design (Rob|Arch), (3), anais da conferência FABRICATE, (4) artigos da revista Construction Robotics e (5) a edição especial Made By Robots da revista Architectural Design. Esta base de dados tem um foco na aplicação arquitetônica e exploração criativa, como é o foco da pesquisa. É importante pontuar que a revista “Construction Robotics”, apesar de seu nome, deriva da Associação de Robôs em Arquitetura e tem como foco a exploração criativa de robôs. A fundadora da Associação, Sigrid Brell-Cockan, também direciona sua pesquisa para a exploração criativa, ao invés de questões de produtividade e substituição de mão de obra.

Durante a revisão, foi também realizado um levantamento de história geral dos usos de robôs e usos em arquitetura, tanto na pesquisa quanto em usos comerciais.

Com o objetivo de compreender melhor as linhas de pesquisa na área, identificar pontos em comum e particularidades destas pesquisas, foram também realizadas visitas técnicas a centros de pesquisa internacionais que desenvolvem pesquisa na área de robôs aplicados à arquitetura. Foram visitados os seguintes laboratórios: (1) Digital Fabrication – Mobile Additive Manufacturing e (2) Building Realization and Robotics (ambos pertencentes à Universidade Técnica de Munique – TUM), (3) Instituto de Design Computacional e Construção (ICD) da Universidade de Stuttgart e (4) Gramazio Kohler Research do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHz).

As visitas aos laboratórios permitiram conhecer o funcionamento dos grupos de pesquisa, as pesquisas em desenvolvimento, os equipamentos disponíveis e outras questões intrínsecas às pesquisas sobre o uso de robôs em arquitetura. Foram notadas também questões referentes à implementação comercial e industrial de robôs em arquitetura para casas ou edifícios de grande porte.

Na etapa experimental-exploratória da pesquisa, foram utilizados dois robôs: braço robótico educacional e cablebot. O braço robótico utilizado (MyCobot Pi, da Elephant Robotics) simula os movimentos e características de braços robóticos industriais. Já

o cablebot foi concebido e desenvolvido pelo autor. A terceira fase da pesquisa teve como foco o desenvolvimento do cablebot, com base no princípio de spidercams e outros robôs que utilizam cabos para movimentar a garra ou atuador.

Para o desenvolvimento do cablebot, utilizou-se uma variação de programas e firmware utilizados em impressoras 3D. Foi utilizado o firmware Marlin, sendo modificado para receber as coordenadas de modo absoluto e sincronizado com as características do cablebot. Utilizou-se o programa Repetier-Host para controlá-lo, que também é um programa utilizado em impressora 3D, visando a leitura de um GCode. As peças para o cablebot foram produzidas com uso da impressora 3D FDM Felix e cortadora a laser Combat. Foi necessário também projetar e fabricar uma garra personalizada para o braço robótico, utilizando-se os programas Rhinoceros e impressora 3D de resina Creality LD-006.

Na quarta fase foi realizada a integração entre o modelo paramétrico, método de montagem e os robôs utilizados. Em ambos os casos, foram extraídas dos modelos virtuais (gerados com o programa Rhinoceros 3D e seu plugin Grasshopper) as coordenadas e rotações de colocação das peças. Para o braço robótico, as coordenadas e rotações de projeto foram convertidas em ângulos absolutos (tendo como foco os eixos do robô) e enviadas por um arquivo CSV. Este por sua vez era inserido no braço robótico através do programa nativo Blockly, capaz de movimentar o braço de acordo com aquelas coordenadas. Para o cablebot, foi implementado um programa no Grasshopper, que converte as coordenadas e rotações de projeto em coordenadas relativas, exportando um GCode personalizado. Este então pode ser lido pelo Repetier-Host, permitindo controlar o cablebot.

O desenvolvimento e adaptação dos encaixes em madeira para fabricação digital e montagem robótica (quinta fase), ocorreu muitas vezes de modo simultâneo à sexta fase – visando produzir e testar os designs dos encaixes e sua utilização. Neste processo, foi utilizado o método de projeto para a fabricação e montagem (DFMA), que se baseia em integrar as questões de fabricação e montagem desde o processo de projeto (BOOTHROYD et al, 2011). Potencialmente, este método pode reduzir o número de elementos, tempo de montagem e possibilidade de erros (BOOTHROYD et al, 2011), sendo apropriado para o uso em casos que necessitem de alta precisão, como é o caso dos estudos desta pesquisa.

No contexto do projeto para fabricação e montagem, o detalhamento das conexões e processo de montagem é fundamental, buscando a fácil montagem, desmontagem e manutenção destes elementos (CELANI, 2014).

A madeira foi escolhida por ser amplamente utilizada em construções e encaixes tradicionais, além de ser um material leve e resistente, cujo uso como elemento construtivo tem crescido (PAJCHROWSKI et al, 2014). Estudos anteriores também se utilizaram de peças em madeira pré-fabricadas para a montagem de estruturas com robôs (SONDERGAARD et al, 2016). Estruturas fixadas apenas por encaixes são utilizadas tradicionalmente na arquitetura japonesa e alemã (KANASAKI; TANAKA, 2013), por exemplo, buscando utilizar as características do próprio material (SUMIYOSJI; MATSUI, 1991) ao invés de outros elementos incorporados. O capítulo 6 - Encaixes apresenta detalhadamente o desenvolvimento dos encaixes. Foram explorados dois tipos de encaixes: por pinos e rabo-de-andorinha. Estes foram escolhidos por serem muito utilizados na marcenaria e terem já sido explorados em outros estudos em fabricação digital.

As peças com encaixes foram fabricadas em madeira utilizando a fresadora CNC Roland MDX540, com eixo rotacional. Algumas peças em escala reduzida foram produzidas utilizando a impressora 3D de resina Creality LD-006, devido à sua resolução e precisão.

Nos estudos de montagem (sexta fase), explorou-se como estratégia de montagem o empilhamento de blocos, através de provas de conceito. Esta estratégia considera a montagem de uma estrutura 3D pelo posicionamento de blocos em camadas 2D, ou seja, todos os elementos estão paralelos ao plano e com rotação somente no eixo Z.

Nestes estudos, a posição e orientação dos elementos foram digitalizadas por meio da digitalizadora 3D MicroScribe G2X. Os modelos físicos digitalizados foram comparados com os modelos digitais originais para determinar a diferença entre estes e a precisão dos equipamentos e processos. No processo de digitalização, foram considerados os vértices dos blocos. Estes foram comparados em termos de distância absoluta em relação aos vértices originais do modelo virtual. A diferença foi analisada de dois modos: diferença média e diferença máxima. Para a precisão, considerou-se a diferença máxima do processo.

A pesquisa foi desenvolvida de modo incremental, iniciando-se com métodos e geometrias mais simples e aumentando sua complexidade. Considerando os desafios dos métodos de montagem, robôs e geometria, não seria possível alcançar modelos virtuais mais complexos sem este aumento de complexidade incremental.

Foram realizados testes iniciais de montagem, sem o uso de encaixes, visando identificar a precisão dos processos de montagem pelos robôs. Depois foram realizados testes de montagem utilizando os encaixes e analisando a relação entre a tolerância da geometria do encaixe e a precisão final obtida. Estes testes foram realizados de forma incremental para ambos os encaixes usados e ambos os robôs.

Na fase seis, foi testada também a montagem de um pavilhão em escala reduzida com o posicionamento de peças no espaço, ou seja, com possibilidade de rotação em todos os eixos. Neste caso foi utilizado somente o braço robótico, devido às restrições do cablebot. Este método apresenta maior complexidade que o citado anteriormente, devido ao planejamento dos movimentos. Outros usos possíveis também foram propostos em modelos virtuais e paramétricos, com maior complexidade.

A análise dos resultados obtidos e conclusões foram compiladas na última etapa. Nesta foi analisado como os processos de fabricação e montagem afetaram o projeto, os resultados de processos e precisão obtidos na montagem, propondo um método para o uso de robôs em processos de montagem em arquitetura. Finalmente, foram tecidas conclusões amplas ligadas aos aspectos levantados na pesquisa e nas visitas técnicas realizadas, com alguns possíveis diagnósticos relacionados ao uso de robôs na arquitetura no Brasil e exterior, tanto na área acadêmica quanto na indústria da construção.

## 2. Estado da arte

As duas primeiras fases da pesquisa (revisão bibliográfica e visitas técnicas a laboratório) visam analisar desde um caráter macro sobre história geral, definição e classificação de robôs até sua aplicação específica na área de arquitetura. Deste modo, permitiu-se ter uma visão ampla do estado da arte da aplicação de robôs em arquitetura.

Ao invés de uma simples relação de aplicações, identificou-se também tendências e lacunas de pesquisa na área pelo cruzamento das informações e avaliação quantitativa. Essas informações são fundamentais para um amplo desenvolvimento da área e mapeamento de pesquisas futuras.

As visitas técnicas permitiram não só identificar as pesquisas em desenvolvimento nos centros visitados, mas também características das equipes de pesquisa, abordagem, dificuldades, particularidades e visão dos pesquisadores sobre o futuro desenvolvimento de robôs em arquitetura.

### 2.1. Dos primeiros autômatos aos robôs em arquitetura

A necessidade de controlar, fabricar, imitar e simular a vida é inerente à natureza humana. Desde os primórdios da humanidade, diversas civilizações tentam criar animais e humanos artificiais – ou buscam imitar algumas de suas características ou capacidades. Esta busca antecede em muitos milênios a criação dos computadores ou inteligência artificial, sendo que levou ao desenvolvimento de diversas máquinas automáticas. Desde uma alavanca simples até um braço hidráulico complexo, são inúmeras as máquinas e tecnologias que buscam imitar mecanismos biológicas em algum nível.

Discutir sobre o uso de robôs requer a compreensão de seu desenvolvimento pela história. Quais são seus precedentes? Quando eles apareceram e começaram a ser introduzidos na indústria ou na vida cotidiana? E o que se pode considerar um robô? Estes questionamentos são fundamentais para maior compreensão das tecnologias

utilizadas nas pesquisas de aplicação de robôs, bem como no processo de identificação e nichos e lacunas de pesquisa.

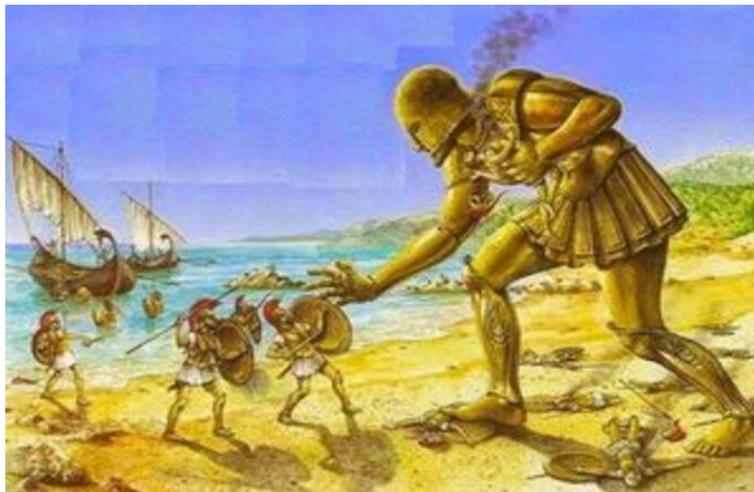
### 2.1.1. História dos robôs

A origem da palavra “robô” vem do tcheco “robota”, que significa “trabalho forçado” e foi introduzida pelos irmãos Capek no início do século XX (HOCKSTEIN et al, 2007). Sua primeira aparição se deu na história “Opilec”, de Joseph Capek, em 1917. Pouco depois, em 1921, seu irmão, o dramaturgo Karel Capek, escreveu a peça “Rossum’s Universal Robot” (RUR). A peça trata de humanos artificiais que realizavam trabalhos para os seres humanos, até que ocorre uma rebelião que destrói a humanidade (CAPEK, 1921). A intenção original da peça era criticar os rápidos avanços tecnológicos, contudo teve um efeito inverso, ao inserir no imaginário popular o conceito e fascínio por estes “humanos artificiais”. A peça influenciou outros autores, inclusive Isaac Asimov, que lançou uma série de histórias a partir de 1939 com o tema, como a série “robôs” e o famoso livro “Eu, robô”, cunhando as três leis fundamentais para controlar o comportamento dos robôs (ASIMOV, 1994).

Os robôs passaram a aparecer cada vez mais nas obras de ficção, desde famosas séries como “Perdidos no espaço”, de 1965, e filmes como “Star Wars”, de 1980, até séries infantis, como “Os Jetsons”, de 1962. Inegavelmente, o termo e conceito de robô entraram para o imaginário popular e, aliados ao desenvolvimento da eletrônica e computadores, culminou no desenvolvimento da área da robótica e robôs reais, como será visto mais a frente. Apesar dos irmãos Capek terem introduzido a palavra “robô” e um conceito similar ao atual há pouco menos de um século, a humanidade tem buscado, desde a antiguidade, aparelhos automáticos e “humanos artificiais” que realizassem tarefas por eles.

Um dos primeiros registros deste tipo de aparato provém da Grécia antiga, com o conceito dos autômatos (do grego αὐτόματος, que significa “agir por vontade própria”), os quais eram máquinas que se operavam automaticamente (WALLÉN, 2008). Na mitologia greco-romana existem vários exemplos de autômatos humanoides ou com forma de animais diversos. Entre os mais famosos, têm-se Talos, um autômato

gigante de bronze que patrulhava a ilha de Creta (Figura 2), e as donzelas douradas, que auxiliavam Hefesto em sua oficina, ambos criados pelo deus olímpico Hefesto, sendo também conhecido nos mitos os autômatos humanoides criados pelo arquiteto e inventor Dédalo. (BULFINCH, 2015; SIMÕES et al, 1976).



**Figura 2: Autômato Talos defendendo a Ilha de Creta**

**Fonte: [greekmythology.wikia.com/wiki/Talos](http://greekmythology.wikia.com/wiki/Talos)**

Apesar de fazerem parte dos mitos da época, estes instigaram e inspiraram a busca pela compreensão e desenvolvimento de mecanismos automáticos, levando ao desenvolvimento dos princípios mecânicos e diversas máquinas complexas, os quais são a base da mecânica atual. Há divergências quanto a quem seria o “pai da mecânica” (Aristóteles ou Arquitas de Tarento), contudo, considera-se que a mecânica surgiu na Grécia com o texto “Problemas Mecânicos” (WINTER, 2007; DUGAS, 1988).

Existem diversos exemplos de aplicações práticas da mecânica desenvolvida pelos gregos, como a Máquina de Anticítera (Figura 3), a qual se acredita servir como calendário astrológico de alta complexidade (SWEDIN; FERRO, 2007). Outro grande exemplo é a Eolípila, ou máquina térmica de Heron, que deu origem ao motor a vapor (Figura 4).

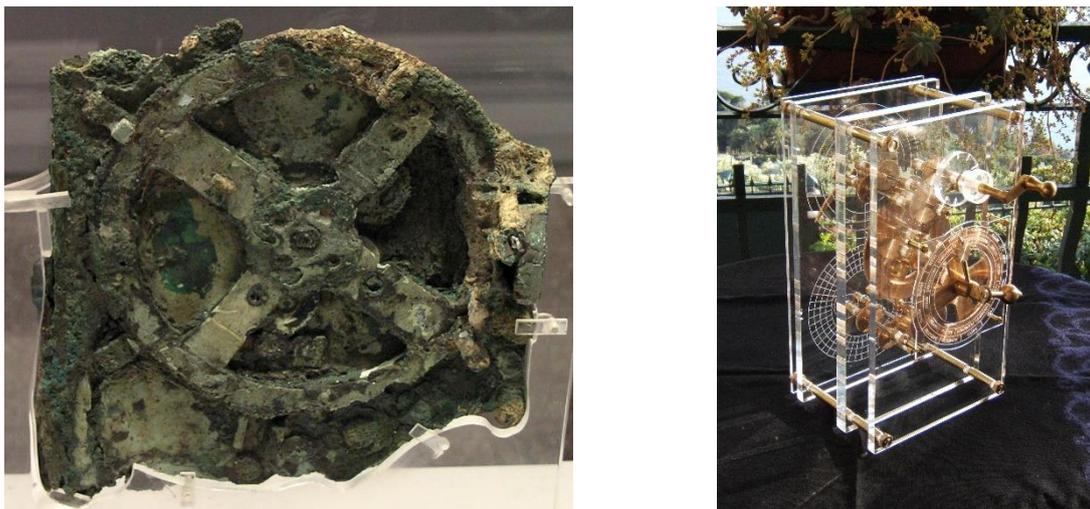


Figura 3 – Máquina de Anticífera original e reconstrução pelo Museu Arqueológico Nacional de Atenas

Fonte: [www.bbc.com](http://www.bbc.com)



Figura 4 – Ilustração da Eolípila

Fonte: [www.vanillamagazine.it](http://www.vanillamagazine.it)

Outros povos durante a antiguidade também apresentam histórias e descrições de autômatos, seres mecânicos e outros aparatos mecânicos. Diversos escritos descrevem na China a presença destes aparatos desde antes do século V a.C., como um pássaro de madeira capaz de voar (NEEDHAM, 1991). Há um relato particularmente interessante, sobre um autômato criado pelo artesão Yan Shi, o qual foi dado de presente ao rei Mu de Zhou, entre os séculos X e XI a.C.. O autômato em questão teria a habilidade de se mexer e efetuar tarefas, dotado de “órgãos artificiais” (NEEDHAM, 1991).

Na Índia também são encontrados textos sobre autômatos, que eram encarregados de tarefas como segurança, agricultura e outros. Em particular, existem relatos sobre Ajatashatru, rei de Magadha, na Índia oriental, o qual teria recebido os restos mortais de Buda e ordenado que estes fossem guardados por estes soldados autômatos, os quais eram conhecidos como “espíritos que se movem nas máquinas” (NORMAN, 1983).

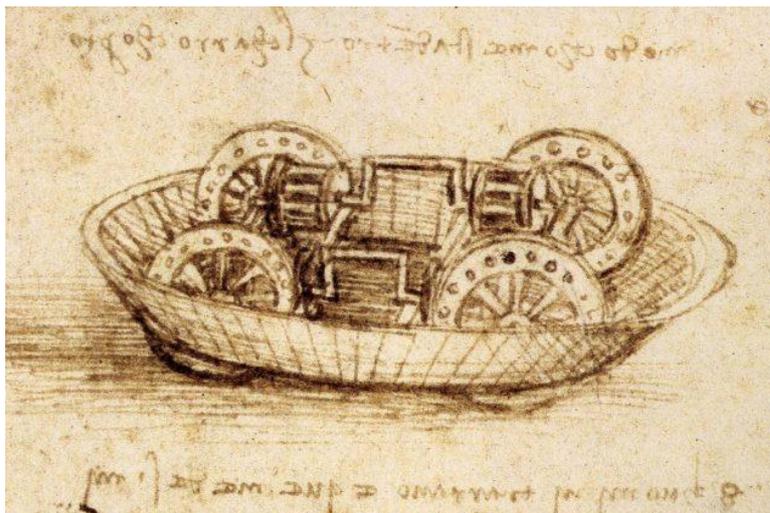
Obviamente, não se pode atestar o quanto que estes relatos estão misturados com situações imaginárias, contudo, diversas figuras históricas aparecem nestes relatos. Entre as diversas explicações, temos o enaltecimento de figuras ilustres, mistura com histórias mitológicas, percepção errônea por parte de quem presenciou algum fato, deteriorações na história ao ser passada ou, até, inseridas intencionalmente para afugentar possíveis ladrões e inimigos, como pode ser o caso dos guardas de Ajatashatru. Independentemente, tal como no caso dos gregos, estes escritos e histórias impulsionaram o desenvolvimento da mecânica no oriente, sendo a Cidade Imperial da China o berço de diversas invenções mecânicas.

No século II a.C., a Grécia e suas colônias foram conquistadas crescente Império Romano, o qual continuou com aplicações práticas das teorias mecânicas desenvolvidas pelos gregos. Durante este período não existem relatos significativos de autômatos ou peças similares desenvolvidas. No século IX, já quatrocentos anos após a queda do Império Romano do Ocidente, o califa de Bagdá coletou os textos antigos gregos dos monastérios e os estudou, resultando no livro “A ciência de mecanismos engenhosos”, onde o foco era a aplicação prática dos conhecimentos de mecânica (WALLÉN, 2008). Esse compilado, em conjunto com a mecânica que já estava sendo desenvolvida, permitiu um rápido desenvolvimento na mecânica prática,

sendo descrita a construções de máquinas autônomas que realizavam pequenas tarefas em diversos textos. Estes não traziam só uma descrição do que faziam, mas instruções de como construí-las. Como exemplo, havia pássaros autômatos que se moviam com o vento nos portões e no palácio de Bagdá (MERI, 2005) e toca-flautas automáticos que tocavam diferentes músicas (KOETSIER, 2001). Obviamente estes autômatos apresentavam movimentos e funções extremamente limitados e dependiam do acionamento através de alguma força, como o vento, ou alavancas.

Entre os diversos inventores e artesãos que surgiram durante o desenvolvimento da civilização Árabe, é importante destacar Al-Jazari, escritor do livro “o livro do conhecimento de dispositivos mecânicos engenhosos” e tido como importante figura para o desenvolvimento da mecânica moderna, principalmente no que diz respeito a sistemas hidráulicos (ROMDHANE, 2009). Entre os séculos XII e XIII, ele criou autômatos e aparatos que realizavam pequenas funções através de mecanismos hidráulicos, vários baseados em figuras humanas em diversas escalas, descreve-os em seu livro e, inclusive, a possibilidade de criar autômatos programáveis.

O Renascimento, que ocorreu entre os séculos XIV e XVI, trouxe um novo interesse pelos textos clássicos, bem como arte e ciência, levando diversos intelectuais e inventores a reverem as invenções descritas pelos gregos (WALLÉN, 2008). Entre eles podem destacar Leonardo Da Vinci e René Descartes. Leonardo Da Vinci testou diversos mecanismos descritos, buscando melhorá-los e aplicá-los (WALLÉN, 2008), resultando em invenções como o carro armado (Figura 5) – antecessor do tanque de guerra - e concepções, como um autômato que poderia puxar carroças ou um automóvel automático (SCHOLZ, 2007). Por sua vez, René Descartes apresentou outra abordagem em relação à mecânica e os autômatos, comparando os mecanismos com os órgãos de animais e como poderiam ser substituídos, concluindo que o corpo funcionaria de modo similar a uma máquina complexa (VACCARI, 2008). Este tipo de metáfora foi utilizado de modo extenso e sistemático por Descartes, introduzindo este conceito dentro das ciências biológicas (VACCARI, 2008).



**Figura 5 – Carro Armado de Leonardo Da Vinci**

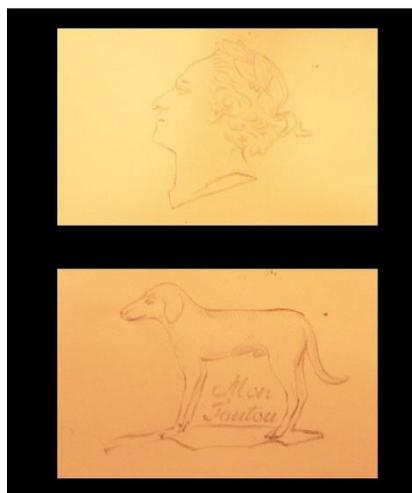
Fonte: [www.hdfondos.eu/preview/720096/2560/1920/o](http://www.hdfondos.eu/preview/720096/2560/1920/o)

No século XVIII, houve um aumento na produção de autômatos humanóides, estando relacionados à produção de brinquedos para a nobreza. Artesãos suíços passaram a criar autômatos na forma de pequenas bonecas, as quais tinham movimentos precisos e naturais (WALLÉN, 2008). No geral, eles realizavam movimentos de escrever, tocar instrumentos ou dançar. Pierre Jaquet-Droz e sua família fizeram alguns dos mais famosos, entre eles O Desenhista (Figura 6), que era capaz de fazer quatro diferentes desenhos (Figura 7) (WALLÉN, 2008).



**Figura 6 – Autômato “O Desenhista” por Pierre Jaquet-Droz**

Fonte: [en.wikipedia.org/wiki/Jaquet-Droz\\_automata](http://en.wikipedia.org/wiki/Jaquet-Droz_automata)



**Figura 7 – Mulher e Cachorros desenhados pelo autômato**

Fonte: [en.wikipedia.org/wiki/Jaquet-Droz\\_automata](https://en.wikipedia.org/wiki/Jaquet-Droz_automata)

Apesar de estes serem autômatos, basicamente, com foco no entretenimento da nobreza, foram de extrema importância para o desenvolvimento da própria mecânica, uma vez que estavam desafiando sempre seus limites (WALLÉN, 2008). Após 1910, houve um declínio na produção de autômatos deste tipo, apesar de continuarem a ser produzidos até hoje, porém sem grandes diferenças ou avanços em relação ao apresentado. Não é muito claro quando ocorreu, mas na primeira metade do século XIX, passou-se a inserir pequenos discos ou tubos metálicos com marcações, similares ao da caixa de música abaixo (Figura 8) e a organeta mecânica (Figura 9), nos quais era possível “programar” as músicas ou a ordem dos movimentos de autômatos.



**Figura 8 – Caixa de música mecânica**

Fonte: [www.kirkerland.com](http://www.kirkerland.com)



**Figura 9 – Organeta mecânica**

Fonte: [www.pianola.org](http://www.pianola.org)

Como se pode notar, desde a antiguidade houve em diversos momentos da humanidade a tentativa de criar “humanos artificiais” através dos mais diversos métodos<sup>5</sup>. Então quando se deu a virada da busca de autômatos para o desenvolvimento de robôs como hoje conhecemos? Segundo o dicionário Michaelis, robô seria um “1. Aparelho automático, com aspecto humanoide, capaz de se movimentar e executar diferentes tarefas, inclusive algumas geralmente feitas pelo homem, 2. Mecanismo cujo comando é controlado automaticamente, 3. Indivíduo que obedece mecanicamente, que não tem vontade e iniciativa próprias”.

Segundo as definições apresentadas, os autômatos, bem como outras máquinas diversas, poderiam ser considerados como “robôs”, porém os autômatos se inserem em uma visão de mundo e tecnologia disponível referente aos princípios mecânicos aplicados ao movimento e funcionamento do corpo, suas habilidades e funções. Historicamente falando, os autômatos estão ligados ao mundo antes do conhecimento e desenvolvimento da eletricidade, eletrônica e computadores.

A história da eletricidade e da eletrônica é vasta, principalmente por seu rápido desenvolvimento nos últimos 120 anos, cabendo apontar somente as principais invenções e fatos que permitiram o desenvolvimento dos robôs modernos. Pelo menos desde o século IV a.C., sabe-se da existência da eletricidade estática, por experimentos descritos por Platão e outros cientistas gregos, sendo explorada por mais de dois milênios, culminando na primeira máquina a eletrificar corpos construída por Francis Hauksbee, entre 1666-1713, e definição de inúmeros princípios e leis utilizados na elétrica moderna (ASSIS, 2010).

Somente com os estudos de Benjamin Franklin no século XVIII e com a invenção da torre de Volta (que deu origem à pilha moderna), na passagem do século, por

---

<sup>5</sup> Obviamente também houve tentativas relacionadas ao esoterismo, como homúnculos, e a literatura apresenta diversos exemplos, principalmente no oriente médio e na Europa, durante a Idade Média. Pelo teor desta pesquisa, estes não serão tratados, porém pode-se questionar que, se a busca por autômatos impulsionou o desenvolvimento da mecânica e pneumática, levando à criação de diversos mecanismos ainda hoje utilizados, a busca esotérica por humanos artificiais, possivelmente, instigou o desenvolvimento da biotecnologia e clonagem, sendo que termos como “homúnculos” são ainda utilizados nesses meios.

Alessandro Volta, que no século XIX, com Alexander Graham Bell, Thomas Edison, Nikola Tesla, Michael Faraday, Ányos Jedlik e outros, ocorreu o desenvolvimento da eletricidade como conhecemos. O dínamo e o motor elétrico são particularmente importantes, por, respectivamente, gerar corrente a partir do movimento e gerar movimento a partir da aplicação de corrente elétrica. Ambos sugeriram em 1832, após a descoberta da relação entre fluxo de energia elétrica e movimento, enunciados pela Lei de Faraday, por Michael Faraday. Existem debates sobre quem criou o primeiro dínamo e motor elétrico (pois diversos cientistas estavam trabalhando em cima dos mesmos princípios), porém sabe-se das contribuições de Hippolyte Pixii, William Sturgeon e Thomas Davenport.

Estas invenções permitiram o uso prático da eletricidade e o desenvolvimento da eletrônica. Dentro da eletrônica, existem também alguns marcos importantes, como a invenção dos semicondutores diodos em 1874, por Michael Faraday e Karl Braun, e a válvula termiônica, entre os séculos XIX e XX (GARFINKEL; GRUNSPAN, 2018). Um dos maiores desenvolvimentos, que permitiu, inclusive, a construção dos computadores modernos, robôs e qualquer tipo de placa ou circuito, foi a invenção do transistor, em 1947 pela Bell Labs (por John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley), que permitia o uso de relações booleanas na eletrônica de modo compacto, substituindo os antigos tubos de vácuo (GARFINKEL; GRUNSPAN, 2018). A partir desta invenção, o desenvolvimento dos computadores, robôs e diversas outras tecnologias se acelerou.

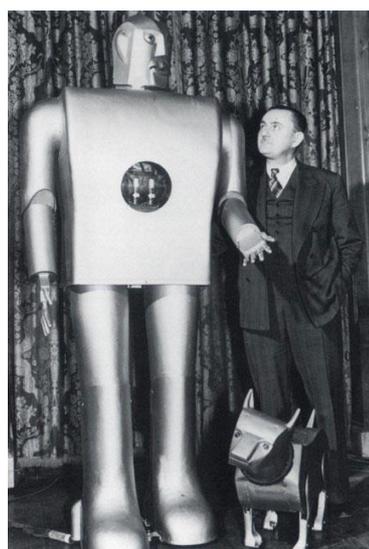
É importante ressaltar que os computadores seguem uma trajetória muito similar a dos autômatos e robôs, tendo suas origens em máquinas de calcular antigas, como o ábaco, passando pelo desenvolvimento da mecânica, com computadores mecânicos (ou analógicos), como o analisador diferencial de Bush e Hazen, de 1931, ou a calculadora Curta, de 1948, chegando ao SSEM em 1948, o primeiro computador digital do mundo (GARFINKEL; GRUNSPAN, 2018). Pouco depois, em 1951, surgiu a primeira máquina por controle numérico, desenvolvida no MIT, seguida por prensa hidráulica, torno e fresadora (WALLÉN, 2008). Como citado antes, nesse período já havia discussões sobre o futuro surgimento de robôs, tanto pelas obras de ficção dos irmãos Capek e de Isaac Asimov, quanto pelo próprio rápido desenvolvimento da eletrônica nos últimos anos.

Como já colocado, pela definição de “robô” pelo dicionário Michaelis, diversas máquinas poderiam ser consideradas como robôs, basta executar tarefas automaticamente. Essa definição muito ampla torna difícil definir qual foi o primeiro robô a realmente existir. Se considerar somente que ele deva ter forma humanoide e realizar tarefas automaticamente, pode-se definir que o primeiro robô moderno teria sido Herbert Televox (Figura 10), em 1927, ou Elektro, em 1937 (Figura 11). Contudo, estes podem ser classificados como animatrônicos<sup>6</sup>, que apesar de fazerem parte da área da robótica, são utilizados para entretenimento e não tem aplicação prática fora deste meio. Para fins históricos, será considerado o primeiro robô com finalidade prática e fora do meio do entretenimento. Existem outras definições envolvendo robôs modernos, as quais serão tratadas mais à frente.



**Figura 10 – Herbert Televox**

Fonte: [www.history-computer.com](http://www.history-computer.com)



**Figura 11 – Elektro**

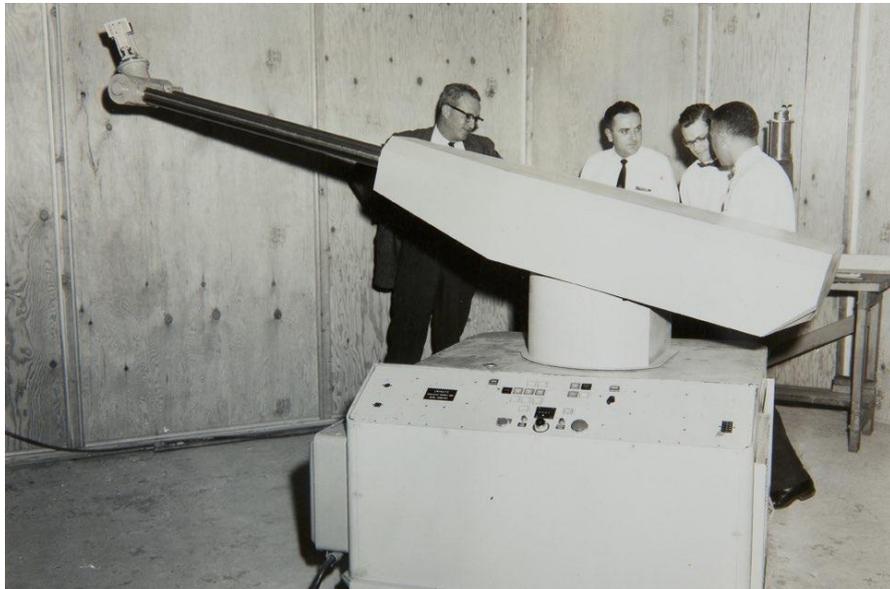
Fonte: [www.history-computer.com](http://www.history-computer.com)

O grande marco do surgimento do primeiro braço robótico – e consequente transição dos robôs da ficção científica para a realidade – se deu em 1959, com a instalação do primeiro protótipo de braço robótico em uma linha de montagem. George Devol e Joseph Engelberger, inspirados nas obras citadas acima e reconhecendo que existiam

---

<sup>6</sup> Definição pelo dicionário de Cambridge: uso de máquinas controladas por computador para fazer com que bonecos e modelos se movam de forma natural em filmes e outros tipos de entretenimento.

tarefas repetitivas e perigosas para os funcionários realizarem na linha de montagem, decidiram fundar a Unimation Inc. e desenvolver um braço robótico, chamado Unimate (Figura 12), sendo instalado na linha de montagem da General Motors em 1959 (WALLÉN, 2008; GARFINKEL; GRUNSPAN, 2018). Em 1961, já eram mais de 60 robôs instalados na GM (HOCKSTEIN et al, 2007; WALLÉN, 2008), aumentando sua produção para 110 carros por hora, tornando a GM a maior produtora de carros do mundo, a frente da Ford, que antes detinha o posto, inclusive em decorrência do modo de produção fordista.



**Figura 12 – Braço robótico Unimate**

**Fonte: [www.robotics.kawasaki.com](http://www.robotics.kawasaki.com)**

Buscando retomar seu posto, Del Harder, diretor técnico da Ford, buscou novos produtores que fizessem robôs com as mesmas especificações do Unimate (WALLÉN, 2008). Ao mesmo tempo, o Unimate foi apresentado em programas de televisão e feiras, realizando demonstrações como realizar uma tacada de golfe ou servi cerveja. Estes movimentos fizeram com que diversas companhias, principalmente americanas, passassem a entrar na área de robótica (WALLÉN, 2008). Em 1966, a Unimation começou sua abertura para o resto do mundo, licenciando produções para Nokia, na Escandinávia, e para Kawasaki Heavy Industries, no Japão

[2]. O Unimate realizava tarefas como pegar e colocar objetos no local correto, dotado de uma pinça automática (WALLÉN, 2008) e era “programado” por gravar as posições que deveria seguir: um funcionário tinha que mover manualmente o braço para cada posição que ele deveria seguir, essas posições eram então gravadas na memória do robô (que consistia em um tambor magnético, diferente das memórias atuais) e eram repetidas (GARFINKEL; GRUNSPAN, 2018). Este método de “programação” de robôs ainda é amplamente utilizado em tarefas repetitivas.

Pouco depois, em 1969, foi desenvolvido o braço Stanford (Figura 13), por Victor Scheinman, o primeiro com seis graus de liberdade, podendo realizar tarefas que os robôs anteriores não podiam, devido aos limites de movimento [3]. No mesmo ano, a Unimation instalou os primeiros robôs para realizar pontos de solda em carros na GM, sendo seguidos em 1972, na Europa, pela Fiat (WALLÉN, 2008).



**Figura 13 – Braço Stanford**

**Fonte: [www.robotics.org/blog-article.cfm](http://www.robotics.org/blog-article.cfm)**

A partir do aumento no interesse por robôs, sua fabricação e melhorias, diversas industriais passaram a competir pelo desenvolvimento de tecnologias e custo, buscando garantir sua posição dentro do mercado. A KUKA, por exemplo, se coloca como pioneira com o primeiro robô industrial de seis eixos em 1973 (Figura 14) [4], pois o de Stanford seria de caráter acadêmico e para ensino.



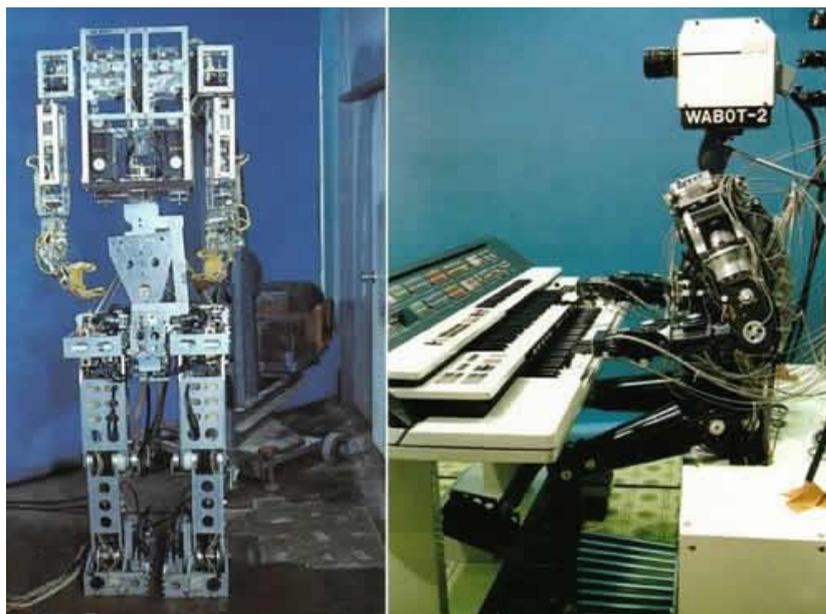
**Figura 14 – Primeiro robô industrial com seis eixos**

Fonte: [www.kuka.com](http://www.kuka.com)

Em 1971 o primeiro microprocessador foi lançado pela Intel, levando em 1974, no MIT, a criação do Silver Arm, um braço robótico com sensores sensíveis à pressão e uso de microprocessador [5], pouco depois chegando ao mercado o T3, Da Cincinnati Milacron Corporation, e o IRB 6, da ASEA (que depois viria a se torna ABB). Esse desenvolvimento reduziu o custo dos robôs e tornou-se a base de controles mais poderosos e efetivos, aumentando as vendas de robôs e trazendo um crescimento para a área de mais de 30% ao ano (WALLÉN, 2008). Em 1973, estima-se que haviam por volta de 3.000 robôs industriais em funcionamento no mundo, já em 2005, pouco mais de trinta anos depois, já eram quase um milhão de robôs (WALLÉN, 2008). Atualmente, existem por volta de 3,1 milhões de robôs industriais em funcionamento, com previsão de crescimento de 820 mil robôs para 2022 (IRF).

Se no âmbito industrial houve um aumento e desenvolvimento, principalmente, de braços robóticos e linhas de montagem automatizadas, no âmbito acadêmico o desenvolvimento de robôs se voltou para robôs humanoides, visão robótica, uso de sensores e outros usos. Em 1969, o Instituto de Pesquisa de Stanford desenvolveu o primeiro uso acadêmico de visão robótica – a qual só começou a ser explorada em usos prático em 1980 (IFR). Outro importante grupo foi o WABOT Project, da

Universidade de Waseda, que desenvolveu entre 1970 e 1973 o WABOT-1 (Figura 22), o primeiro robô humanoide completo construído, sendo capaz de se locomover pela sala pelo uso de sensores externos, medindo a distância até os objetos, dizer e compreender palavras em japonês. Seguido do WABOT-2 (Figura 15), em 1984, que foi construído com o objetivo de ler partituras e tocá-las no teclado [6].



**Figura 15 – WABOT-1 e 2, pela Universidade de Waseda**

**Fonte: [www.wabot-house.waseda.ac.jp/html/e-wabot.htm](http://www.wabot-house.waseda.ac.jp/html/e-wabot.htm)**

Outro marco importante foi em 1975, quando as sondas Viking 1 e 2 foram enviadas para a exploração de Marte. Ambas possuíam braços robóticos e alguns autores os consideram como os primeiros robôs enviados ao espaço (IRF), demonstrando a importância destes para uso remoto e em locais de difícil acesso ou com condições adversas, que impossibilitam a ação humana. Nas próximas décadas, os robôs foram apresentando melhorias e refinamentos. O crescimento da área levou à fundação de associações nacionais, como a JIRA (Associação Japonesa de Robôs), primeira associação nacional, fundada em 1971, e a IFR (International Federation of Robotics), em 1987.

Seguindo uma vertente que vinha desde os anos de 1980, em 1996, a KUKA passou a produzir robôs industriais que podiam ser controlados por computador, diferentemente dos anteriores, que possuíam controladores próprios [4]. Essa mudança de paradigma facilitou a programação de robôs e, posteriormente, facilitou a difusão de robôs no ambiente maker (como discutiremos no capítulo 5-Robôs), sendo a facilidade de programação e uso um dos pontos levantados pela IFR como fundamentais na disseminação dos robôs.

No início do século XXI, com o desenvolvimento de sensores, acompanhado pelo computador, desenvolvimento de Big Data e maior capacidade de processamento, e pelo grande número de robôs utilizados – tanto dentro quanto fora da indústria -, iniciou-se o desenvolvimento do setor de robôs colaborativos, liderados, principalmente, pela Universal Robots, com o lançamento em 2008 do UR5, o primeiro robô colaborativo criado, onde a preocupação era sua interação com o usuário e o ambiente a sua volta [7]. Seguido depois por empresas como ABB, KUKA e FANUC. Ao mesmo tempo, ocorreram movimentos interessantes nos robôs industriais tradicionais. Até 2008, houve uma corrida para criar robôs cada vez maiores e com maior capacidade de carga, chegando a braços robóticos que podiam carregar até 1,2 toneladas. Em contrapartida, a KUKA lançou em 2006 o robô mais leve da época e, em 2009, ABB lança o menor robô industrial multiuso, com somente 25kg e alcance de menos de 60cm.

Ao mesmo tempo em que a indústria vinha desenvolvendo robôs para suas linhas de montagem, outros setores passaram a desenvolver robôs com outras finalidades. Na área médica, em 1985, houve o primeiro uso cirúrgico de um robô, o qual foi usado para realizar uma biópsia no cérebro de um paciente, devido à sua precisão (HOCKSTEIN et al, 2007). Sendo utilizados cada vez mais para realizar cirurgias com o menor grau de invasão e maior precisão. Na área militar e de defesa, os primeiros robôs teriam sido usados na Segunda Guerra Mundial, em campos minados, visando explodir minas e bombas sem ferir soldados ou civis, conhecidos como teletanques (SPRINGER, 2013). Seu uso se expandiu durante a guerra fria, surgindo veículos operados remotamente, como submarinos, em 1953, voltando-se depois para naves não-tripuladas, drones e outros (SPRINGER, 2013). Com a evolução em sensores, sistemas de GPS, acelerômetros e giroscópios, expandiu-se o desenvolvimento de veículos autônomos e seu uso na agricultura e logística.

Hoje, diversos outros setores, como o de limpeza ou serviços hoteleiros, também utilizam diversos robôs para suprir diversas necessidades. Os robôs estão cada vez mais presentes na vida cotidiana, seja de modo direto ou indireto. Em 2020, a Federação Internacional de Robótica (IFR) estimou que 3 milhões de robôs industriais eram usados na fabricação de objetos cotidianos. Comparativamente, no mesmo ano, 30 milhões de robôs foram vendidos para propósitos de limpeza, entretenimento, logística, defesa e outros (IFR, 2021).

É importante destacar que os robôs têm se tornado cada vez mais acessíveis. Comparando-se os preços de braços robóticos, por exemplo, entre 2014 e 2017, houve uma redução de 25%, esperando-se que até 2025 haja mais 22% de redução [1]. Apesar da redução percentual, um braço robótico colaborativo industrial ainda tem um custo relativamente alto para uso em pesquisa e implementação em pequenas empresas, com custo de base de R\$210.000,00. Ao mesmo tempo, com o crescimento do movimento Maker e DIY (faça você mesmo), diversos tipos de robôs de menor custo são desenvolvidos para usos variados. Um exemplo é o BCN3D Moveo, um projeto open source de braço robótico educacional com valor em torno de R\$2.000,00. Outros robôs, como o cablebot, não são comercializados, devido a sua especificidade e ainda baixo uso na indústria.

Contudo, estes robôs tipo DIY apresentam também uma limitação de carga condizente com seu hardware (motores e estrutura). Braços robóticos industriais tradicionais tem uma capacidade de carga entre 20 e 230kg, dependendo do modelo. Versão DIY ou educacionais normalmente apresentam cargas de menos de 200g até, no máximo, 2kg.

Como se pode notar, os robôs são aplicados nas mais variadas funções e áreas do conhecimento. Apesar de inúmeros exemplos tratarem de braço robóticos, diversos outros tipos de robôs foram desenvolvidos, apresentando diversas características distintas uns dos outros. Algumas máquinas são prontamente classificadas como robôs, como é o caso de braços robóticos, contudo outras despertam debates e dúvidas sobre sua classificação. Poderia, por exemplo, uma impressora 3D ou um drone ser considerado um robô? O próprio termo “robô”, em alguns casos, é usado para definir Processos Robóticos Autônomos (RPA) e bots virtuais (DORAN. GOKHALE, 2011; AALST, BICHILER, HEINZI, 2018) – os quais se referem ao

desenvolvimento de inteligência artificial e machine learning, sendo que alguns autores os consideram como robôs virtuais. Contudo, eles seriam considerados robôs? Para buscar responder estas questões, fez-se necessário um aprofundamento nas definições de “robô”.

### 2.1.2. Definições

É importante compreender que, com o desenvolvimento de novas tecnologias e conhecimentos, conceitos podem mudar e se adequar às inovações da época. Na área da computação este fenômeno é bem comum, como no caso de inteligência artificial. Os algoritmos e técnicas de alto nível na década de 1980 podem hoje ser considerados como simples ou triviais, sendo que alguns não são mais nem considerados como Inteligências Artificiais, devido aos avanços no campo. Do mesmo modo, na área de robótica, diversas definições de robôs foram utilizadas ao longo do tempo – as quais podem estar incompletas ou ultrapassadas.

A ISO 8373-2021 especifica o vocabulário para robôs e aparelhos robóticos. Esta ISO passou por uma revisão, atualizando a definição de robôs e seus componentes de acordo com o estado da arte atual. Numa área em constante mudança e de novas aplicações, estas atualizações são fundamentais. No início desta pesquisa, utilizou-se a ISO 8373:2012 (segunda edição), sendo atualizada para a ISO 8373:2021 (terceira edição) ao longo da pesquisa. A nova edição define um robô como um “manipulador programável com grau de autonomia para realizar locomoção, manipulação e posicionamento”, incluindo um sistema de controle (tradução livre). A definição atual é mais ampla que a anterior, a qual define o robô como um “manipulador programável em dois ou mais eixos com grau de autonomia, movimentando-se dentro de seu ambiente, para realizar uma tarefa específica” (tradução livre).

O grau de autonomia do robô é considerado como a “habilidade de realizar tarefas baseadas no estado atual e sensores, sem intervenção humana” (tradução livre). Além disso, a ISO 8373-2021 coloca a obrigatoriedade de um sistema de controle, o qual é composto tanto por software quanto hardware, que permite “monitorar e controlar este

robô e sua interação e comunicação com outros objetos e humanos no ambiente”. Ao especificar que o robô deve interagir com outros objetos, através da manipulação, posicionamento ou sentindo-os e apresenta hardware específico, compreende-se que estas definições tratam de robôs físicos.

Sistemas robóticos são comuns atualmente e amplamente debatidos, como RPA (Robot Process Automation), e web bot (web robots ou, simplesmente, bots) (DORAN, GOKHALE, 2011; AALST et al, 2018). Ambos estão relacionados ao desenvolvimento da Inteligência Artificial e pode-se classificá-los como robôs virtuais. Com o atual desenvolvimento e uso de machine learning, novas aplicações de inteligência artificial (AI) e ambientes virtuais (como metaverso e ambientes imersivos), existem debates relacionados ao conceito de realidade, ambientes e outros conceitos. Para esta pesquisa, considerou-se a divisão entre robôs físicos e virtuais, sendo que serão explorados somente os robôs físicos, tendo em vista seus objetivos e aplicações.

Além da definição apresentada pela ISO 8373:2021, existem outras definições possíveis para robôs. A Federação Internacional de Robótica (International Federation of Robotics – IFR) utiliza, de modo genérico, a definição fornecida pela ISO 8373:2012 (segunda edição), com alguns adendos em relação à cinemática específica de alguns tipos robôs e classificação. Deste modo, define robô como sendo um “manipulador programável em dois ou mais eixos com grau de autonomia, movendo-se em seu ambiente, para realizar determinadas tarefas” (IFR [1], 2022). Por seu foco na indústria, a IFR indicou estar analisando se as definições trazidas pela revisão da ISO 8373 irão afetar as atuais definições utilizadas e suas implicações (IFR [1], 2022).

Outros autores e especialistas na área também apresentam diversas definições para robôs. Rodney Brooks, da Rethink Robotics, considera que o robô é uma máquina capaz de sentir o ambiente através de sensores, realizar decisões computacionais baseadas nas informações obtidas e realizar uma ação no mundo real (apud GUIZZO, 2018). Gill Pratt, CEO do Instituto de Pesquisa da Toyota, tem uma definição parecida, na qual o robô capta informações por sensores e decide qual ação deve ser realizada (apud GUIZZO, 2018). Ambos indicam a capacidade do robô de “sentir” o ambiente, ou seja, capturar informações do ambiente que o permita realizar a tarefa necessária.

Estes sensores compreendem desde dispositivos complexos, como visão robótica e análise em tempo real dos dados, até sensores mais simples, como botões de fim de

curso, medidores ultrassônicos, qualidade do ar e outros. Braços, robóticos, por exemplo, utilizam ou servomotores – os quais já possuem sensores que identificam o ângulo de rotação do motor e sua velocidade – ou motores de passo com sensores de fim de curso. Desta forma, o robô é capaz de compreender sua posição e de seus membros no espaço e seus movimentos para realizar sua função. O robô, então, nem sempre captura informações externas a ele, necessariamente, mas as vezes somente do próprio espaço que ele ocupa dentro do ambiente. Normalmente, robôs colaborativos apresentam sensores para capturar informações além de seu próprio corpo físico, identificando a aproximação de pessoas ou outros dados importantes sobre o ambiente para realização da tarefa.

Kate Darling, do MIT Media Lab, define robô como sendo “uma máquina física que usualmente é programada por um computador e pode executar tarefas automaticamente” (apud SIMON, 2017). Esta definição explicita que o robô deve ser um agente físico, excluindo os robôs virtuais, e que realiza tarefas no mundo físico, contudo, não coloca a necessidade de identificar o meio ou sua própria posição. Já Anca Dragan, da Universidade da Califórnia em Berkley, traduz robô como uma “personificação física de um agente de inteligência artificial que pode realizar ações que afetam o mundo físico” (apud SIMON, 2017). Esta definição traz o elemento adicional da inteligência artificial, podendo se referir à capacidade do robô de identificar o ambiente por visão robótica, reconhecimento de fala ou outros sensores e métodos. Não será discutido nesse trabalho as definições e implicações relacionadas à inteligência artificial, por sua complexidade. Contudo, considerando a definição de inteligência artificial como sendo o ramo da engenharia da computação que cria máquinas e programas que imitam o comportamento humano ou realizam tarefas que necessitam de inteligência (OED ONLINE, 2020), pode-se concluir que todo robô apresenta algum nível de inteligência artificial, seja por imitar ações ou capacidades humanas, ou por realizar decisões com base nas informações captadas por sensores.

Estas definições apresentam algumas similaridades. De modo explícito, todas identificam a necessidade de o robô ser uma máquina física e autônoma, que de algum modo interage com o mundo físico, realizando tarefas neste. De modo explícito em algumas e implícito em outras, há também a questão do robô não, necessariamente, precisar realizar sempre a mesma tarefa, seja pela reprogramação,

capacidade de sentir o meio e responder a este ou através de métodos de inteligência artificial. A tabela abaixo (Tabela I) identifica quais características cada autor considera fundamental para que uma máquina seja considerada um robô. Foram incluídas apenas definições relacionadas aos robôs físicos, que são o foco desta pesquisa.

	Máquina física e Autônoma	Eletronica	Programável e Reprogramável	Uso de Sensores	Interage com o mundo real	Inteligência Artificial
Oxford English Dictionary (OED ONLINE, 2020)	✓		✓			
ISO 8373:2012	✓		✓		✓	
ISO 8373:2021	✓		✓		✓	
Rodney Brooks (BROOKS, 2018, apud GUIZZO 2018)	✓	✓		✓	✓	
Gill Pratt (PRATT, 2018, apud GUIZZO 2018)	✓	✓		✓	✓	
Anca Dragan (DRAGAN, 2017 apud SIMON 2017)	✓	✓			✓	✓
Kate Draling (DRALING, 2017 apud SIMON 2017)	✓		✓			

Tabela I – Definição de robôs por autor

Fonte: Autor

Deste modo, pode-se concluir que um robô físico deve ser:

- Uma máquina física;
- Composta por partes mecânicas e eletrônicas;
- Que realize tarefas de modo automático, com ou sem auxílio de um humano;
- Sendo programável e reprogramável, permitindo seu uso em diversas situações;
- E que interaja e modifique o ambiente físico.

Considerando estas definições, podemos excluir da classificação de robôs os robôs virtuais (por não serem máquinas físicas), os drones e veículos comuns (por não realizarem tarefas automaticamente), bem como os autômatos (por não terem base na eletrônica), e quaisquer aparelhos que somente captem informações do mundo físico sem modificá-lo. Contudo, veículos e drones autônomos são classificados como robôs, por realizarem tarefas automaticamente. Isto demonstra que a linha entre uma máquina poder ser considerada ou não um robô é tênue e, em alguns casos, poucas modificações – seja de software, hardware ou até de uso – pode levá-la a ser considerada um robô.

Quanto aos robôs macios (*soft robots*), alguns mecanismos estariam sendo chamados, erroneamente, de robôs. Contudo, por não realizarem tarefas automaticamente, não ser reprogramável ou com base na eletrônica, não poderiam entrar nesta classificação. Com certeza estes mecanismos podem ser entendidos como partes de robôs ou com a possibilidade de serem convertidos para robôs, pela automatização das tarefas e do controle automático de bombas pneumáticas, por exemplo. Outros exemplos apresentam todos os requisitos colocados acima, inclusive pela realização automática de tarefas e controle das bombas de ar por meio de dispositivos eletrônicos automatizados, podendo ser classificados como robôs. Os robôs macios (*soft robots*) estão detalhados e discutidos no item “4.1.3. Classificação de Robôs”.

É importante destacar que esta classificação tem como base o estado da arte atual e as definições levadas em conta anteriormente. Com base em desenvolvimentos futuros, estas definições podem se alterar e, ainda, apresentar subdivisões. A distinção entre robôs físicos e robôs virtuais é visível atualmente, contudo futuros

desenvolvimentos podem reduzir a distância entre estes. Assim como debates de quais máquinas e mecanismos macios podem ou não ser considerados como robôs.

A própria IFR não considera, por exemplo, carros e drones autônomos como robôs, apesar de considerar aspiradores automáticos ou veículos autônomos de entrega como robôs. Este tipo de incongruência é comum no meio e leva aos debates sobre os limites destas definições. É importante também destacar que a IRF é uma organização com base na indústria robótica, normalmente sem presença de pesquisadores do meio acadêmico, apresentando tendências relacionadas à indústria.

Pode-se destacar também que a ISO 8373:2021 apresenta os “aparelhos robóticos”. Estes não apresentam todas as características necessárias para serem considerados robôs, contudo são máquinas desenvolvidas com tecnologia robótica, estando no limiar entre o que pode ou não ser considerado um robô.

Apesar da origem e base nos robôs serem imitar funções e capacidades humanas ou de outros animais, notamos que não há uma necessidade de mímica antropomórfica em sua maioria. Existem robôs antropomórficos – principalmente na área de entretenimento e robôs de serviço, como é o caso de restaurantes e hotéis – contudo não é uma necessidade. A necessidade de características humanoides nos robôs se dá, provavelmente, para suprir o imaginário humano e criar uma conexão e proximidade entre os humanos e os robôs.

### 2.1.3. Classificação de Robôs

Uma vez definidos, os robôs podem ser classificados. Existem diversas formas de se classificar os robôs, de acordo com quais funções ou características se deseja destacar ou que são consideradas fundamentais. Apesar de haver tentativas de padronizar estas classificações, o rápido desenvolvimento na área e surgimento de novos tipos de robôs, com distintas características, materiais e dimensões, dificultam uma padronização rígida. Nesta seção, será apresentado como alguns órgãos e autores realizam esta classificação e será proposta uma classificação que busca

integrar as demais e ser flexível para poder ser utilizada para futuros desenvolvimentos na área.

Atualmente, os robôs apresentam as mais variadas funções e estão presentes no âmbito industrial, profissional, doméstico, entretenimento e outros. Para fins estatísticos e relativos à distribuição de aplicações robóticas, tanto a ISO 8373:2021 quanto a IFR apresentam uma classificação de robôs de acordo com seus usos. A IFR divide os robôs entre industriais e de serviço. O setor industrial, como já explorado durante a história dos robôs, tem sua base na área de automobilística e eletrônica, com aplicações nas linhas de produção e montagem. Os robôs de serviço, por sua vez, são subdivididos em domésticos e profissionais. A ISO 8373:2021, por sua vez, subdivide os robôs, de acordo com seu uso, entre: industrial, de serviços e médicos. Cada uma destas apresenta, por sua vez, outras subdivisões de acordo com a área de aplicação, tipo etc.

Esta forma de subdivisão permite identificar os principais usos e setores que estão consumindo os robôs, permitindo à indústria se ajustar ao mercado consumidor. Tendências podem ser notadas também a partir destas estatísticas. O principal crescimento no setor doméstico entre 2017 e 2020, por exemplo, se deu pelos robôs de limpeza (passando de 6,4 milhões de unidades em 2017 para em torno de 25,5 milhões em 2020) (IFR, 2020). No setor profissional, no mesmo período, o maior crescimento se deu na área de logística (de 69 mil unidades para 279 mil), seguida da área médica (IFR). Não fica claro se, nesses quantitativos, são considerados também drones, impressoras 3D e outros tipos de robôs, contudo, nota-se um grande crescimento no uso de robôs, desde indústrias até consumidores finais.

Apesar deste tipo de classificação ter sua utilidade, seu foco é no uso e aplicação, ao invés do robô em si. Deste modo, um mesmo robô pode ser enquadrado em diversas classificações, por apresentar diversos usos. Alguns robôs apresentam flexibilidade de uso, dimensões, custo e outras características que podem ser úteis em diversos setores. Isso ocorre com alguns braços robóticos, que vemos sendo utilizados desde no setor industrial, até na área médica, educação, logística e outros. Visando o foco na estrutura física do robô, ao invés de sua aplicação, os fornecedores de robôs classificam os robôs industriais somente por sua estrutura mecânica desde 2004 (IFR, 2016). Nesta classificação, os robôs são divididos em sete classes, sendo elas:

- Robôs lineares (incluindo cartesianos e porticados): aqueles que possuem três juntas prismáticas, cujos eixos coincidem com o sistema de coordenadas cartesiano (Figura 16);
- SCARA: robô com duas juntas com rotação, que permite trabalhar em um plano (Figura 17);
- Robôs articulados: braço robótico com pelo menos três eixos (Figura 18);
- Robôs paralelos (delta): robô com juntas prismáticas (permite deslize, tipo pistão) ou rotativas concorrentes (Figura 19);
- Robôs cilíndricos: robô cujo eixo se utiliza de um sistema de coordenadas polar;
- Outros;
- Não classificados.



Figura 16 – Robôs lineares

Fonte: [www.ifr.org](http://www.ifr.org)

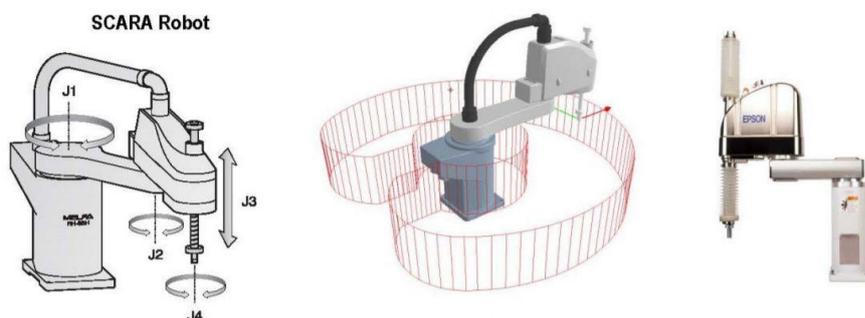
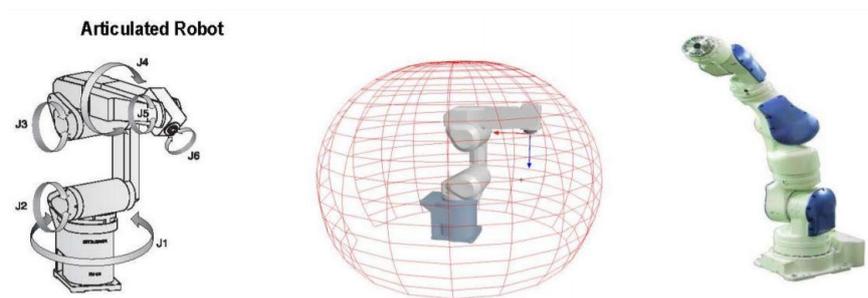


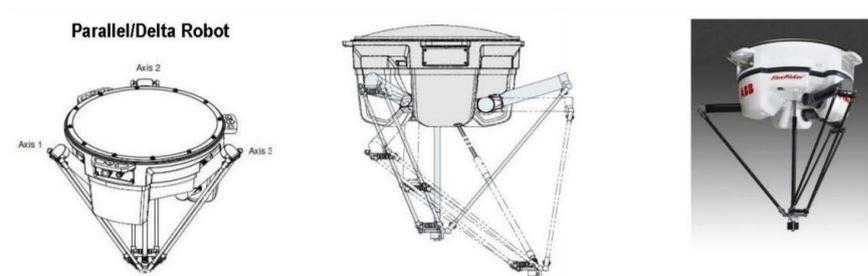
Figura 17 – Robôs SCARA

Fonte: [www.ifr.org](http://www.ifr.org)



**Figura 18 – Robôs articulados**

**Fonte: [www.ifr.org](http://www.ifr.org)**



**Figura 19 – Robôs paralelos**

**Fonte: [www.ifr.org](http://www.ifr.org)**

Essa classificação, contudo, não contempla diversos tipos de robôs, colocando-os nas classes de “outros” ou “não classificados”. É o caso, por exemplo, de robôs móveis autônomos (autonomous mobile robots – AMR), que não são definidos nesta classificação, mas amplamente utilizados (IFR [1], 2022). No setor de robôs de serviço, a IFR apresenta uma classificação distinta da dos industriais, classificando-os pelo tipo de movimento. A tabela abaixo (Tabela 02) apresenta esta classificação.

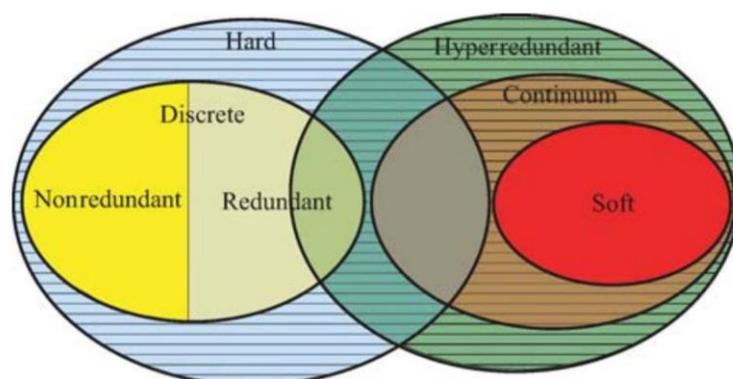
Tipo		Descrição
<b>A</b>	<b>Terrestres</b>	<b>Robôs que se movimentam ou ficam fixos no chão</b>
A1	Rolar	Rola em rodas ou correntes
A2	Andar	Anda em pernas
A3	Fixo no lugar	Imóvel, não pode mudar sua localização física sozinho, fixo no chão, mesa ou qualquer outro lugar, também pode estar pendurado
A4	Outro terrestre	Terrestre, mas nenhum dos anteriores (A1-A3), exemplo: rastejar, serpentear, escalar
<b>B</b>	<b>Aquáticos</b>	<b>Robôs que nadam ou mergulham (autônomos)</b>
B1	Nadar	Nada na superfície da água. Nota: se o robô pode tanto nadar quanto mergulhar, é considerado como mergulhador (B2)
B2	Mergulhar	Mergulha abaixo da superfície da água
<b>C</b>	<b>Aéreos</b>	<b>Robôs que se movem através do ar</b>
C1	Voar	Voa no ar
C2	Pairar	Paira acima do solo
<b>D</b>	<b>Vestíveis</b>	<b>Robôs que são vestidos por pessoas</b>
D1	Exoesqueleto	Exoesqueletos movidos por humanos
D2	Outros vestíveis	Outros robôs vestíveis que não D1
<b>E</b>	<b>Outros</b>	<b>Robôs que não são A-D</b>
E1	Outros robôs	Robôs que não se enquadram nas classes A-D, exemplo: robôs para o espaço orbital Robôs que se enquadram em múltiplas classes, exemplos: robôs híbridos para água, solo e ar

**Tabela 02 – Classificação de robôs de serviço pela IFR**

Fonte: Adaptada/Traduzida de (IFR [2], 2022)

Esta classificação já apresenta uma variação maior, permitindo inserir robôs tipo o AMV, drones e outros em categorias mais específicas e menos genéricas. Porém, todos os robôs estacionários, como é o caso de inúmeros robôs industriais, como braços robóticos, e impressoras 3D FDM, ficariam na mesma categoria (A3).

Outras classificações foram propostas por diferentes autores, de acordo com características distintas dos robôs. Estas buscam englobar robôs que não se enquadram nas classificações anteriores. Entre elas, destaca-se a classificação pelo material utilizado e graus de liberdade (TRIVEDI et al, 2008), como podemos ver no diagrama abaixo (Figura 20).



**Figura 20 – Classificação de robôs por material e graus de liberdade, áreas hachuradas representam conjunto vazio**

**Fonte: (TRIVEDI et al, 2008)**

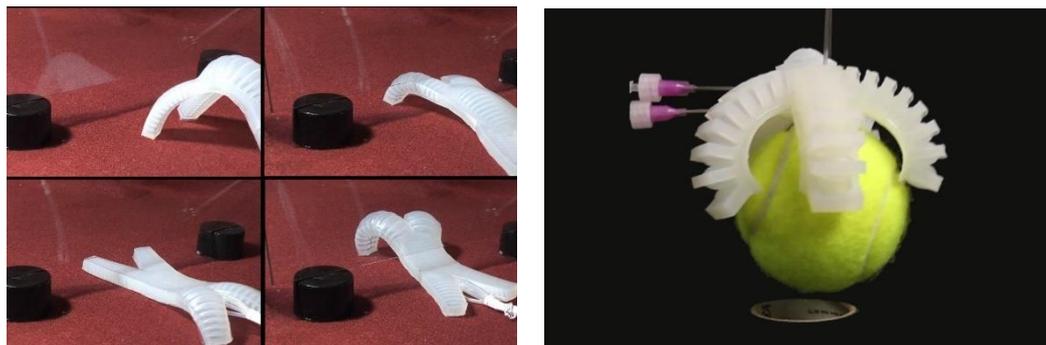
O primeiro aspecto notado nesta classificação é a divisão entre robôs rígidos (*hard robots*) em azul e robôs macios (*soft robots*) em vermelho. Estando relacionada ao material utilizado na confecção do robô, esta divisão passou a ser necessária após o desenvolvimento dos robôs macios, que tem como base os avanços nos estudos em bioengenharia.

Para compreender os demais níveis de subdivisão desta classificação, se faz necessário explicar as diferenças entre robôs rígidos e macios. Robôs rígidos são compostos de eixos ou braços rígidos e atuadores (normalmente motores elétricos ou atuadores pneumáticos) nas juntas (TRIVEDI et al, 2008). Essa categoria compõe os robôs mais comuns e conhecidos, desde impressoras 3D e fresadoras CNC até braços robóticos complexos. São robôs de alta precisão, cuja rigidez busca impedir que vibrações e deformações afetem a precisão (TRIVEDI et al, 2008; RUS, TOLLEY, 2015). Com este sistema, é fácil de prever, a partir de uma posição inicial e uma descrição dos movimentos de suas partes, qual será a posição final da garra do robô (RUS, TOLLEY, 2015). Em uma impressora 3D, por exemplo, temos uma cabeça de impressão acoplada a uma barra helicoidal, ao se ter a distância entre os dentes do eixo e o número de passos para uma volta do motor tem-se a relação entre o número de passos do motor e a distância que a cabeça de impressão percorre naquele eixo, permitindo saber sua posição exata. O mesmo ocorre em sistemas mais complexos e com maior número de eixos, como é o caso de um braço robótico.

Esta classificação contempla todos os robôs industriais (GARCIA et al, 2007), bem como profissionais e domésticos que são comercializados. Pela sua natureza rígida, estes robôs trabalham bem em ambientes conhecidos (TRIVEDI et al, 2008), seja por serem informados de elementos como origem e dimensões do ambiente de trabalho, obstáculos, áreas a serem evitadas etc, ou seja, por escaneamento e reconhecimento de elementos do ambiente, através da visão robótica.

Na segunda metade do século XX, estudos na recente área de bioengenharia buscaram estudar não só os movimentos dos animais, mas também os tecidos envolvidos do processo. Inicialmente, a busca por robôs, como já foi colocado, provém da tentativa de recriar capacidades e funções humanas ou animais. O próprio braço robótico buscou ser um análogo ao braço humano, onde as próprias articulações e movimentos buscam imitar a capacidade do braço humano, porém existem limitações. Alguns autores colocam que os sistemas naturais apresentam um desempenho igual ou superior, em termos de movimento, do que robôs rígidos, graças à possibilidade de deformação dos corpos (RUS, TOLLEY, 2015).

Em 1963 foi usado em um artigo científico, pela primeira vez, o termo “soft robot” (CORNER, LEVY, 1963), aqui traduzido como “robô macio”. Os robôs macios provêm do estudo de sistemas naturais, como tendões, músculos, métodos de enrijecimento e deformação por pressão. Esta categoria de robôs se caracteriza por serem feitos de materiais flexíveis, que podem se deformar e enrijecer através do uso de fluídos, cabos, materiais de memória e outros (MANTI et al, 2016). Dois exemplos famosos são o Starfish (Figura 21) e o tentáculo robô (Figura 22), os quais já foram reproduzidos por diversos grupos de pesquisa e para diversas aplicações.



**Figura 21 - Starfish**

**Fonte: [www.roboticresearch.com](http://www.roboticresearch.com)**



**Figura 22 – Tentáculo robô**

**Fonte: [www.engineering.com](http://www.engineering.com)**

Os robôs macios têm sido amplamente explorados pela comunidade científica por sua adaptabilidade a diferentes formas e terrenos (MANTI et al, 2016; TRIVEDI et al, 2008; GARCIA et al, 2007) e pela capacidade de resistir a impactos (RUS, TOLLEY, 2015), sendo considerados apropriados para o uso em conjunto com humanos. Seus usos vão desde manipulação de objetos (MUXFELDT et al, 2014) até criação de exoesqueletos (ASBECK et al, 2014).

Apesar do entusiasmo e aplicações possíveis para os robôs macios, eles apresentam como principal desvantagem a baixa precisão (TRIDEVI et al, 2008). Deve-se salientar

que alguns autores colocam os robôs que apresentam os dois tipos de materiais (rígidos e macios) como semi-macios (RUS, TOLLEY, 2015) ou híbridos.

Se o primeiro nível de classificação apresentado por TRIVEDI et al é o material utilizado, o segundo nível de classificação dos robôs seria a presença ou não de divisões aparentes, sendo classificados como robôs discretos ou contínuos. Os robôs discretos<sup>7</sup> são aqueles que apresentam unidades ou elementos distintos, tal como ocorre em um braço robótico tradicional (Figura 23), onde podemos distinguir claramente os membros rígidos e as juntas. Já os robôs contínuos são compostos por um elemento único, onde não podemos distinguir claramente as juntas (Figura 24). De modo análogo, podemos considerar que os robôs contínuos se aproximam de membros biológicos como a tromba de um elefante. Nos exemplos encontrados, os robôs moles são contínuos, muitas vezes compostos por um único membro que pode ser ativado por completo ou por segmentos.



Figura 23 – Braço robótico KUKA

Fonte: [www.kuka.com](http://www.kuka.com)



Figura 24 - Manipulador tromba de elefante

Fonte: (TRIVEDI et al 2008)

---

<sup>7</sup> Discretização: ato de tornar discreto, em unidades e elementos distintos e não continuados. Normalmente utilizado na matemática como ato de aproximar funções ou variáveis contínuas em unidades contáveis, como variável binária.

O terceiro nível de classificação colocado por TRIVEDI et al, é quanto ao movimento e graus de liberdade, também sendo referido como redundância. Redundância é a presença de mais de uma configuração espacial ou de juntas excessivas para se chegar ao mesmo ponto no espaço. Isso pode facilmente ser notado em um braço robótico de 3 eixos, onde a garra pode estar posicionada no mesmo ponto do espaço, com a mesma direção, porém com o cotovelo voltado para cima ou para baixo. Apesar de alguns autores classificam os robôs somente como não redundantes ou redundantes, outros que trabalham com robôs macios utilizam também os termos hiper ou mega-redundante (TRIVEDI et al, 2008). Deste modo, robôs não redundantes são aqueles que têm só uma solução para chegar a um ponto do espaço, como ocorre com a maioria das impressoras 3D FDM tradicionais ou fresadoras CNC de 3 ou 4 eixos. Robôs redundantes são aqueles que apresentam mais de uma solução para se chegar a um ponto do espaço, como ocorre com braços robóticos. Alguns autores apontam que um robô deveria ter, pelo menos, 6 eixos ou graus de liberdade (DoF) para ser considerado como redundante, contudo, suas propriedades podem ser notadas com 3 eixos, dependendo da configuração, plano de atuação e tipo destes eixos. Por fim, têm-se os hiper-redundantes, os quais teriam, teoricamente, infinitos graus de liberdade, como ocorre com robôs macios ou alguns robôs rígidos (TRIVEDI et al, 2008). Na prática, os robôs hiper-redundantes apresentam um grau de liberdade muito alto, sendo de difícil definição e cálculo.

O diagrama apresentado por TRIVEDI et al, apesar de ter uma classificação a partir de características relevantes (material, segmentação e graus de liberdade), apresenta muitos conjuntos vazios, não apresenta nenhuma subclassificação de robôs macios (nem mesmo entre fixos e móveis) e não considera os robôs híbridos ou semi-macios. De outro lado, a classificação apresentada pela IFR apresenta também limitações, como citado anteriormente.

A integração destas duas formas de classificações pode apresentar um melhor panorama das possibilidades e áreas ainda não bem exploradas. Deste modo, o autor propõe uma nova classificação de robôs (Figura 25). Esta classifica os robôs de acordo com: (1) materialidade, (2) discretização ou subdivisão, (3) redundância, (4) fixo ou móvel e (5) por estruturas mecânicas.

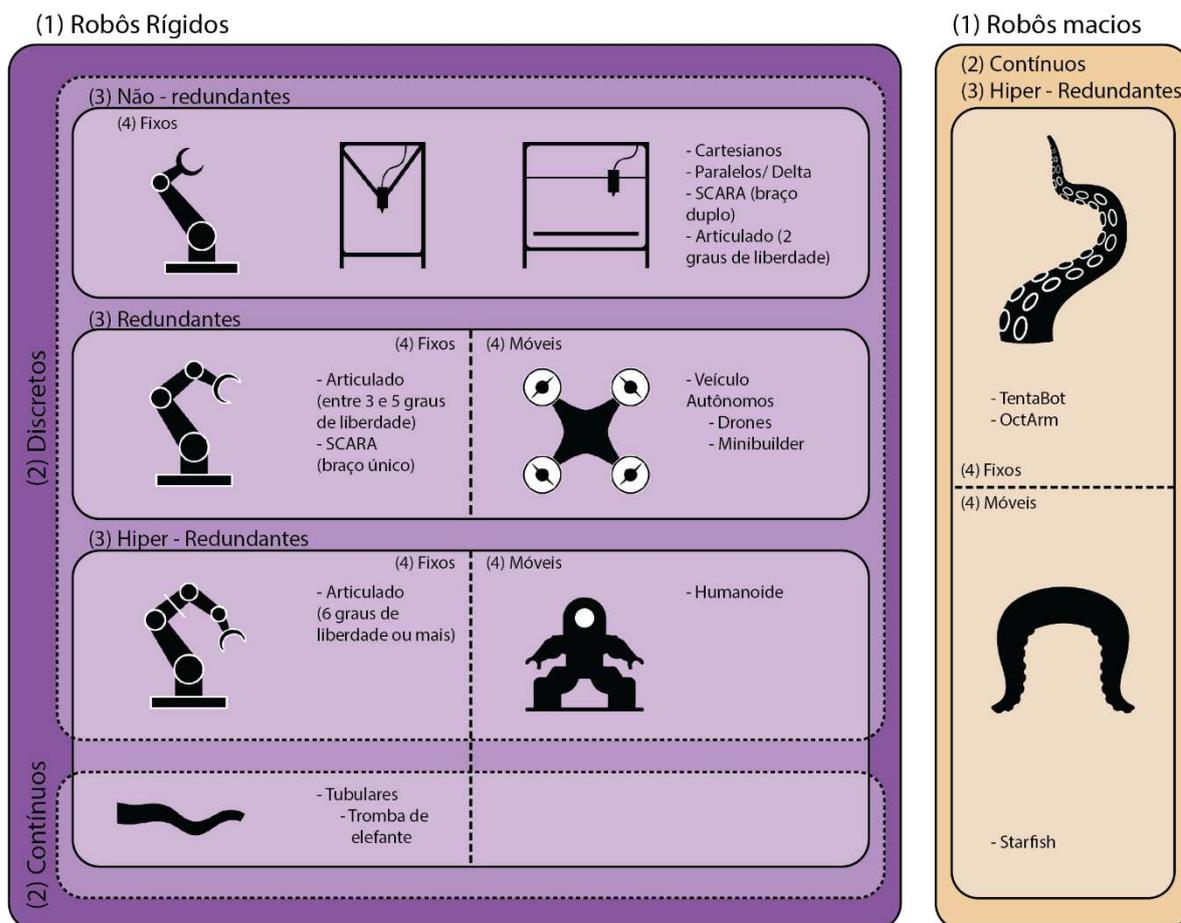


Figura 25 – Classificação proposta para robôs físicos

Fonte: do autor

Tendo como base a clara distinção entre robôs rígidos e macios, inclusive origem histórica e suas funções, a primeira divisão seria por materialidade. Esta é, de modo geral, uma distinção entre robôs rígidos e macios. Pela própria definição e exemplos encontrados da bibliografia, todos os robôs macios levantados durante a revisão seriam contínuos e hiper-redundantes, tal como apontado no diagrama (TRIDEVI et al, 2008). Não foram encontradas subdivisões dentro desta categoria pela bibliografia consultada.

Com maior desenvolvimento dos robôs macios, será possível identificar diferenças entre estes e delinear melhor as subdivisões deste grupo. Pelos exemplos levantados, até o momento, pode-se dividi-los entre robôs fixos (como o robô tentáculo) e móveis (como o robô Starfish).

A respeito dos robôs rígidos, a segunda grande distinção se dá entre robôs discretos ou contínuos, considerando que todo robô contínuo é hiper-redundante. Dentre os robôs comerciais (quer seja industriais, profissionais ou domésticos), todos os exemplos encontrados se enquadram na categoria de robôs rígidos discretos.

Os robôs discretos podem ser classificados de acordo com sua redundância ou não, tendo relação com seus movimentos e graus de liberdade. Desta forma, se divide entre robôs não redundantes, redundantes e hiper-redundantes. Os robôs não-redundantes só podem ser do tipo “fixo”, devido à sua definição. Já os redundantes e hiper-redundantes, por sua vez, podem ser fixos ou móveis. Nestas subdivisões é possível inserir as categorias robóticas apresentadas pela IFR, bem como drones, robôs humanoides e outros, contemplando os exemplos encontrados na revisão bibliográfica e outros tipos futuros de robôs.

Existe também na bibliografia, como já citado, referência a robôs semi-macios ou híbridos, apresentando trechos rígidos e macios. Combinações diversas entre robôs rígidos, visando aumentar suas capacidades, como mobilidade e raio de alcance, também são frequentemente utilizadas. Um exemplo é o uso de braços robóticos com veículos autônomos. Estas associações entre diferentes categorias de robôs podem ser tratadas como “robôs complexos” por suas especificidades.

Esta classificação proposta não pode ser vista como estática e, conforme novos robôs e aplicações forem sendo desenvolvidas, provavelmente será alterada para acomodar estes novos robôs, materiais e configurações. Como citado, ainda não existem muitas classificações dentre os robôs macios, contudo pode-se prever que possíveis classificações podem ser relacionadas a: sua cinemática, método de ativação, possibilidade ou não de expansão e número de membros.

#### 2.1.4. Robôs em arquitetura

Os robôs estão presentes na indústria desde 1959 – especialmente no setor automobilístico -, com uso crescente a cada ano. Atualmente estão presentes, de forma direta ou indireta, no cotidiano que bilhões de pessoas. Seja nos processos de fabricação de bens, montagem e envio, seja pela presença de robôs de serviço nas residências ou ambientes de trabalho.

Os robôs podem ter duas formas de utilização principais: substituição de mão de obra e ferramenta exploratória de criatividade. Em ambos os casos, há uma automação de processos – seja de fabricação ou montagem -, porém com diferentes focos. Existem extensos debates a respeito de ambos os usos e suas implicações em temas como criatividade, desemprego, acesso a habitação, respeito de normas, bem-estar do trabalhador e outros. O primeiro uso diz respeito ao uso de robôs para substituir a mão de obra humana em trabalhos perigosos, sujos, desgastantes e repetitivos. Algumas personalidades da indústria e autores apontam que, cada vez mais, os robôs serão utilizados no campo da construção e defendem seu uso pela redução da exposição humana a ambientes, processos e trabalhos insalubres. Nesta pesquisa, considerou-se esta uma aplicação referente à construção civil, na qual há uma simples substituição de mão de obra, sem exploração mais profunda do potencial dos robôs.

O segundo uso se baseia nas novas possibilidades pelo uso criativo e exploratório do robô. Neste caso, ele é visto como uma ferramenta capaz de realizar tarefas que seriam muito difíceis ou quase impossíveis para um ser humano. Alguns autores apontam ainda para o robô como uma ferramenta que pode intensificar a criatividade humana, através das possibilidades permitidas por estes. Nesta pesquisa, considerou-se as aplicações referentes a exploração criativa como sendo referente às aplicações em arquitetura.

Apesar de muitos autores defenderem o uso de robôs em arquitetura por argumentos de bem-estar dos trabalhadores, redução de custo e tempo, vemos que este não foi o principal motivo para os robôs terem sido introduzidos no ramo da arquitetura. Como apontado no capítulo “1. Introdução”, o desejo de explorar novos métodos de projetar e de construir, bem como novas formas e geometrias sempre instigaram os arquitetos e nutrem sua criatividade.

Esse processo é similar ao que ocorreu nos primeiros usos das ferramentas de CAD em arquitetura. Sua exploração inicial se deu pois permitia trabalhar com formas que antes não eram possíveis ou eram muito difíceis de serem exploradas (KOLAREVIC, 2005). Da mesma forma, a adoção da modelagem NURBS, *machine learning*, métodos de prototipagem e outras tecnologias no processo de projeto, estas não só facilitaram o que já estava sendo feito, mas instigaram – e ainda instigam – a curiosidade e criatividade dos arquitetos. Da mesma forma, a adoção de robôs continua a acelerar o potencial de exploração e expressão criativa (REINHARDT et al, 2016), permitindo investigar, inclusive, geometrias e configurações espaciais que não podem ser construídas manualmente (BUDIG et al, 2014).

É importante também frisar que quando se fala de robôs em arquitetura, trata-se do uso no canteiro de obra ou em um ambiente controlado que visa, principalmente, a fabricação e/ou montagem de elementos de grande porte, como paredes, pavilhões ou até um edifício inteiro. Não se trata de componentes padronizados e de menor porte, como maçanetas, janelas ou até móveis padronizados, os quais podem ser produzidos em fábricas com métodos de automação, inclusive uso de robôs. Existem móveis e elementos únicos, muitas vezes com formas complexas, que necessitam de métodos de fabricação e montagem robótica e estão no limiar entre a indústria tradicional e os novos usos de robôs em arquitetura. Nesta pesquisa, como já apontado, trata-se do uso de robôs em obras arquitetônicas.

A exploração de robôs em arquitetura teve início na década de 1980 (BRELL-ÇOÇKAN, BRUMANN, 2012; SOUSA et al, 2016). Um grande exemplo foi o uso de um robô para corte de pedras, utilizado a partir de 1989, na produção de colunas para a Basílica da Sagrada Família em Barcelona (BURRY, 2016). A introdução dos robôs na obra se deu, principalmente, pela complexidade das formas – tendo em vista que a própria obra de Gaudí se baseava em sistemas generativos, ainda que analógicos, gerando formas complexas e únicas – e pelo desejo de reduzir o tempo de produção das peças sem perda da precisão (BURRY, 2016). Em 2001 também foi introduzido na obra um braço robótico de 7 eixos para realizar cortes complexas em pedras (Figura 26), que foi capaz de realizar 95% dos cortes, permitindo produzir em tempo recorde a janela em rosa da Fachada da Paixão (BURRY, 2016).



**Figura 26 – Braço robótico realizando corte em pedra**

**Fonte: [www.antonigaudi.org](http://www.antonigaudi.org)**

Apesar do sucesso no uso de robôs nesta obra e em outras, foi somente a partir de 2006, com o projeto de fachada do vinhedo Gantenbein e a fundação do grupo Gramazio Kohler Research, em ETH Zurique, que o uso de robôs em arquitetura entrou em foco. Inegavelmente, o projeto de fachada para o vinhedo Gantenbein tornou-se icônico (Figura 27). O projeto combina o uso de um material tradicional e simples (o tijolo) com uma modelagem extremamente sofisticada, onde a disposição e rotação de cada elemento são únicas, visando trabalhar com o efeito de pixels claros e escuros, criando a imagem de uvas. A variedade de posições dos tijolos impossibilitaria a produção por métodos manuais tradicionais, sendo necessário o uso de braço robótico para efetuar a montagem (BONWETSCH et al, 2007).



Figura 27 – Fachada do vinhedo Gantenbein

[www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)

Os 72 painéis da fachada foram fabricados em, aproximadamente, 18 dias, sendo que seu fluxo contínuo e constante de produção permitiu uma programação precisa da entrega de tijolos e transporte dos painéis para o vinhedo (BONWETSCH et al, 2007). Além disso, o valor de produção com o uso de braço robótico (110 euros/m<sup>2</sup>) foi menor do que se comparado com o valor padrão de paredes de tijolo manualmente pré-fabricadas (125 euros/m<sup>2</sup>) (BONWETSCH et al, 2007), o que seria de se esperar, ao se comparar a diferença de custo de produção de automóveis antes e depois da introdução de robôs na linha de montagem.

Apesar das discussões acerca da substituição do trabalho braçal humano por robôs, o principal fator de impacto deste trabalho foi demonstrar que robôs podiam ser utilizados em tarefas que estavam fora do escopo do trabalho manual (BRELL-ÇOÇKAN, BRUMANN, 2012), com custo e tempo de execução não só adequados, mas competitivos. É importante destacar que este projeto não apresenta o primeiro uso de braço robótico para manipulação e posicionamento de tijolos, sendo que existem exemplos simplificados na década de 1990, contudo, existiam limitações tecnológicas (HELM, 2014) e pouca flexibilidade (GRAMAZIO et al, 2014), sendo que somente com o desenvolvimento dos robôs industriais que a execução deste projeto. Vislumbrando a possibilidade de quebra de uma barreira na produção criativa arquitetônica e as possibilidades envolvidas, a comunidade (principalmente acadêmica, em um primeiro momento) voltou-se para a aplicação de robôs em arquitetura (BRELL-ÇOÇKAN, BRUMANN, 2012).

Isso pode ser notado pelo desenvolvimento na área, sendo que em 2010 (somente em 4 anos após o uso em ETHz), Harvard, Universidade Carnegie Mellon, Universidade de Michigan e Universidade de Stuttgart e outras universidades, já possuíam robôs de manufatura digital (WILLMANN et al, 2016). No mesmo ano, foi fundada a Associação para Robôs em Arquitetura, que culminou nas conferências Rob|Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design (e consequente publicação dos anais da conferência), sendo realizadas a cada dois anos, desde sua primeira edição, em 2012. A introdução do livro da primeira conferência traz que, em 2012, mais de 20 faculdades de arquitetura pelo mundo possuíam braços robóticos industriais e pesquisavam suas aplicações em arquitetura (BRELL-ÇOCKAN, BRUMANN, 2012), sendo um crescimento significativo em somente seis anos.

Desde sua fundação, o grupo Gramazio Kohler Research desenvolveu diversos estudos e aplicações pioneiras de robôs em arquitetura. Durante as visitas técnicas realizadas, alguns pesquisadores apontaram o grupo como sendo um importante ponto focal, seja como fonte de inspiração, seja pela formação de novos pesquisadores na área. O principal foco do grupo se dá nas aplicações diversas de braços robóticos (seja fixo, móvel, em conjunto com outras ferramentas ou até de modo colaborativo, entre vários braços), as quais serão tratadas em maior detalhe.

No projeto de Gantenbein, o grupo utilizou-se de uma estratégia de empilhamento que se pode considerar como 2,5D. Os elementos de cada camada podem ser alterados em termos de posição e orientação somente dentro do plano da camada (2D), contudo, no empilhamento de várias camadas, têm-se a volumetria final tridimensional. Esta estratégia pode ser comparada com as técnicas tradicionais de impressão 3D, no que diz respeito ao uso de camadas 2D para se criar um objeto tridimensional. Esta estratégia foi amplamente utilizada pelo grupo em projetos seguintes, como as “estruturas oscilantes” (2008) e o “Pine Loop” (2009), construídas com um braço robótico adaptado a um container (DORFLER et al, 2016), chamado de ROB (Figuras 28 e 29), inserindo o fator de mobilidade, fácil transporte e construção in loco (HELM, 2014), sem necessidade de montagem. Tal como no projeto de 2006, o assentamento dos elementos foi extremamente rápido e preciso, com duração total de 40 segundos, em média, para cada tijolo, além de um erro de, no máximo, 7mm em relação ao projeto (DORFLER et al, 2016).



**Figura 28 – Montagem de parede utilizando braço robótico ROB**

**Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)**

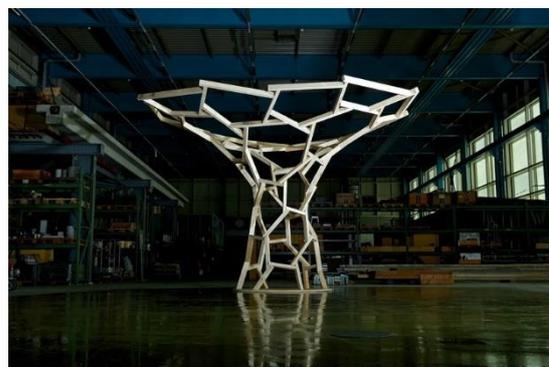
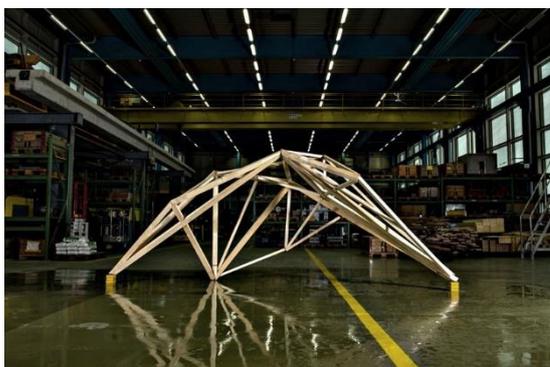


**Figura 29 – Pine Loop completo**

**Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)**

Até 2015, o grupo havia desenvolvido várias aplicações e variações formais referentes à estratégia da montagem por empilhamento 2,5D, seja com tijolo, elementos de madeiras ou outros. A partir de 2015, passou a trabalhar também com posicionamento de elementos no espaço, permitindo rotações em qualquer sentido, com a pesquisa de Otimização Topológica de Estruturas Espaciais em Madeira. Esta pesquisa teve como experimento prático a construção de uma estrutura (Figura 30) montada com

ripas de madeira. Estas foram cortadas por braço robótico e serra automatizada e posicionadas pelo mesmo braço no local correto, para a aplicação manual de um adesivo (SONDERGAARD et al, 2016). O estudo desenvolvendo-se depois para a fabricação de estruturas complexas em madeira e estruturas leves em metal, diversos estudos práticos foram realizados (Figura 31), inclusive a construção da estrutura modular da DFAB House (Figura 32) (GRASER et al, 2020). Esse projeto também apresenta paredes de concreto reforçadas construídas também com braço robótico (GRASER et al, 2020).



**Figura 30 – Estruturas complexas em madeira construídas com braço robótico**

Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)



**Figura 31 – Estrutura em madeira para DFAB House**

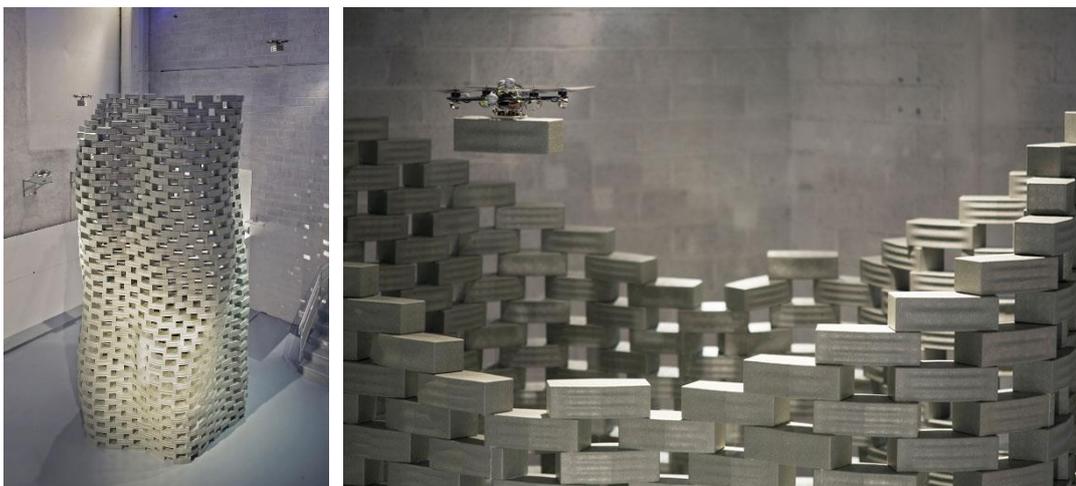
Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)



**Figura 32 – DFAB House finalizada**

Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)

O grupo desenvolveu ainda outras diversas pesquisas na área de fabricação e montagem com o uso de braço robótico, tais como fresagem e corte de isopor por fio quente, impressão 3D de estrutura de reforço, impressão 3D contínua de concreto, estruturas por compressão de fios, dobra de concreto e tantas outras. Além do uso de braços robóticos, deve-se também apontar que o grupo desenvolveu duas linhas de pesquisa com o uso de drones (robôs voadores): arquitetura montada por voo (2011-2012) e construção aérea (2013-2015). A primeira foi realizada em conjunto com Raffaello D'Andrea, baseando-se em um princípio similar à exposição “parede infinita”, nesse caso, utilizando-se de um “enxame<sup>8</sup>” de drones para transportar e posicionar blocos leves (Figura 33), criando uma torre de 6m de altura com forma complexa (GRAMAZIO; KOHLER, 2013). A segunda linha de pesquisa se baseou no entrelaçamento de fios no ambiente tridimensional, também utilizando o enxame de drones, buscando criar uma ponte tracionada (MAYER et al, 2017).



**Figura 33 – Construção de estrutura por enxame de robôs**

**Fonte: (GRAMAZIO; KOHLER, 2013)**

O grupo Gramazio Kohler Research não foi o único desenvolvendo pesquisa de aplicações de robôs em arquitetura. Dentro os diversos grupos de pesquisa, outro que se destaca é o Instituto de Design Computacional e Construção (ICD) da Universidade de Stuttgart, liderado por Achim Menges. Alguns dos projetos mais famosos são os

---

<sup>8</sup> Tradução literal de “swarm”, termo utilizado para o uso colaborativo de diversos drones.

Pavilhões ICD/ITKE (BRELL-ÇOCKAN, BRUMANN, 2012), construídos em colaboração com o Instituto de Estruturas de Edifícios e Projeto Estrutural (ITKE), liderado por Jan Knippers. Em suas primeiras edições, de 2010 e 2011 (Figura 34), o braço robótico foi utilizado para realizar os cortes angulados em peças de compensado, sendo que projetos posteriores, como o Hall de Exibição de Landesgartenschau, acrescentaram encaixes. A edição de 2015/16 explorou o conceito de encaixes e costura em peças de madeira, também utilizando o braço robótico.

Sua edição de 2012 explorou uma inspiração biológica e o potencial da flexibilidade dos braços robóticos, criando um pavilhão através do entrelaçamento de fibras embebidas em resina (Figura 35), buscando criar uma estrutura baseada nos princípios morfológicos do exoesqueleto de uma lagosta (KNIPPERS et al, 2015). Suas edições de 2013/14, 2014/15 e 2016/27 seguiram a mesma estratégia, com variações na inspiração biológica, como aranhas e besouros (DOERSTELMANN et al, 2015(1); DOERSTELMANN et al, 2015(2)). Indo além dos usos tradicionais dos braços robóticos, estes projetos demonstram o potencial de flexibilidade, estando mais uma vez ligados ao potencial de inovação possibilitado pelo uso desta tecnologia, frente uma exploração criativa.

Além dos estudos com braços robóticos, o ICD também realizou estudos com drones, no que diz respeito ao posicionamento de módulos para criar uma estrutura de sombreamento reconfigurável (Figura 36), pela mudança na posição destes módulos pelo drone (WOOD et al, 2018). Outro estudo inovador foi o uso de minibuilders e entrelaçamento de fios para criar estruturas entre dois planos diferentes (Figura 37) (YABLONINA, MENGES, 2018). Ao contrário do entrelaçamento por braço robótico (KNIPPERS et al, 2015) ou por drones (MAYER et al, 2017), os minibuilders só conseguem trabalhar no plano em que se locomovem, porém, por serem móveis e poderem se locomover em superfícies com qualquer orientação, inclusive vertical, apresentam maior liberdade de locomoção que o braço robótico e trabalhar no sistema colaborativo de enxames. Contudo, normalmente aguentam cargas pequenas e podem apresentar limitações de manipulação dos objetos.



**Figura 34 – Pavilhão ICD – ITKE 2011**

Fonte: [www.icd.uni-stuttgart.de/](http://www.icd.uni-stuttgart.de/)



**Figura 35 – Pavilhão ICD – ITKE 2016/17**

Fonte: [www.icd.uni-stuttgart.de/](http://www.icd.uni-stuttgart.de/)



**Figura 36 – Sombreamento reconfigurável**

Fonte: [www.icd.uni-stuttgart.de/](http://www.icd.uni-stuttgart.de/)



**Figura 37 – Entrelaçamento de fios por minibuilder**

Fonte: [www.icd.uni-stuttgart.de/](http://www.icd.uni-stuttgart.de/)

Nestas aplicações nota-se que cada robô utilizado apresenta um alcance, flexibilidade e potencial colaborativo específico, sendo adequado a certas tarefas. Em alguns casos, a aplicação desejada dita qual será o robô mais apropriado. Em outros, estratégias, métodos e hardware são desenvolvidos para que um robô em específico seja capaz de realizar a aplicação desejada. Desta forma, é necessário levar em conta o robô, tarefa, geometria, movimentos e efeito desejado.

Um braço robótico, por exemplo, costuma apresentar destreza na manipulação de objetos, posicionando-o em qualquer posição e direção, dentro do seu raio de alcance. Já um veículo autônomo, como um drone ou minibuilder, pode não apresentar a mesma capacidade de manipulação, contudo, apresenta maior liberdade de locomoção espacial. Robôs cartesianos, por exemplo, costumam apresentar maior

precisão que um cablebot, contudo o cablebot apresenta fácil transporte, montagem/desmontagem e adaptação a diferentes dimensões do espaço (SOUSA et al, 2016).

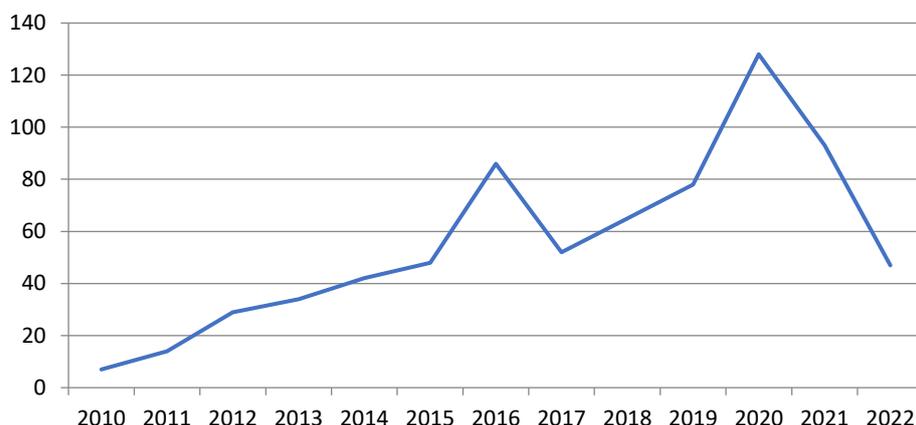
#### 2.1.5. Estudo bibliométrico da literatura

Diversos outros robôs e aplicações em arquitetura foram explorados nas últimas décadas. Buscando mapear estes usos mais recentes, foi realizado um levantamento em bases de dados relacionadas à arquitetura de 2010 até 2022. A definição das bases de dados foi de suma importância, pois termos como “architecture” e “robots”, quando pesquisados em bases como Google Scholar e Elsevier, retornaram resultados relacionados à arquitetura de robôs ou microcontroladores, ao invés de robôs aplicados à arquitetura. Pesquisas combinadas de outros termos nestas bases também levaram a milhares de resultados fora do escopo da pesquisa. Deste modo, foi necessário definir quais bases de dados exclusivas da área da arquitetura que seriam utilizadas. Estas já apresentam um foco em arquitetura, logo, com aplicações relacionadas à exploração criativa e novas possibilidades através do uso de robôs, fornecendo resultados relacionados somente à área.

A primeira base explorada foi a Cumulative Index of Computer Aided Design (CumInCAD). Nesta se realizou uma busca por termos para avaliar a quantidade de artigos relacionados ao tema durante o período (2010 – 2022). A segunda base diz respeito aos anais das conferências Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design (Rob|Arch) e FABRICATE, bem como os artigos da revista Construction Robotics e a edição Made By Robots, da revista Architectural Design. Estes artigos foram analisados em maior profundidade, levantando os robôs utilizados nos experimentos, uso geral e aplicação específica. A relação dos artigos analisados está presente no “Apêndice III – Relação de artigos das bases do estudo bibliométrico”.

Os termos “robot”, “robots”, “robotic” e “robotics” tiveram como resultado 723 artigos entre 2010 e 2022 na base CumInCAD. Dentre estes termos, “robotic” esteve presente em 78% dos artigos, sendo o mais utilizado dentre os quatro citados. Ao se analisar a quantidade de publicações por ano (Gráfico 01), nota-se um aumento das publicações

de 2010 até 2020, com picos em 2016 e 2020. A queda de publicações em 2021 e 2022 pode ter ocorrido em decorrência do adiamento de conferências, suspensão de experimentos e outros fatores relacionados à pandemia do COVID-19.

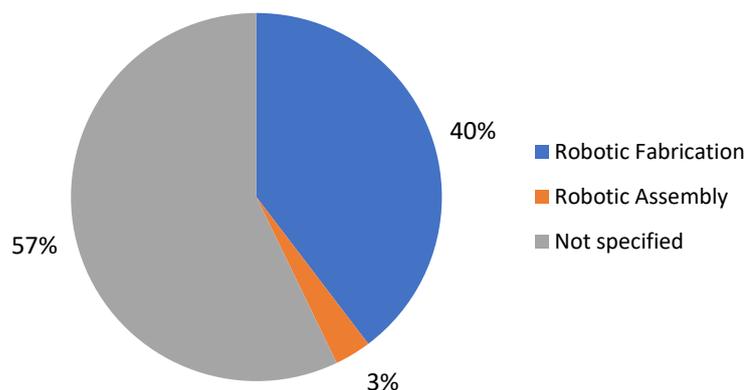


**Gráfico 01 – Quantidade de publicações por ano na base CumInCAD**

**Fonte: do autor**

Considerando a materialidade dos robôs, dentre os 723 artigos, somente 12 continham o termo “soft robotics” (nos anos de 2015, 2017, 2019 e 2020, com três artigos em cada ano). Esta quantidade representa menos de 2% do total. Outras combinações, como “soft robot” não apresentaram resultados. Apesar dos demais artigos não apresentarem o termo “hard robot” ou similares, pode-se considerar que todos os demais tratavam de robôs rígidos, por ser o mais comum utilizado – no que diz respeito à materialidade.

Sobre o seu uso geral, os robôs podem ser utilizados em arquitetura, normalmente, para fabricação ou montagem. Dos 723 artigos da base CumInCAD, 287 contém o termo “robotic fabrication”. Somente 23 artigos entre os 723 contém o termo “robotic assembly”. Os demais artigos não apresentam nenhum dos dois termos ou variações. O gráfico abaixo (Gráfico 02) apresenta a distribuição dos artigos de acordo com estes termos.



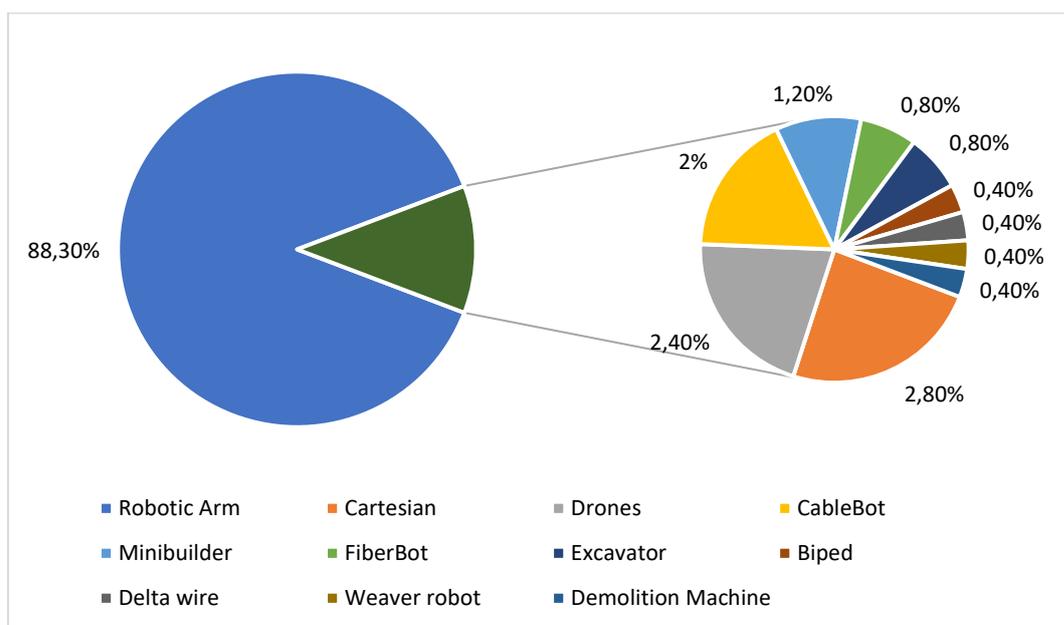
**Gráfico 02 – Distribuição de artigos na base CumInCAD de acordo com o uso geral do robô**

**Fonte: do autor**

O levantamento na base CumInCAD fornece uma visão geral do crescimento no número de artigos nos últimos anos, apesar da queda nos dois últimos anos. Também indica a baixa exploração de robôs macios. Considerando os 43% dos artigos que usam os termos “robotic fabrication” e “robotic assembly”, nota-se que o maior uso dos robôs se dá em processos de fabricação. Os artigos desta base foram analisados somente quanto à sua distribuição no período e termos encontrados.

Os artigos da base composta pelos anais da conferência Rob|Arch (edições de 2012, 2014, 2016 e 2018), anais da conferência FABRICATE (edições de 2011, 2014, 2017 e 2020), artigos da revista Construction Robotics (edições de 2017 até 2022) e a edição Made By Robots da revista Architectural Design, foram analisados em maiores detalhes. No total, considerou-se 247 artigos. Artigos sobre os aspectos teóricos do uso de robôs em arquitetura, desenvolvimento de software e interface do usuário, que não apresentaram nenhum uso prático, foram excluídos da análise pela falta de experimentos e aplicações diretas do robô. É importante destacar que estes congressos, conferências e revistas não apresentam publicações ou edições, necessariamente, todos os anos. Desta forma foi analisado o período completo de 2010 até 2022 destas, sem distinção por ano da publicação.

Nestas publicações se identificou o tipo de robô utilizado e sua categoria, o uso geral (entre fabricação e montagem) e o uso específico. Nos 247 artigos foram utilizados, no total, 11 tipos de robôs. O gráfico 03 apresenta os tipos de robôs utilizados e sua distribuição.



**Gráfico 03 – Distribuição e tipos de robôs utilizados**

Fonte: do autor

O braço robótico foi o tipo mais comum, sendo utilizado em quase 88% dos experimentos. Destaca-se que ele foi utilizado tanto fixo quanto móvel – no caso em associação com veículos autônomos. No geral, os modelos eram industriais sem modificações ou com poucas modificações – normalmente nos efetuadores (end effectors). Logo após se colocam os robôs cartesianos e drones, compreendendo 2,8% e 2,4%, respectivamente, dos experimentos. Estes também são, em geral, modelos comerciais com pouca ou nenhuma modificação de hardware ou efetuadores. Em quarto lugar têm-se os cablebots, presentes em 2% dos experimentos, sendo todos desenvolvidos pelos pesquisadores responsáveis. Deste modo, outros 7 tipos de robôs estão presentes somente em 4,5% dos experimentos, no total.

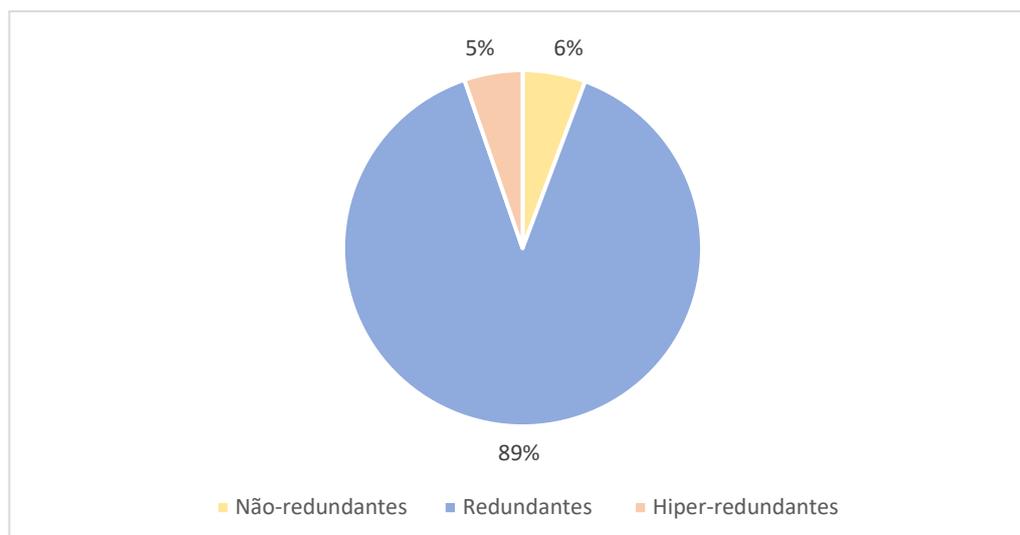
Sobre sua distribuição na classificação proposta pelo autor, não foram encontrados nessa base nenhum artigo relacionado a experimentos utilizando robôs macios. Dentre os robôs rígidos, não foram encontrados robôs hiper-redundantes fixos ou robôs contínuos. Das demais categorias foram encontrados robôs utilizados para os experimentos. A distribuição dos tipos de robôs na classificação proposta por ser vista abaixo (Tabela 03)

Nível 1	Robôs Rígidos					Robôs Macios
Nível 2	Robôs Discretos					
Nível 3	Não-Redundantes	Redundantes		Hiper-Redundantes		
Nível 4	Fixos	Fixos	Movable	Fixos	Movable	
Tipos de Robôs	- CableBot - Cartesiano - Weaver Robot - Delta Wire	- Braço Robótico	- Braço Robóticos (em associação com veículos autônomos) - Escavadora		- Drone - MiniBuilder - Fiberbot - Bipede - Máquina de Demolição	

**Tabela 03 – Distribuição de robôs na classificação proposta**

**Fonte: do autor**

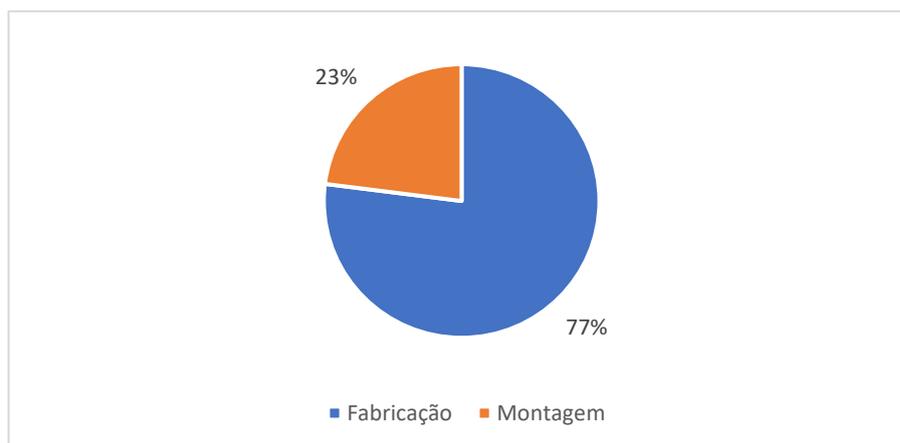
Dentre o nível 3 (não-redundante, redundante e hiper-redundante), distribuiu-se a frequência dos robôs utilizados (Gráfico 04). Como os braços robóticos compunham a maior parte dos experimentos e todos os braços robóticos utilizados se categorizam dentro de robôs redundantes, esta categoria apresentou o maior número de experimentos relacionados. As outras duas categorias (não-redundantes e hiper-redundantes) apresentaram, respectivamente, 6% e 5% dos experimentos.



**Gráfico 04 – Distribuição dos robôs por nível de redundância**

**Fonte: do autor**

Considerando o uso geral dos robôs, estes foram divididos em duas categorias: fabricação e montagem. A fabricação inclui qualquer processo em que a forma ou propriedades do material é modificada, como impressão 3D, fresagem e corte. A montagem inclui qualquer processo em que o objeto ou componente mantém suas características e forma, sendo somente posicionado ou conectado a outros elementos. Dos experimentos analisados, 77% destes correspondem a processos de fabricação e somente 23% correspondem a processos de montagem (Gráfico 05). Deve-se ressaltar que somente um artigo trata do processo de desmontagem. Como este apresenta características muito similares à montagem e por ser um exemplo único nesta base de dados, considerou-o na categoria de “montagem”.



**Gráfico 05 – Distribuição dos robôs de acordo com seus processos**

**Fonte: do autor**

Em aproximadamente 46% dos experimentos de fabricação, como impressão 3D, o produto final não necessitou de processos de montagem, sendo um produto acabado. Nos demais 54%, era necessário algum nível de montagem. Deste modo, mais de 41% de todos os experimentos descritos nestas publicações requereram algum nível de montagem – usualmente manual.

No total, foram identificados 38 usos específicos diferentes. Dentre estes, 18 foram identificados em mais de um artigo e categorizado entre processos de Fabricação e Montagem (Tabela 04). Os demais 20 usos tratam sobre processos de fabricação e foram agrupados na categoria “outros”. Dezenove destes utilizaram braços robóticos e um utilizou uma máquina de demolição.

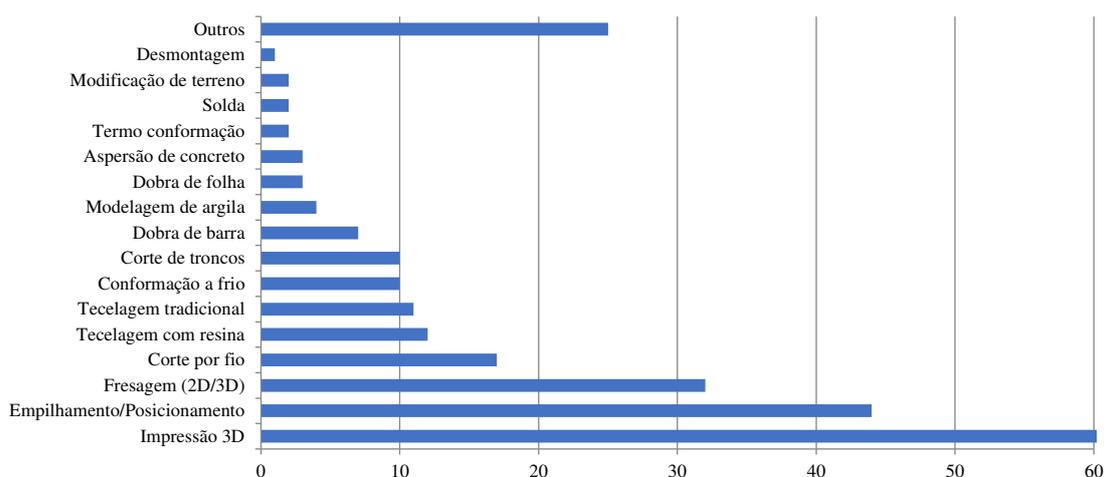
<b>Fabricação:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fresagem (2D-3D): volumes e tábuas</li> <li>- Fresagem (3D): elementos lineares e vigas</li> <li>- Corte de troncos naturais</li> <li>- Corte por fio (quente ou fio-de-serra)</li> <li>- Dobra de folhas</li> <li>- Dobra de barras</li> <li>- Conformação de metal a frio</li> <li>- Impressão 3D</li> <li>- Aspersão de concreto</li> <li>- Modelagem de argila</li> <li>- Termo conformação</li> <li>- Tecelagem com resina<sup>1</sup></li> <li>- Modificação de terreno</li> <li>- Outras</li> </ul>	<b>Montagem:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Empilhamento (2D ou 2,5D)</li> <li>- Posicionamento de objetos (3D)</li> <li>- Tecelagem tradicional<sup>1</sup></li> <li>- Solda colaborativa</li> <li>- Desmontagem</li> </ul>
--	--

<sup>1</sup>Considerou-se que tecelagem tradicional somente posiciona e entrelaça os fios, não mudando suas propriedades e/ou forma, sendo considerado um processo de montagem. Já a tecelagem com resina, apesar de poder também apresentar processos de entrelaçamento, apresenta também a resina, a qual passa por um processo de endurecimento e cura, modificando as propriedades dos fios utilizados. Deste modo, tecelagem com resina foi considerado um processo de fabricação.

**Tabela 04 – Categorização dos usos dos robôs em processo de fabricação ou montagem**

**Fonte: do autor**

Estes usos foram quantificados também de acordo com sua frequência (Gráfico 06). No caso, escolheu-se agrupar alguns usos que apresentavam o mesmo princípio e estavam nas mesmas categorias de uso geral. Deste modo, agrupou-se os dois tipos de fresagem na categoria Fresagem (2D/3D) e o empilhamento e posicionamento também foram agrupados na categoria Empilhamento/Posicionamento.



**Gráfico 06 – Quantidade de artigos identificados por uso**

**Fonte: do autor**

Os quatro maiores usos identificados foram: impressão 3D (26%), empilhamento/posicionamento (17,6%), fresagem 2D/3D (12,8%) e corte por fio (6,8%). Estes usos correspondem a 63,2% de todos os experimentos. Os demais 32 usos correspondem a 36,8% dos experimentos analisados. Há, claramente, uma predominância da impressão 3D dentre as publicações, correspondendo a mais de 1/4 destas.

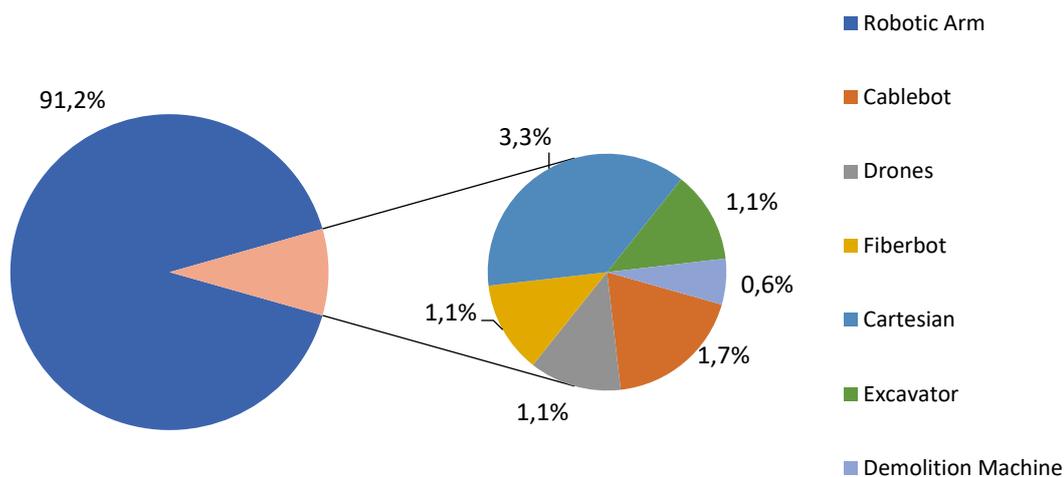
Visando uma melhor visualização da conexão entre os usos específicos e tipos de robôs utilizados, cruzou-se as informações na forma da tabela abaixo (Tabela 05). Os braços robóticos são utilizados em quase todos os usos – exceto na modificação de terreno. Os demais robôs (cablebot, drones, minibuilder, fiberbot, bípede, delta, tecelão, máquina de demolição e escavadora) são usados em somente seis usos. Estes são: empilhamento, tecelagem tradicional, tecelagem com resina, impressão 3D, modificação de terreno e quebra de pedras (outros).

		Braço Robótico	Cablebot	Drones	Minibuilder	Fiberbot	Cartesiano	Bípede	Delta	Robô Tecelão	Máquina de Descolação	Escavadora
Fabricação	Fresagem	✓										
	Corte de troncos	✓										
	Corte por fio	✓										
	Impressão 3D	✓	✓				✓					
	Dobra de folha	✓										
	Dobra de barra	✓										
	Conformação a frio	✓										
	Termo conformação	✓										
	Aspersão de concreto	✓										
	Modelagem de argila	✓										
	Tecelagem com resina	✓		✓		✓						
	Modificação de terreno											✓
	Outros	✓									✓	
	Montage	Empilhamento/posicionamento	✓	✓	✓				✓			
Tecelagem tradicional		✓		✓	✓				✓	✓		
Solda		✓										
Desmontagem		✓										

**Tabela 05 – Usos específicos e tipos de robôs utilizados**

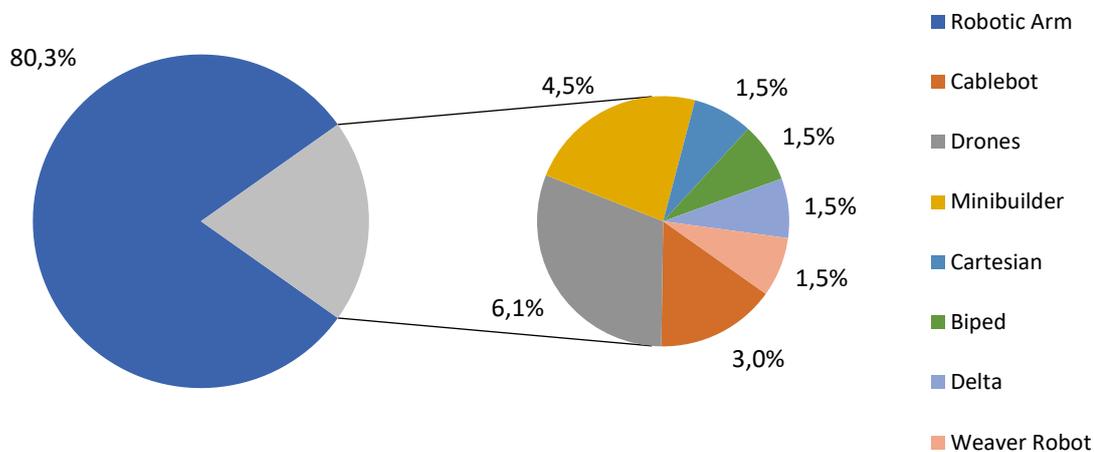
**Fonte: do autor**

Considerando a frequência de uso de cada tipo de robô e seu uso geral, os gráficos abaixo apresentam a frequência de robôs usados nos processos de fabricação (Gráfico 07) e montagem (Gráfico 08). Obviamente há uma predominância em ambos do uso de braço robótico, contudo, é possível analisar os demais robôs utilizados. Nos experimentos de fabricação, o robô cartesiano é o segundo mais utilizado (3,3%), sendo experimentos relacionados à impressão 3D. Nos experimentos de montagem, o drone é o segundo tipo de robô mais utilizado (6,1%), seguido do minibuilder (4,5%).



**Gráfico 07 – Frequência de robôs utilizados em processos de fabricação**

Fonte: do autor



**Gráfico 08 – Frequência de robôs utilizados em processos de montagem**

Fonte: do autor

Estes dados quantitativos apontam algumas tendências e áreas pouco (ou não) exploradas no campo de robôs aplicados à arquitetura. Como apontado, na base CumInCAD foi possível notar crescimento no número de publicações até 2020, com redução para 2021 e 2022, que pode ser devido à crise do COVID-19 ou a mudanças de foco na área. Considerando que os laboratórios estavam em sua maioria fechados durante os anos de 2020 e 2021, é compreensível que não tenha sido possível realizar experimentos práticos, reduzindo o número de publicações relacionadas à aplicação prática de robôs. Neste caso, as reaberturas dos laboratórios e universidades devem permitir a retomada dos experimentos e posterior publicação destes.

Há a possibilidade de estar ocorrendo uma mudança de foco na área também. Sabe-se de diversas limitações atuais relacionadas ao software, métodos de gerar o movimento no caso de robôs redundantes e hiper-redundantes, interface com o usuário e outros problemas. Caso estes sejam considerados como limitantes no desenvolvimento de aplicações robóticas, é possível que haja um foco em solucionar estas questões. Nos últimos anos, tem ocorrido também um crescimento no interesse em inteligências artificiais, inclusive aplicadas à robótica (seja por visão robótica, métodos de Pathfinder, geração de geometrias, métodos colaborativos ou outros), sendo também uma possível área de interesse ligada à robótica aplicada a arquitetura.

Apesar de não terem ocorrido novas edições dos congressos analisados desde 2020, as próximas edições dos Rob|Arch e Fabricate estão agendadas para ocorrer em 2023 e 2024, respectivamente. Nestas conferências, bem como em edições futuras das revistas analisadas, será possível analisar se houve uma mudança no campo de pesquisa ou somente influência dos obstáculos trazidos pela crise do COVID-19.

Além do quantitativo relacionado à frequência de publicações nos últimos anos, foi analisado o tipo de robô utilizado, no que diz respeito à sua materialidade (nível 1 na classificação proposta). O uso de robôs macios em arquitetura, na base CumInCAD, correspondem a menos de 2% das publicações levantadas, sendo ausentes nos congressos e revistas analisados na segunda base de dados. Fora do campo da arquitetura, uma pesquisa no Google Scholar demonstrou que em 2010 foram publicados 67 artigos sobre robôs macios, aumentando para 5.230 em 2022. Este crescimento de publicações anuais de quase 80 vezes indica um forte interesse e potencial no uso de robôs macios em diversas áreas. No CumInCAD não há uma

distribuição que demonstre um crescimento das publicações no período, sendo muito esparsas.

Robôs rígidos normalmente apresentam alta precisão e utilizam materiais que evitam a deformação, sendo previsíveis quanto a sua posição e movimento (RUS, TOLLEY, 2015; TRIVEDI et al, 2008). Em comparação, os robôs macios apresentam menor precisão. Considerando que a maior parte dos experimentos analisados se utilizam de formas complexas e requerem alta precisão, o uso de robôs rígidos em detrimento dos robôs macios se justifica. Por outro lado, os robôs macios apresentam uma capacidade de adaptação maior, podendo se moldar de acordo com o ambiente e uso, e são mais resistentes a impacto (MANTI et al, 2016; TRIVEDI et al, 2008; GARCIA et al, 2007; MUXFELDT et al, 2014). Possivelmente, ambientes insalubres ou de difícil acesso podem se beneficiar do uso de robôs macios, por exemplo. O uso de robôs híbridos (partes rígidas e partes macias) ou semi-macios podem fornecer um equilíbrio entre precisão, adaptação e resistência.

Nos tipos de robôs rígidos utilizados, os braços robóticos foram os mais utilizados. Este fato pode se dar por, como apresentado anteriormente, estes serem, historicamente, os primeiros a serem utilizados na arquitetura. Têm-se como exemplos o caso da Basílica da Sagrada Família, os experimentos dos grupos Gramazio Kohler Research e diversos pavilhões desenvolvidos pelo ICD. Comparando-se com a introdução de robôs dentro do próprio meio industrial, os primeiros robôs também foram os braços robóticos e ainda compõe a maior frota de robôs do mundo. Os dados apresentados na conferência World Robotics 2019, só a instalação de novo braços robóticos em 2018 ultrapassaria em mais de 10 vezes a instalação de outros robôs somados (IFR, 2020). Alguns autores apontam que este amplo uso se dá, principalmente, pela sua flexibilidade no uso de quase qualquer ferramenta e redução do custo operacional (REINHARDT et al, 2016; BRELLCOCKAN, BRAUMANN, 2012; BONWETSCH et al, 2007; BUDIG et al, 2014; MIRJAN et al, 2016). Outro fator pode ser sua disponibilidade comercial e suporte em quesitos como manutenção, software e outros. Seu uso é tão amplo e comum na área de robótica aplicada, que o termo “robô” é usado de modo incorreto como sinônimo de “braço robótico” em diversos casos.

Na exploração das capacidades e limites de um robô, a flexibilidade de um braço robótico é importante, seja pelo grau de liberdade dos movimentos (relacionados com o número de eixos do braço), seja por poder ser equipado com quase qualquer ferramenta ou por trabalhar com diversos materiais (REINHARDT et al, 2016), o que o torna extremamente interessante para o uso em arquitetura (HACK et al, 2014). É possível também que haja uma relação de afinidade pelo braço robótico por este ter características antropomórficas, onde o movimento e as possibilidades deste se assemelham a de um braço humano. Programar os movimentos de um braço robótico, nesse caso, seria buscar imitar os movimentos possíveis do braço humano, permitindo que ele não só realize trabalhos similares aos humanos, mas também os realize com maior precisão, permitindo realizar tarefas que não seriam possíveis manualmente.

Quase todos os artigos que tratam do uso de braços robóticos em arquitetura justificam o interesse destes nas fases de fabricação e montagem pelos mesmos motivos: flexibilidade de uso (seja pelo movimento ou pelas ferramentas utilizadas), precisão, rapidez, custo e segurança (BONWETSCH et al, 2007; BRELL-ÇOÇKAN, BRUMANN, 2012; BUDIG et al, 2014; HACK et al, 2014; REINHARDT et al, 2016; MIRJAN et al, 2016). Seus resultados, de fato, demonstram que os braços robóticos são ferramentas extremamente versáteis e com aplicações práticas dentro da área de arquitetura, principalmente por permitirem desenvolver formas e aplicações que não seriam possíveis realizar manualmente. Além das pesquisas relacionadas aos seus usos, diversas também estão sendo realizadas no âmbito da integração entre braços robóticos e humanos, na forma de robôs colaborativos e outros métodos (BIER, 2018).

Apesar do potencial do uso de braços robóticos, estes, obviamente, apresentam limitações. Podem-se colocar três aspectos principais: mobilidade/área de atuação, volume do braço e custo. Nas aplicações fixas de braços robóticos sua área de atuação está limitada ao alcance do braço. Algumas pesquisas buscam ampliar a área de atuação dos braços, por meio da introdução de outros eixos, como esteiras (BONWETSCH et al, 2006) e eixos verticais (AEJMELAEUS-LINDSTROM et al, 2017), ou por associá-los a outros robôs, como veículos autônomos (HELM et al, 2014). Com esta ampliação de área, grandes movimentos em eixos específicos seriam feitos nestes extras, enquanto movimentos finos e complexos pelo braço robótico.

Para certas operações, como o entrelaçamento de fios, o próprio volume do braço pode se colocar como obstáculo na trajetória, seja pela complexidade da operação ou pelo seu posicionamento. Estes problemas costumam ser endereçados durante a programação do robô, evitando áreas que apresentem esse problema, ou solucionados com o uso de robôs agindo de forma colaborativa, como é o caso do pavilhão ICD/ITKE 2016/2017 (FELBRICH et al, 2017; SOLLY et al, 2018), que utiliza dois braços robóticos e um drone, endereçando tanto o problema do volume do braço quanto de mobilidade. Ainda assim, gerar uma sequência válida de movimentos e sem colisões ainda é um grande desafio na produção por robôs (SONDERGAARD et al, 2016). Dependendo da quantidade de eixos e seus tipos, pode haver também limitação dos ângulos que podem ser fresados (ROBELLER, WEINAND, 2016).

O terceiro limitante para a exploração do uso de braço robótico ainda é o custo. Apesar do baixo custo operacional e diluição do investimento em relação ao ganho de tempo, qualidade e precisão da obra ou uso, o investimento inicial ainda é consideravelmente elevado, dificultando seu acesso. Comparativamente, outros tipos de robôs apresentam um custo muito reduzido, viabilizando, inclusive, seu uso em enxame colaborativo.

No que diz respeito ao uso geral, a maioria dos experimentos analisados tem o foco em fabricação (77%). As informações obtidas pela base CumInCAD também indicam este foco, apesar de ser necessário uma análise mais profunda da base. A predominância de aplicações de fabricação se justifica no processo de produção, no qual é necessário primeiro ter uma peça para que seja realizada a montagem. Apesar de diversos experimentos utilizarem peças padrões, como tijolos (GRAMAZIO et al, 2014; HELM et al, 2014; DORFLER et al, 2016), todos os demais elementos únicos precisam passar pelo processo de fabricação. Contudo, muitos destes experimentos ainda necessitam de montagem em algum nível, sendo necessário a maior exploração dos processos de montagem. O uso combinado de fabricação robótica e montagem robótica pode permitir soluções e exploração de formas mais complexas, ampliando as possibilidades criativas.

Dentro dos usos específicos, o uso mais comum foi a impressão 3D (26,3%). Neste caso, considerou-se desde impressão FDM de polímeros até impressão em metal, argila, concreto e outros materiais. Futuras revisões da literatura podem analisar mais

a fundo estes usos, com distinção entre os métodos de impressão ou materiais utilizados.

O segundo uso mais comum foi o empilhamento/posicionamento (18%). Considerando que os usos relacionados a montagem compreendem 23% dos experimentos, o empilhamento/posicionamento corresponde a quase 80% de todos os experimentos com montagem. Claramente, existem também menos usos (somente 4) relacionados à montagem, em comparação aos 34 usos identificados nos processos de fabricação. Revisões futuras podem também subdividir os tipos de empilhamento e posicionamento de acordo com o tipo de efetor, movimentos e outros fatores relevantes.

Existem duas outras questões que devem ser tratadas no processo de análise destas publicações. A primeira diz respeito à compatibilidade entre o robô utilizado e a sua aplicação. Nota-se que, em certas aplicações, apesar do robô ser capaz de realizar determinada tarefa, ele não é, necessariamente, a melhor opção. É o caso do braço robótico.

Pela sua flexibilidade, braços robóticos foram adquiridos por diversos laboratórios e grupos de pesquisa. Contudo, é utilizado, em vários casos, para operações que subutilizam suas capacidades. A maior parte das pesquisas que incluem o empilhamento de peças (2,5D) trabalha somente com rotações em planos paralelos, sem se utilizar de rotações tridimensionais. Isso se aplica também ao perfilamento de peças, que inclui cortes somente em 2D. Apesar do braço robótico ser capaz de realizar estas tarefas, ocorre uma subutilização dos seus movimentos e uma limitação devido ao seu alcance.

Nas publicações da conferência Rob|Arch, há uma predominância de artigos relacionados aos usos de braços robóticos. Nas duas primeiras edições, todos os usos eram relacionados a braços robóticos, sendo sua maior parte relacionados à fabricação e alguns poucos relacionados à montagem de estruturas. Nas edições de 2016 e 2018, pode-se notar algumas mudanças, como redução na sua aplicação em dobra de materiais, fresagem e corte, havendo um crescimento e foco em uso de braço robótico com impressão 3D, seja utilizando plástico, cerâmica, concreto, metal ou outros. Ao mesmo tempo, desde 2016, podem-se notar pesquisas que trabalharam com outros tipos de robôs e suas possibilidades.

Estes outros robôs (drones, cablebot, minibuilder e fiberbot) apresentam características diferentes dos braços robóticos, se adequando melhor às aplicações propostas por suas especificidades ou sendo desenvolvidos exatamente para estas. O exemplo do empilhamento de objetos (2,5D) consegue demonstrar essa adequação, tendo em vista que foi testado com braço robótico, drones e cablebot. Há, claramente, uma subutilização dos movimentos do braço robótico na execução desta tarefa, além de ser necessário adicionar eixos para ampliar os movimentos do braço de modo horizontal e vertical, dependendo das dimensões finais das peças. Já no caso dos drones, não é necessário a adição de mais eixos ou outras modificações, além de dotá-lo de uma garra para manipulação do objeto, permitindo construir as peças sem uso de estruturas extras. O cablebot, por outro lado, precisa de uma estrutura de apoio, porém essa pode se adequar ao tamanho da peça construída ou ao ambiente, além de seus movimentos se adequarem perfeitamente a operações 2,5D.

Comparações entre estes robôs dependem da aplicação proposta e demais condicionantes, como local, geometria, materiais e outros. Nem sempre é relevante tentar definir qual tem maior flexibilidade se o foco é um uso específico. Os drones, por exemplo, apresentam maior área para atuação, sem necessidade de estruturas extras e podem transitar por espaços menores, se comparados com braços robóticos, além de não precisarem de cabos. Porém, alguns tem baixa autonomia de bateria (apesar de esse fator poder ser solucionado com o enxame de robôs) e, relativamente, baixa capacidade de carga (deve-se atentar que existem drones comerciais com maior capacidade de carga, contudo não se encontrou nas bases de dados aplicações destes em arquitetura). Já os braços robóticos seriam mais adequados para uso de ferramentas como fresas, trabalhar com peças pesadas e por um longo tempo.

Os minibuilders tem ação limitada ao plano de locomoção e poucas funções foram exploradas, como entrelaçamento de fios e impressão 3D (TIBBITS, 2017). Contudo, podem mudar de plano (como subir paredes e se locomover no teto), tendo uma área de atuação grande, são compactos e trabalham também colaborativamente, na estratégia de enxame de robôs.

O cablebot é um robô fixo e apresenta menor grau de liberdade do que um braço robótico tradicional (5 eixos ou mais). Por sua configuração, é capaz de realizar tarefas

2,5D e tem como maior vantagem a adaptabilidade em seu espaço de atuação, pela mudança da posição de seus motores, além de fácil transporte e montagem/desmontagem (SOUSA et al, 2016). Ele já foi utilizado em exemplos de impressão 3D (OXMAN et al, 2014; DUBOR et al, 2018) e empilhamento de blocos (SOUSA et al, 2016). Algumas configurações de cablebots estão presentes na literatura, com variações de dois até doze cabos, como é o caso do Bosscher Contour Crafting (SHAHMIRI, GENTRY, 2016).

Alguns robôs apresentam aplicações de maior especificidade, como é o caso do fiberbot (KAYSER et al, 2018). Este apresenta uma única função, que é criar estruturas tubulares tridimensionais com fibra e resina, dentro de parâmetros muito específicos. Uma aplicação que, apesar de possível, seria difícil de ser executada com um robô de menor especificidade e maior flexibilidade de uso.

Como se pode ver, a compatibilidade entre o robô e aplicação é de extrema importância. A escolha do robô pode limitar ou ampliar a capacidade da aplicação desejada e sua exploração. Levando em conta que estes experimentos foram quase em sua totalidade desenvolvidos em meio acadêmico, há limites relacionados a aquisição de equipamentos específicos e desenvolvimento de robôs, preferência por uso de equipamentos já adquiridos e, também, exploração das possibilidades do robô.

Por outro lado, neste meio, normalmente não há necessidade de uma compatibilização completa, pois em sua maioria, trata-se de experimentos exploratórios e que buscam ultrapassar os limites conhecidos destes robôs e liberdade de exploração criativa. Apesar de todos os indicadores de tempo e custo, nem todos os experimentos analisados se configuram como exemplos de aplicação comercial do uso de robôs em arquitetura.

Este ponto leva à segunda questão sobre as publicações analisadas: estas têm como base, em sua maioria, aplicações não-comerciais. Apesar do posicionamento de tijolos serem muito semelhantes ao processo de construções tradicionais, no âmbito comercial os maiores exemplos de robôs aplicados à arquitetura se baseiam em impressão 3D em larga escala, principalmente de residências. Existem aplicações comerciais de posicionamento de tijolos, contudo ainda pouco aplicadas. Existem ainda outros robôs e aplicações começando a ser utilizadas na arquitetura ou construção, contudo ainda são ínfimas.

As empresas, até o momento, seguem três estratégias de impressão 3D: uso de robô cilíndrico com 3 eixos, braço robótico e uso de robô cartesiano porticado. A primeira é utilizada por empresas como Apis Cor e WASP. A Apis Cor ficou conhecida por ter fabricado em 2017 a estrutura de uma casa de 37m<sup>2</sup> em menos de 24 horas (Figura 38) (APIS COR, 2017). A WASP em 2021 apresentou uma construção de uma casa conceitual impressa em terra, chamada TECLA. A construção ficou pronta em, aproximadamente, 200 horas com 100m<sup>2</sup> de área (WASP, 2021) (Figura 39). Devido às características do robô utilizado, ambas apresentam uma geometria arredondada. Apesar de, em termos de área de piso pelo tempo de impressão da casa TECLA ser maior que da Casa Apis cor (0,5m<sup>2</sup>/h e 1,54 m<sup>2</sup>/h, respectivamente), a casa TECLA apresenta uma exploração formal diferenciada e uso de material considerado inovador na aplicação.



**Figura 38 – Casa Apis Cor**

**Fonte: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)**



**Figura 39 – Casa TECLA**

**Fonte:** <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>

A empresa CyBe utiliza tanto a segunda (braços robóticos) quanto terceira estratégia (robô cartesiano porticado) para realizar a impressão 3D. Os braços robóticos são utilizados tanto de modo estacionário (Figura 40), quando móveis, em colaboração com veículo autônomo (Figura 41). Mesmo com o robô móvel, nota-se algumas limitações no processo de impressão, sendo a impressão das paredes segmentada, de acordo com o alcance do braço (Figura 42).



**Figura 40 – Braços robóticos estacionários para impressão 3D**

**Fonte: CyBe**



**Figura 41 – Braços robóticos com associação a veículo autônomo**

**Fonte: CyBe**



**Figura 42 – Braços robóticos realizando impressão 3D segmentada**

**Fonte: CyBe**

A terceira estratégia é a mais utilizada, não só pela a CyBe, mas por empresas como a ICON, WinSun, KampC, Peri 3D, Alquist 3D, SQ4D, Mighty Buildings, Azure e diversas outras (ALL3DP, 2023). Este método de impressão é muito similar à impressão 3D FDM, já muito difundida. Deste modo, apesar de haver diversas diferenças e peculiaridades, a conversão da tecnologia e familiaridade com alguns aspectos facilita o uso desta. A busca por esta tecnologia levou, inclusive, à fundação da COBOD, uma fabricante de impressoras 3D de concreto, visando sua utilização na construção. A casas conceituais da ICON (Figura 43) e KampC (Figura 44) apresentam impressão in loco, enquanto a WinSun (Figura 45) realiza a impressão de módulos na fábrica, em um processo de pré-fabricação para montagem in loco.



**Figura 43 – Casa Icon**

**Fonte: [www.iconbuild.com](http://www.iconbuild.com)**



**Figura 44 – Casa KampC**

**Fonte: [www.e-architect.co.uk](http://www.e-architect.co.uk)**



**Figura 45 - Casa WinSun**

**Fonte: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)**

Como se pode notar, há uma preferência por robôs específicos, de menor flexibilidade em certos quesitos, mas que sejam mais fáceis de lidar e previsíveis. Como colocado no caso da CyBe, o uso de braço robótico apresenta limitações com a área de atuação, tanto horizontalmente quanto verticalmente. Como colocado anteriormente, há também uma subutilização de suas funções, pois só é trabalhado com impressão por camadas. Pelos robôs cartesianos e cilíndricos serem robôs não-redundantes, existe um fator também de programação que facilita seu uso. No caso do robô cartesiano porticado, a programação pode ter como base o GCode tradicional de uma impressora 3D FDM simples, ao invés do código mais complexo de um braço robótico, facilitando a sua programação.

A empresa ICON aponta que, pelo baixo custo das casas e seu tempo de impressão, este método pode ser utilizado para construir casas populares acessíveis [11]. Contudo, estas estratégias e robôs utilizados apresentam limites, principalmente no que diz respeito à altura, pois seria inviável construir um edifício alto se a estrutura da impressora 3D tiver que ter o mesmo tamanho do edifício (TIBBITS, 2017). No caso do robô cilíndrico, seria possível que ele fosse transportado para a laje do andar concluído, visando construir o próximo. Possivelmente, o robô cartesiano porticado também poderia ser erguido com o edifício.

Até o momento, o problema de edifícios altos está sendo solucionado com estruturas maiores que o próprio edifício. Em 2021, a empresa Peri 3D construiu o primeiro edifício com três pavimentos impresso em 3D (Figura 46) (PERI, 2021). No fim de 2022, foi impressa uma vila pela Dar Al Arkan (Figura 47), o maior edifício até o momento (9,90 m de altura), sendo parte de um projeto de desenvolvimento urbano da cidade de Riyadh (COBOD, 2022). Em ambas as imagens, pode-se notar o tamanho da estrutura porticada necessária para realizar o processo de impressão. Outras soluções ainda não foram encontradas pela indústria.



Figura 46 – Casa de três pavimentos impressa em 3D

Fonte: Peri3D



Figura 47 – Vila sendo impressa em 3D com uso de robô porticado

Fonte: Peri3D

Todas as empresas relacionadas a esta tecnologia buscam vender o produto com base em dois principais fatores: custo e rapidez. Seus sites oficiais e publicações relacionadas a pontam estes fatores, indicando ainda que é uma solução para residências acessíveis (em termos monetários). Alguns ainda apontam os materiais – considerados ecologicamente corretos, de carbono neutro (como a WASP) ou ainda utilizando material local – ou questões térmicas e isolamento. Alguns projetos, como os da WASP e CyBe, apresentaram utilizações que exploram a geometria de forma mais criativa e relacionada às possibilidades da tecnologia. Porém, mesmo nestes casos, o fator de criatividade e liberdade formal não é apresentado como determinante.

Isso pode-se dar por algumas questões, contudo a mais importante diz respeito a tecnologia ainda ser nova e estar no início dos testes. Fatores como adesão de camadas em elementos inclinados, tempo de cura, textura e escoamento do material podem limitar as possibilidades, considerando que estas estruturas estão sendo comercializadas e devem atender às normas locais. No geral, isso ocorre com toda a tecnologia e sua aplicação prática – como o concreto armado. A partir de pequenas experimentações e investimento na tecnologia, deve-se expandir seu uso, alcançando todo o seu potencial.

Além disso, em termos de mercado, a utilização de novas tecnologias se dá quando há uma vantagem clara de se uso. Para a viabilização e captação de mercado, os fatores de custo e tempo são atrativos. A partir da demonstração de uso seguro e validação da tecnologia, há a exploração formal, mesmo que seja mais cara, caso seja vantajoso de algum modo. É o caso das novas lojas pop-up da Dior, em Dubai, impressas pela WASP em 2021 (Figura 48). A impressão 3D permitiu inserir a textura cannage nas paredes, imitando a costura típica de bolsas e outros itens da loja (WASP, 2021). Deste modo, a própria parede da loja torna-se uma propaganda desta.



**Figura 48 – Lojas pop-up da Dior impressas em 3D pela WASP**

**Fonte: WASP**

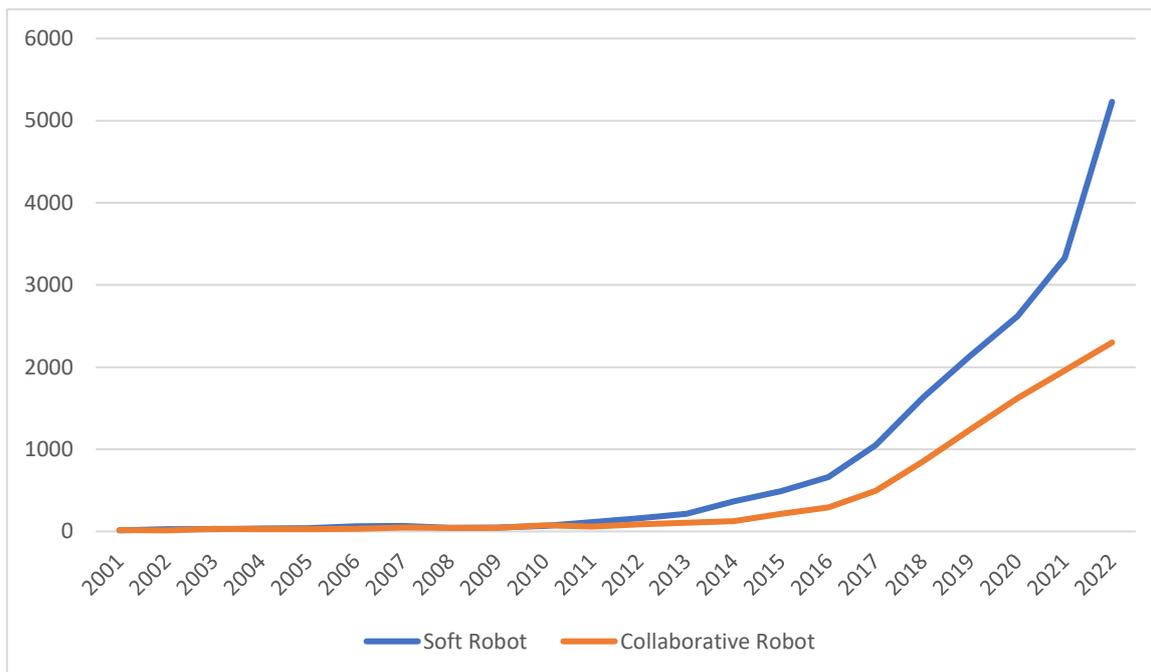
Como se pode notar, existem similaridades e diferenças no uso dos robôs no âmbito acadêmico e comercial. Uma similaridade interessante é o foco de ambas em impressão 3D. Apesar de diferentes justificativas e níveis de desenvolvimento em relação a diversos fatores (estrutura, construção em altura, formal, materiais e outros), ambos os meios parecem validar seu uso. Há uma diferença grande, contudo, nos tipos de robôs utilizados. Como já citado, no meio acadêmico há maior uso do braço robótico para impressão 3D, contudo, no meio comercial prevalece o uso de robô cartesiano porticado. Essa diferença remete novamente à questão de compatibilidade, principalmente para a aplicação comercial.

### 2.1.6. Nichos e lacunas em pesquisa

A partir da classificação propostas e levantamento de usos e robôs aplicados à arquitetura nas bases de dados indicadas, têm-se um panorama de nichos e lacunas em pesquisa na área. Primeiro será realizada uma análise seguindo os níveis e categorias identificados na classificação e, depois, uma análise relacionada a outras tendências, usos e lacunas identificados no levantamento.

Sobre a materialidade dos robôs (nível 1), considerando as 723 publicações da base CumInCAD e as 247 da base de eventos e revistas (somando 970 publicações no total), somente 12 continham o termo “soft robotics”. Claramente há uma predominância da exploração de robôs rígidos em arquitetura, com quase nenhum exemplo de aplicações de robôs macios. Como já apontado, isso pode se dar por questões de precisão. Eles podem apresentar vantagens na manipulação de objeto frágeis ou em ambientes em que a adaptação de forma ao meio seja necessária. Apesar de não haver quase publicações de robôs macios aplicados à arquitetura, nota-se fora do campo da arquitetura um forte interesse neste tipo de robô.

Em termos comparativos, tanto na arquitetura quanto em outros setores há a exploração do uso de robôs colaborativos (principalmente no setor industrial). Estes são mais fáceis de utilizar do que um robô tradicional, com interface amigável, conectividade e uso estilo plug-and-play, priorizando o usuário final e retirando a necessidade de haver um especialista em robótica ou programação. Uma pesquisa comparativa no Google Scholar sobre “soft robot” e “collaborative robot” demonstra a evolução de publicações (Gráfico 09). O crescente número de publicações relacionadas à robôs macios indica o interesse da comunidade científica neste tipo de robô (de 67 artigos em 2010 para 5.230 em 2022), comparativamente ao interesse em robôs colaborativos (de 74 artigos em 2010 para 2.300 em 2022). Como citado, na área de arquitetura, não se seguiu a mesma tendência.



**Gráfico 09 – Número de publicações por ano de acordo com o banco de dados do Google Scholar**

**Fonte: do autor**

Todos os exemplos analisados dizem respeito a robôs discretos (nível 2), sem exemplos de robôs contínuos aplicados à arquitetura. Considerando as atuais aplicações, todas foram solucionadas com robôs discretos, sendo possível que estes atendam à demanda das aplicações desejadas. Robôs contínuos podem ser úteis na manipulação de objetos com geometria complexa. Possivelmente, a manipulação de objetos com geometria orgânica, como pedras em sua forma natural, pode se beneficiar do uso destes, permitindo uma manipulação livre.

Quanto à redundância (nível 3), foram encontrados exemplos em todas as categorias (não-redundantes, redundantes e hiper-redundantes). Há uma predominância dos redundantes, devido ao extenso uso de braços robóticos (seja fixo ou móvel). Como já apontado, o tipo de robô com maior uso é o braço robótico (88% dos usos). Isso pode se dar por questões históricas, comerciais, de flexibilidade em termos de ferramentas ou até por afinidade em relação às características antropomórficas deste tipo de robô. Por suas limitações, existem aplicações que associam braços robóticos com trilhos horizontais (BONWETSCH et al, 2007), eixos verticais (AEJMELAEUS-LINDSTROM et al, 2017) ou com outros veículos autônomos (HELM et al, 2014). Além

disso, a exploração de outros tipos de robôs vem se ampliando nos últimos anos, como se pode notar nas edições mais recentes de eventos e revistas.

No que diz respeito ao uso geral dos robôs, como já apresentado, a maioria dos usos diz respeito à fabricação (77%). Destes, uma grande parte ainda requeria montagem em algum nível, a qual foi realizada em diversas situações de modo manual. Considerando estas situações de montagem manual e o uso de peças únicas, devido à geometria complexa que normalmente estas aplicações utilizam, faz-se necessário o uso de artifícios que auxiliem a mão de obra na montagem, como etiquetagem, realidade aumentada e outros processos. Comparando com a automação pela montagem robótica, a montagem manual costuma apresentar menor eficiência e maior possibilidade de erros. Deste modo, o nicho de montagem robótica deveria ser mais explorado, visando a automação nos três níveis (projeto, fabricação e montagem).

Como já citado, o uso mais comum dos robôs é em impressão 3D (26,3% dos experimentos). Destaca-se que o item “impressão 3D” compreende impressão FDM de polímeros, bem como impressão com metal, argila, concreto e outros materiais. Futuros estudos podem analisar mais a fundo esta aplicação.

O segundo uso mais comum é o posicionamento/empilhamento (23% dos experimentos). Considerando então somente os experimentos de montagem analisados, o empilhamento ou posicionamento tridimensional de objetos correspondem a 80% dos experimentos de montagem. Nestes foram utilizados adesivos (como cola bicomponente ou cimento), pregos e parafusos, ou eram somente empilhados (permitindo sua desmontagem). Em diversos casos, essa aplicação de adesivos ou até parafusos, em alguns casos, foi realizada manualmente (SONDERGAARD et al, 2016), podendo ser automatizada ou ocorrendo uma mudança de estratégia para encaixes, por exemplo. Existem algumas pesquisas atualmente que já tratam desta automação e algumas outras estratégias, contudo ainda podem mais exploradas.

Como citado, há uma questão de compatibilidade entre o robô e a aplicação. Em alguns casos há uma adequação do robô existente e desenvolvimento de estratégias para que aquele robô seja capaz de cumprir uma determinada aplicação. Em outros casos, a partir da aplicação é desenvolvido ou selecionado um robô específico. Em

alguns casos, há uma subutilização do robô ou este limita a aplicação. No caso de operações de empilhamento (2D ou 2,5D), apesar dos braços robóticos serem amplamente utilizados, outros robôs poderiam ser mais eficazes no que diz respeito à área de aplicação e requerer menos eixos (como o cablebot). Não foram encontradas nas publicações analisadas pesquisas que realizem um comparativo da mesma aplicação realizada por dois robôs diferentes, identificando as vantagens, características e dificuldades de cada um.

É interessante destacar que, dos 11 tipos de robôs utilizados, diversos foram desenvolvidos pela própria equipe, visando sua aplicação específica. No geral, os braços robóticos, escavadora, máquina de demolição e alguns drones e robôs cartesianos são modelos comerciais que foram modificados para atender à aplicação desejada. Os demais (bem como alguns drones e robôs cartesianos) não são modelos comerciais.

Nota-se um movimento de mudança dos braços robóticos para estes robôs específicos ou desenvolvidos pelos pesquisadores, pelo número de publicações relacionadas nos últimos anos. Além do fator de compatibilidade citado, existem também questões relacionadas ao custo destes equipamentos, avanços do movimento maker e debates sobre as limitações relacionadas à programação de robôs industriais, que serão tratadas no capítulo “5.1. Robôs utilizados – Desenvolvimento e integração”. Normalmente, estes outros robôs apresentam um custo de hardware menor do que um braço robótico industrial – ou menor até do que outros robôs comercializados, como drones.

No geral, houve uma redução de artigos publicados no CumInCAD e na revista Construction Robotics referentes a aplicações robóticas em arquitetura em 2021 e 2022, se comparados com 2020. Isso pode se dar a problemas relacionados à crise do COVID-19, como citado antes, ou indica uma mudança na área. Apesar de não terem ocorrido diversas conferências desde o início de 2020, com eventos como o simpósio “Robots that build: The extension of man” em 2022, e as conferências Rob|Arch (2023) e Fabricate (2024), será possível analisar o número de publicações e seu teor. Deste modo, será possível avaliar se a redução ocorreu somente pela crise do COVID-19 ou possível mudança de foco na área, visando desenvolvimento de

software ou interfaces de usuário, em detrimento das aplicações. Em suma, foram identificadas cinco principais lacunas de pesquisa:

1. Falta de experimentos explorando o uso de robôs macios, semi-macios ou híbridos em arquitetura;
2. Não foram encontrados artigos sobre o uso de robôs contínuos ou SCARA em arquitetura – apesar de se saber que robôs do tipo SCARA foram usados já na indústria para a impressão 3D de casas;
3. A montagem robótica compreende somente menos de um quarto dos experimentos, apesar de muitos que usam fabricação digital ainda necessitem de algum nível de montagem;
4. Dentro da montagem robótica, os métodos mais usados são o empilhamento e posicionamento 3D, sendo que outros métodos podem ser mais explorados;
5. Somente um experimento empregou robôs para modificar sua forma com o passar do tempo, permitindo a arquitetura a se adaptar às condições ambientais. Em contraste, todos os demais experimentos consideram o projeto final como estático.

Também foram identificadas cinco principais tendências em pesquisa na área:

1. Braços robóticos como o robô mais usado, devido à sua flexibilidade e possibilidade de uso em diversos projetos;
2. Foco nos usos em fabricação robótica;
3. Uso mais comum dos robôs sendo a impressão 3D, a qual nem sempre requer uma montagem posterior;
4. O segundo uso mais comum dos robôs é no empilhamento/ posicionamento 3D;
5. Os robôs redundantes e hiper-redundantes usados eram, normalmente, móveis (exceto braço robótico), demonstrando uma possível tendência de mudança para robôs móveis, tendo em vista, provavelmente, as limitações dos robôs fixos.

Os fatores analisados e os nichos e lacunas de pesquisa identificados levaram à definição do objeto de estudo desta pesquisa. Selecionou-se o uso geral de montagem, por ser o menos explorado e com grande potencial de automação. Devido aos estudos analisados, explorou-se o uso específico de empilhamento/posicionamento, com foco na compatibilidade entre a aplicação e o robô. Para tal, selecionou-se o braço robótico (por seu amplo uso nesta aplicação) e

o cablebot (por ser, potencialmente, de maior compatibilidade no quesito de empilhamento do que o braço robótico). Em termos da estratégia, como citado, diversos experimentos utilizam adesivos, pregos e parafusos para fixação. Nesta pesquisa, explorou-se o uso de encaixes voltados à fabricação digital e montagem robótica, visando redução dos processos envolvidos e pela premissa de que os encaixes podem viabilizar a montagem com os robôs utilizados na pesquisa.

## 2.2. Visitas Técnicas

Como citado no capítulo “Materiais e Métodos”, foram realizadas visitas técnicas a centros de pesquisa internacionais que desenvolvem pesquisa na área de robôs aplicados à arquitetura. Primeiro foi realizado um levantamento dos centros de pesquisa em robôs em arquitetura, com base nos artigos analisados (Figura 49), totalizando 62 centros identificados.

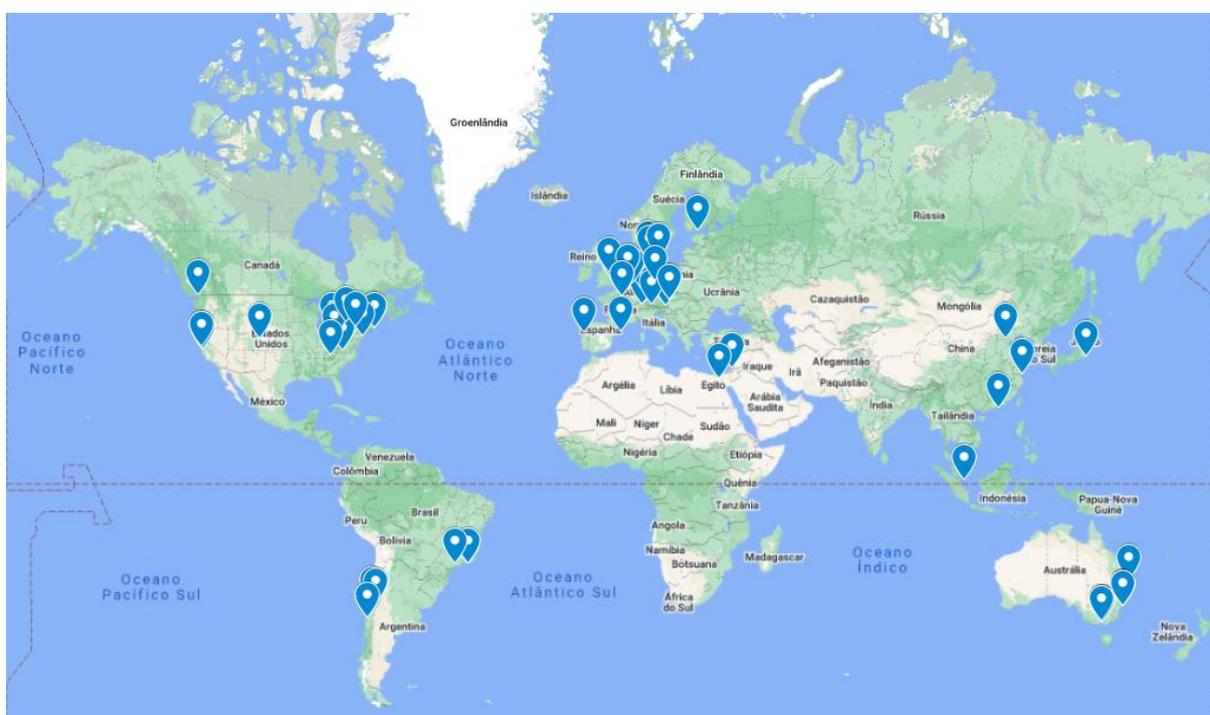


Figura 49 – Centros com pesquisa na área

Fonte: do autor

É importante destacar que nem todos estes são centros específicos e especializados em aplicações de robôs em arquitetura, mas desenvolveram pesquisas na área. Destes, 56 apresentaram artigos nas bases analisadas no estudo bibliométrico, enquanto 6 apresentam pesquisas em desenvolvimento, porém que não foram analisadas no estudo bibliométrico.

Levando em conta a importância histórica destes centros no uso de robôs em arquitetura, questões de disponibilidade e planejamento, foram realizadas visitas aos seguintes laboratórios: (1) Digital Fabrication – Mobile Additive Manufacturing e (2) Building Realization and Robotics (ambos pertencentes à Universidade Técnica de Munique – TUM), (3) Instituto de Design Computacional e Construção (ICD) da Universidade de Stuttgart e (4) Gramazio Kohler Research do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHz).

As visitas aos laboratórios permitiram conhecer o funcionamento dos grupos de pesquisa, as pesquisas em desenvolvimento, os equipamentos disponíveis e outras questões intrínsecas às pesquisas sobre o uso de robôs em arquitetura. Foram notadas também questões referentes à implementação comercial e industrial de robôs em arquitetura para casas ou edifícios de grande porte.

O primeiro fator notado foram os equipamentos disponíveis para uso nas pesquisas. O grupo Gramazio Kohler Research tem disponível o NCCR Digital Fabrication (Centro Nacional de Competência em Pesquisa em Fabricação Digital), o qual conta com sistema porticado com quatro braços robóticos industriais (Figura 50), além de outros braços robóticos menores fixos. Além dos próprios braços, estes apresentam diversos atuadores, desde garras simples ou duplas até extrusoras de argila e concreto, pontas de solda e outros.



**Figura 50 – Braços robóticos no NCCR Digital Fabrication - ETHz**

**Fonte: do autor**

Todos os centros visitados apresentavam, pelo menos, um braço robótico industrial de grande porte. Além de robôs customizados ou atuadores desenvolvidos para uma pesquisa ou aplicação específica. Destaca-se que, apesar do braço robótico ser um robô comum a todos os grupos, outros robôs também foram usados ou desenvolvidos. Entre os robôs identificados nos centros, pode-se citar: braço robótico, veículo autônomo terrestre, veículo autônomo aéreo (drones) e minibot. Destaca-se que os centros apresentam técnicos que auxiliavam no uso ou manutenção dos robôs.

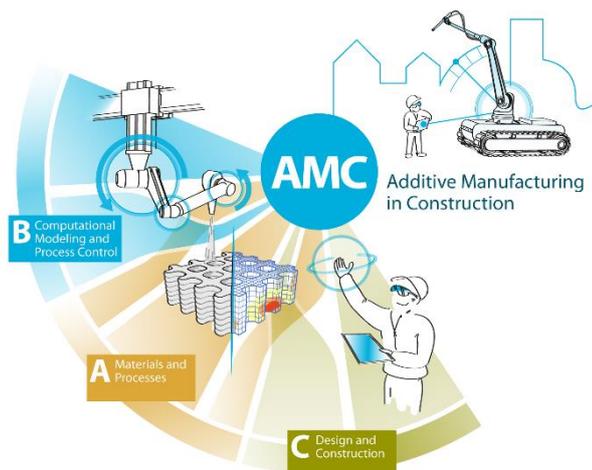
Na visita ao grupo Gramazio Kohler Research em ETHz, foi possível acompanhar a montagem de uma estrutura para a pesquisa “Timber Assembly with Distributed Architectural Robotics” (LEUNG et al, 2021). A pesquisa explora processos de montagem robótica de estruturas em madeira utilizando encaixes, tal como esta pesquisa. Foram, inclusive, identificados problemas e limitações similares entre as duas pesquisas, contudo, a pesquisa em ETHz apresenta uma abordagem nas soluções com base no hardware utilizado (robôs e pinças automáticas). Estas limitações e problemas, bem como as soluções encontradas nesta pesquisa do autor serão detalhadas no capítulo “5. Experimentações: Provas de conceito”, sendo realizado um comparativo entre as duas pesquisas no capítulo “6. Discussão de resultados”.

Além da pesquisa citada, também foi possível acompanhar processos da pesquisa relacionada à impressão 3D por impacto em ETHz. A estratégia busca resolver problemas de adesão entre as camadas em processos de impressão 3D com argila, se assimilando a processos tradicionais de taipa.

Apesar de várias pesquisas serem responsabilidade de um pesquisador (sendo de doutorado ou pós-doutorado), foi observado nas pesquisas acompanhadas e apontado pelos pesquisadores que todas as pesquisas são desenvolvidas com apoio da equipe, e não de forma individual. A pesquisa “Timber Assembly with Distributed Architectural Robotics” (LEUNG et al, 2021), por exemplo, contou com auxílio de um pesquisador que solucionou o percurso do robô e o problema de colisões, bem como outros integrantes que auxiliaram em outros quesitos. Na pesquisa de impressão 3D por impacto, por exemplo, além da pesquisadora principal, havia pesquisadores e técnicos auxiliando no desenvolvimento de equipamento, eletrônica e análise do material.

É importante apontar que algumas pesquisas se inserem em usos práticos comerciais, seja por associação com empresas ou por programas governamentais de fomento do uso de robôs em arquitetura. Na visita ao grupo Digital Fabrication – Mobile Additive Manufacturing foi possível acompanhar alguns processos do robô de impressão móvel aditiva. A pesquisa busca métodos e estratégias de realizar a impressão 3D em argila, seja para estruturas finais ou para o molde de estruturas in loco, visando seu uso prático.

A pesquisa de impressão móvel aditiva desenvolvida em TUMm, se insere do programa AMC TRR 277. Este é um programa do governo alemão, mais especificamente da região da Baviera, o qual busca viabilizar e explorar o uso de fabricação e montagem robótica na área de arquitetura e construção, apresentando três setores: (A) materiais e processos, (B) modelagem computacional e controle de processos e (C) design e construção (Figura 51).



**Figura 51 – Diagrama do programa AMC TRR 277**

Fonte: <https://amc-trr277.de/>

Devido ao objetivo das pesquisas e, possivelmente, das associações e financiamento destas, algumas soluções exploradas se focavam no aspecto construtivo e outras no aspecto arquitetônico, ou seja, exploração criativa. É importante destacar que, no caso dos usos com foco na construção, o foco era o robô como um auxiliar do trabalhador (em um processo colaborativo com a mão de obra humana) ou visando suprir a falta de mão de obra humana. E é importante destacar a diferença sociocultural dos países onde estes centros estão, com falta de mão de obra na construção, como será explorado no próximo capítulo.

Seguindo esta situação, em todas as visitas os pesquisadores apontaram que não é uma questão de se vai ocorrer o uso de robôs na construção civil, mas sim quando e como. Os robôs relacionados a impressão 3D em concreto, por exemplo, já são utilizados por algumas empresas de construção, com tendência a crescimento, como pode-se notar na revisão da bibliografia

Devido ao cronograma dos laboratórios Building Realization and Robotics e ICD, o foco se deu em compreender as questões de pesquisa, não sendo possível acompanhar nenhum projeto em desenvolvimento.

Além das questões intrínsecas às pesquisas ou sua aplicação comercial, outros quesitos ligados aos robôs em si, programação e interface foram identificadas durante as visitas. Segundo alguns pesquisadores, ainda existem muitas limitações das

capacidades robóticas. Apesar da precisão atualmente obtida por braços robóticos e outros robôs, estes ainda são muito imprecisos e limitados em relação a certas capacidades humanas. Estas colocações – bem como resultados obtidos nesta pesquisa – apontam que os robôs apresentam características específicas que são mais aptas a realizar determinadas tarefas, enquanto os humanos apresentam outras características, que os tornam mais aptos a outras tarefas.

Apontou-se também que, apesar do braço robótico apresentar grande precisão em repetibilidade dos processos e movimentos, em função do seu uso industrial, este não apresenta a mesma precisão ao realizar novos processos, como é o caso da montagem robótica em arquitetura, colocando-se como um paradoxo o seu uso nesta aplicação.

Sobre a questão de interface, os softwares e interfaces existentes possuem um foco industrial. Em muitos casos, há uma repetibilidade do movimento do robô. A biblioteca COMPAS, citada anteriormente, auxilia neste caso, mas não soluciona os problemas de interface. Atualmente, a maior parte das pesquisas apresentam especialistas em programação, que utilizam scripts para organizar os processos de troca de dados entre o modelo digital e o robô. Em todos os grupos de pesquisa, pode-se notar a presença de equipes multidisciplinares e laboratórios com ênfase em robótica aplicada à arquitetura e construção.

Como se pode notar, apesar das diferenças nas pesquisas, todas as pesquisas que utilizam robôs apresentam algumas características em comum – ou necessidades. Algumas limitações ou dificuldades parecem também ser comuns a todas estas pesquisas, apesar de elas serem resolvidas de diversos modos nos diferentes centros de pesquisa, ou até, para cada pesquisa em específico. A descrição detalhada das visitas técnicas, pesquisas acompanhadas e demais questões analisadas podem ser encontradas no “Apêndice I – Visitas Técnicas”.

### 3. Experimentação: Provas de conceito

A etapa de experimentação (segunda etapa) é composta pelo desenvolvimento de um cablebot (fase 3), integração entre os robôs utilizados, método de montagem e modelos usados (fase 4), adaptação de encaixes visando a fabricação digital e montagem robótica (fase 5) e aplicação dos métodos nas fases anteriores em provas-de-conceito (fase 6). Através destas fases, têm-se a integração do projeto com os aspectos de fabricação e montagem, possibilitando avaliar como as questões projetuais influenciam e viabilizam a montagem robótica.

Como indicado na revisão bibliográfica e análise quantitativa, o braço robótico industrial se coloca como o tipo de robô mais utilizado nas aplicações acadêmicas. Normalmente a justificativa se dá pelo seu uso na indústria e por sua flexibilidade. Apesar destes pontos, nota-se que nas aplicações comerciais de robôs em arquitetura, em poucos casos são utilizados os braços robóticos, normalmente com robôs mais específicos a determinadas aplicação – como é o caso de impressão 3D de concreto com robô cartesiano porticado. Alguns pontos podem ser levantados em relação a estas escolhas, como: compatibilidade entre o robô e sua aplicação, flexibilidade de uso frente a múltiplas aplicações, custo e operabilidade.

A compatibilidade e flexibilidade foram avaliadas frente aos experimentos realizados de montagem, comparando o braço robótico com o cablebot. Considerou-se a aplicação, área de atuação e precisão.

Quanto ao custo destes robôs, no geral os braços robóticos industriais são ainda os mais custosos. Apesar de na primeira edição da conferência Rob|Arch ser apresentado que um braço robótico em 2012 custava 70% a menos do que em 1990 (BRELL-ÇOCKAN, BRUMANN, 2012), em um levantamento realizado em 2018 dentro dos braços robóticos industriais comercializados no Brasil, o UR3 da Universal Robots, um braço robótico colaborativo de baixo alcance e carga (0,5m e 3kg), apresentava um custo em torno de R\$ 150.000,00. Um braço robótico similar ao utilizado em algumas das aplicações levantadas (Kuka KR 50 R2100, com alcance de 2,1m e carga de 50kg) apresentava um custo em torno de R\$340.000,00.

Existem opções educacionais de braços robóticos de seis eixos, normalmente com menor alcance ou carga que o UR3. O braço Svenzha é um exemplo, com alcance de 0,63m e carga de 1,36kg, com um custo de, aproximadamente, R\$30.000,00. Outra opção é o MyCobot Pi da Elephant Robotics, com alcance de 0,28m e carga de 0,25kg, com um custo final de, aproximadamente, R\$5.300,00.

Apesar do barateamento nas últimas décadas e maior gama de opções, os braços robóticos ainda apresentam um custo substancial. O segundo tipo de robô de maior custo médio é o drone. Um drone doméstico comercial tem valor entre R\$200,00 e R\$5.000,00. A maior parte dos demais robôs levantados apresentam um custo médio menor, ainda mais considerando que foram desenvolvidos pelos próprios grupos de pesquisa. Considerando a realidade de diversos centros de pesquisa, os braços robóticos ainda requerem um alto investimento inicial, que impede seu uso de modo mais amplo, por exemplo, no ambiente acadêmico brasileiro.

Ao mesmo tempo, houve nas últimas duas décadas um amplo desenvolvimento da cultura Maker, que visa à aplicação prática de habilidades e conhecimentos em eletrônica e robótica, além de outros nichos, e sua democratização, com ampla divulgação de projetos open-source e troca de conhecimento (NASCIMENTO; POLVORA, 2018). Este desenvolvimento ocorreu em conjunto com iniciativas como os FabLabs, iniciados pelo Center for Bits and Atoms (CBA), do MIT Media Lab, sendo que existem, atualmente, mais de 1.750 FabLabs em mais de 100 países (fablab.org). Em conjunto, está acontecendo a 4ª Revolução Industrial, identificada pelos sistemas ciber-físicos e internet das coisas (IoT) e impulsionada pelo desenvolvimento e barateamento de sensores, microcontroladores e computadores, sendo que nunca foi tão fácil criar e programar um robô (MARIO et al, 2016).

Um grande exemplo do impacto de um robô de baixo custo foi o Projeto RepRap, que teve início na Universidade de Bath, buscando uma impressora 3D de baixo custo (JONES et al, 2011). Com a queda da patente sobre impressora 3D FDM, em 2009, e os desenvolvimentos de microcontroladores como Arduino, o projeto introduziu o modelo RepRap Mendel e, posteriormente, a Prusa i3, nos quais se baseiam a grande maioria das atuais impressoras 3D FDM comercializadas. O baixo custo destas permitiu o rápido desenvolvimento e disseminação.

Diversas pesquisas e artigos indicam a busca por robôs de baixo custo nas mais diversas áreas de aplicação, seja pelo desenvolvimento de novas tecnologias, desenvolvimento de robôs específicos ou através de projetos com base em modelos ou estratégias da cultura Maker. No caso dos braços robóticos, por exemplos, alguns artigos apontam projetos DIY de braço robótico com sete eixos com custo de U\$4.135,00, frente a modelos educacionais de 14 mil dólares e modelos industriais de mais de 100 mil dólares (QUIGLEY et al, 2011). Outros projetos de braços robóticos DIY, normalmente de cinco eixos, apontam custos a partir de U\$500,00. Obviamente, diversos desses projetos apresentam menor precisão e carga que os modelos industriais ou educacionais, porém outros buscam se equiparar (QUIGLEY et al, 2011; BCN3D).

Tal como no caso das impressoras 3D, certas tecnologias apresentam alto custo em decorrência de patentes ou processos específicos, contudo, o princípio do braço robótico e outros robôs existem a tempo o bastante para não serem limitados por patentes – exceto casos específicos. Existe, contudo, custos e limitações de hardware. Todos estes robôs apresentam motores ou atuadores pneumáticos, além de drivers, fonte, microprocessador e sensores, com capacidades e custos variáveis. Um motor de passo NEMA 17 para impressora 3D apresenta um torque de 2,2kgf.cm, sendo adequado para movimentar pouco peso, com o auxílio de guias lineares, tendo um custo médio de R\$90,00. Comparativamente, um motor de passo de alto torque NEMA 34 para fresadora CNC apresenta um torque de 120kgf.cm, visando pesos maiores e torque para garantir a precisão frente à fresagem de materiais duros, tendo um custo médio de R\$700,00. Do mesmo modo, um driver para motor de passo de impressora 3D (A4988) tem um custo de R\$16,00, frente os R\$250,00 de custo de um driver para fresadora CNC (Dm556).

Como se pode notar, maiores capacidades de carga e dimensões exigem componentes de maior capacidade e, conseqüentemente, de maior valor. Obviamente que é possível, por exemplo, utilizar um motor de passo de impressora 3D para fazer um braço robótico, mas este terá dimensões reduzidas e carga muito abaixo do que utilizando um motor de passo para fresadora CNC. Deste modo, existe um fator de custo relacionado diretamente aos componentes, requisitos e uso do equipamento.

Além do fato de custo, existem também debates sobre a programação destes robôs. Normalmente, os robôs industriais apresentam programação estática e base no fluxo industrial, sendo que os robôs com base em arduino e outros apresentam estratégias e programas flexíveis, permitindo adequar a programação e estratégias às necessidades e fluxo de trabalho do programador (BRAUMANN; BRELL-COLÇAN, 2012). Na indústria, a programação se baseia em uma sequência de pontos e operações no espaço, que o robô segue a cada ciclo, não sendo adequado ao fluxo de trabalho da arquitetura (BRAUMANN; BRELL-COLÇAN, 2012). Modelos com base na flexibilidade e adaptabilidade de programação são mais adequados ao uso em arquitetura. Pode-se comparar à habilidade de produção de uma impressão 3D FDM, a qual utiliza um GCODE para transmitir as coordenadas e comandos para a máquina. No que diz respeito à área de arquitetura, robôs de programação flexível, com baixo custo, visando requisitos de montagem e fabricação, seriam ideais.

Considerando as questões levantadas de custo, programação, flexibilidade e outras, selecionou-se o uso do braço robótico educacional de baixo custo e o cablebot para realizar os experimentos de montagem. O braço robótico MyCobot Pi é capaz de simular os movimentos e características de robôs industriais em escala, sendo perfeito para realizar a comparação de montagem com o cablebot. O cablebot, por sua vez, apresenta um baixo custo e flexibilidade de área, além do seu funcionamento ser adequado à montagem por empilhamento. O cablebot foi concebido e desenvolvido pelo autor, desde a fabricação de elementos até a adaptação da programação.

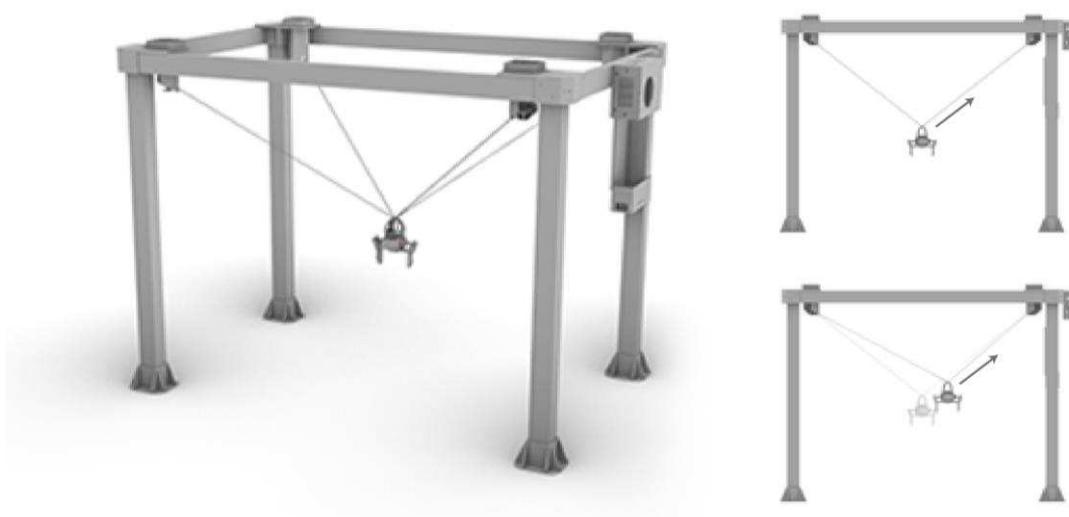
### 3.1. Robôs utilizados – Desenvolvimento e integração

Como citado, foram usados na pesquisa um cablebot (que foi desenvolvido pelo autor) e um braço robótico educacional (MyCobot Pi). O cablebot foi fabricado e construído pelo autor, sendo o processo descrito no próximo capítulo. O braço robótico MyCobot Pi é do tipo plug-and-play, não sendo necessário alterar o seu hardware ou software nativo. Contudo, foi necessário fabricar uma garra personalizada para realizar os experimentos, como descrito no capítulo “5.1.2.1 Garra personalizada”.

Os robôs apresentam características de movimento diferentes, além de características de hardware e software diferentes. Deste modo, cada um apresentou um fluxo de integração com o modelo paramétrico, levando em conta estas características e o movimento dos robôs. Cada método de integração conta com formatos e fluxo diferentes, como se verá nos respectivos itens referentes a cada robô.

### 3.1.1. Cablebot

Cablebots são robôs que utilizam cabos para movimentar o atuador, similar a algumas spidercams utilizadas em estádios de esportes. Estes cabos conectam o atuador (que pode ser uma cabeça de impressão, garra ou outro) a motores. Estes reduzem ou aumentam o comprimento dos cabos permitindo movimentar o atuador (Figura 52). A relação entre o comprimento dos cabos e o movimento do atuador varia de acordo com a quantidade de motores e cabos, a disposição dos motores e dimensões da área de atuação. Foram identificados na bibliografia dois principais usos, sendo a impressão 3D (sendo de pequeno e grande porte) e o empilhamento de bloco (2,5D), que serão tratados nesta seção.



**Figura 52 – Conceito e funcionamento do cablebot**

**Fonte: do autor**

Devido ao seu funcionamento e hardware, os cablebots podem ser facilmente adaptados a diversos ambientes e dimensões, se adequando à área de atuação (SOUSA et al, 2016). Ao mesmo tempo, são também de fácil montagem e desmontagem e transporte (SOUSA et al, 2016). Estas características tornam o cablebot interessante para aplicações de montagem como o empilhamento 2,5D de blocos.

O cablebot se classifica como um robô não-redundante (Figura 53), apresentando uma única configuração de seus membros para cada posição possível. Em termos de planejamento do caminho e posicionamento de peças, o fato de ser não-redundante apresenta facilidade em relação ao braço robótico no quesito de programação e planejamento. Definindo a sequência por camadas (empilhamento 2,5D) e uma distância segura para os movimentos, não se deve afetar as peças e camadas já posicionadas durante o processo de montagem.

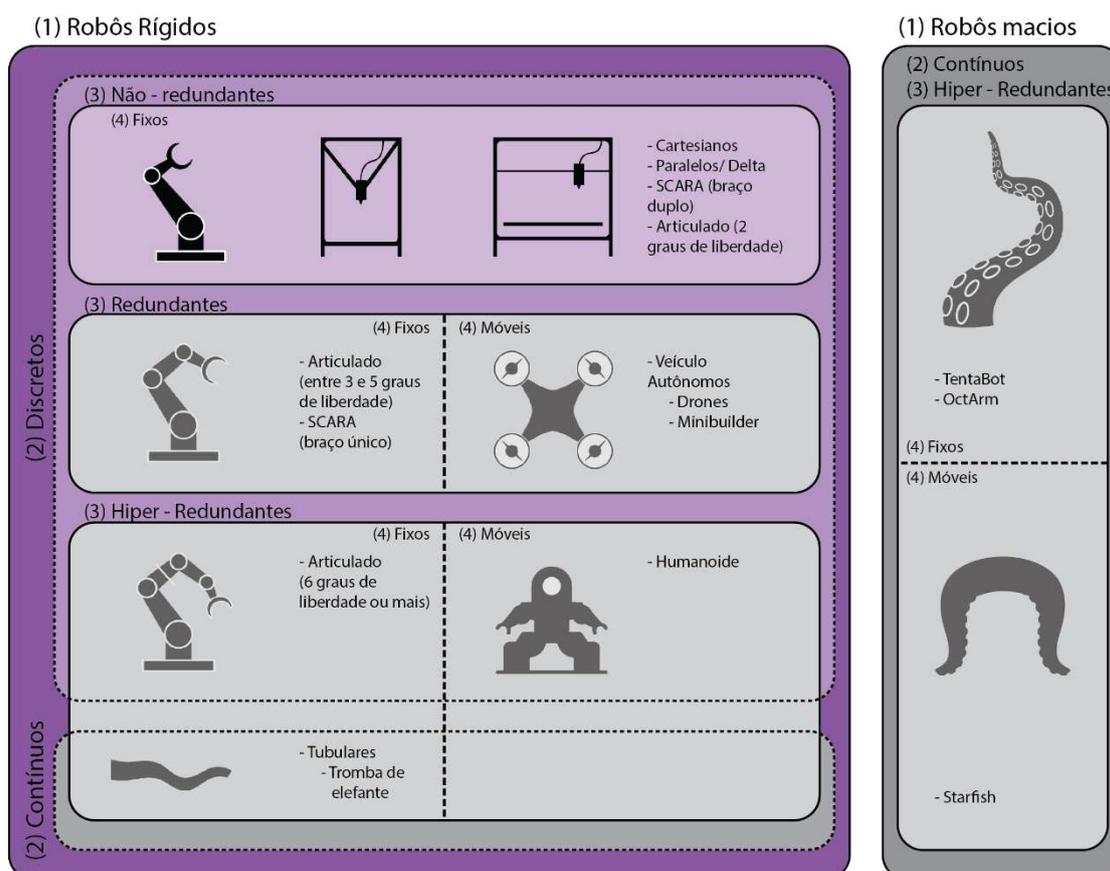


Figura 53 – Identificação do cablebot na classificação proposta para robôs

Fonte: do autor

É importante destacar que, por trabalhar com cabos tensionados pelo peso do atuador (ou seja, tensão gerada pela gravidade), este tipo de robô apresenta algumas limitações. O cablebot não é normalmente adequado ao posicionamento de peças em 3D e, mesmo no caso do empilhamento, deve-se atentar ao centro de massa da peça, pois o deslocamento do centro de massa pode causar imprecisões no movimento. O mesmo cuidado deve ocorrer durante o projeto do atuador, como está descrito durante a construção do cablebot.

#### *3.1.1.1. Conceitos e construção*

O cablebot desenvolvido nesta pesquisa foi inicialmente concebido pelo autor com inspiração nas spidercams, utilizando quatro cabos para movimentar o atuador. Após a concepção original, buscou-se exemplos similares na bibliografia. Estes foram comparados em termos de aplicação e configurações com o projeto original, visando melhorias neste e soluções antecipadas de limitações.

Os cablebot são robôs que se movimentam com o uso de cabos. Estes se baseiam em sistemas usado em câmeras para a indústria cinematográfica e esportiva (SOUSA et al, 2016), como a spidercam (Figura 54) e cablecam (Figura 55). Tradicionalmente, cablecams são câmeras que estão ligadas a um cabo ou dois cabos paralelos, podendo se locomover em eixo somente, enquanto spidercam são câmeras ligadas a quatro cabos, permitindo se mexer em todas as direções. No caso dos robôs aplicados à arquitetura, a uma denominação comum deles de “cable-robots” ou “cablebots” (SOUSA et al, 2016; SHAHMIRI, GENTRY, 2016).



Figura 54 – SpiderCam

Fonte: [www.spidercam.tv](http://www.spidercam.tv)



Figura 55 – CableCam

Fonte: [www.cinecrane.com](http://www.cinecrane.com)

Através da redução ou aumento do comprimento dos cabos, o atuador pode subir, descer ou realizar movimentos laterais, permitindo que atue em todo o volume delimitado pelo cablebot. No caso do cablebot concebido para esta pesquisa, a garra do atuador pode rotacionar 180° em sentido horário ou anti-horário, permitindo posicionar a peça em qualquer ângulo no plano (Figura 56).

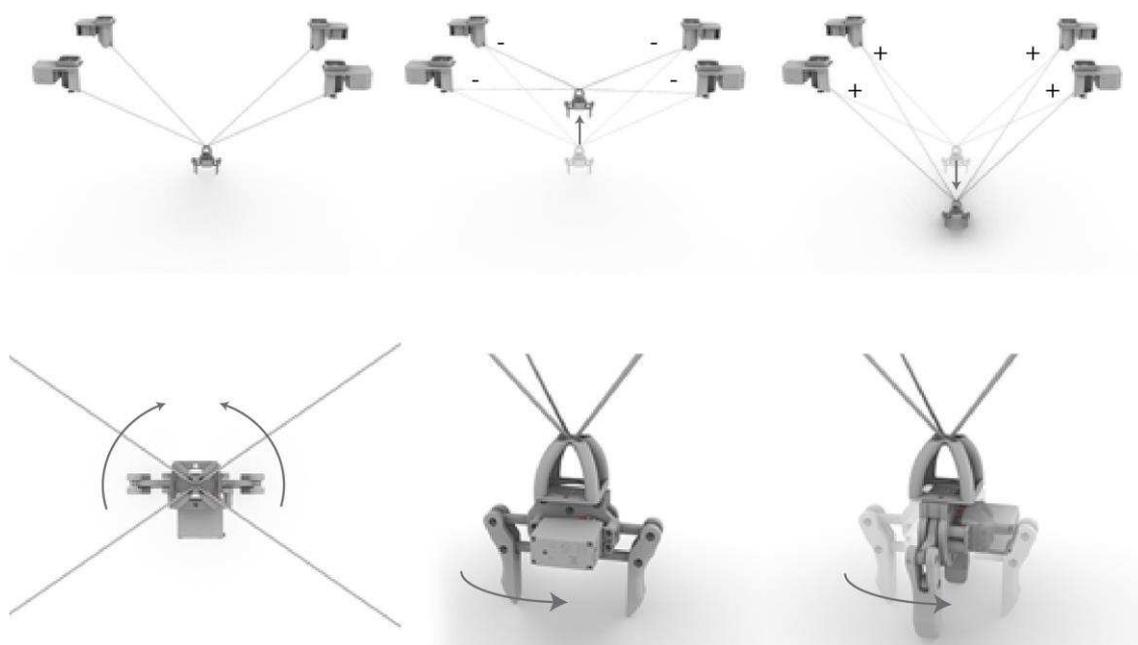
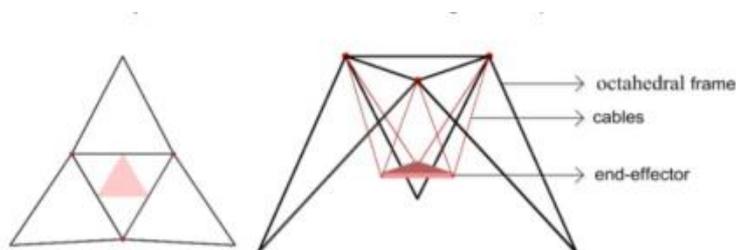


Figura 56 – Movimentos e rotação da garra do cablebot

Fonte: do autor

A bibliografia traz diversas configurações de cablebots, visando sua estabilidade, precisão, área de atuação e uso. Cada configuração apresenta suas vantagens e limitações, podendo ser usados para diferentes aplicações. Foram encontradas seis configurações básicas: (1) NIST Spider, (2) Flacon – 7, (3) WARP, (4) MACARM, (5) BOSSCHER e (6) SPIDERobot.

O NIST Spider (Figura 57) apresenta seis graus de liberdade e a área delimitada pelos motores é quase toda útil, contudo, coloca-se que existem problemas relacionados ao alto grau de restrição, pela quantidade de cabos, e suscetível a distúrbios do ambiente (SHAHMIRI, GENTRY, 2016). Apesar da área delimitada pelos motores ser quase toda útil, sua forma é triangular, e considerando que os terrenos, normalmente, têm formas quadriláteras, a forma triangular se colocaria como um empecilho para sua aplicação para construção in loco. No caso, ou o cablebot teria de ser montado em uma área maior que o terreno, visando sua montagem em toda a área, ou seria necessário subdividir a montagem em setores.



**Figura 57 - NIST Spider**

**Fonte: (SHAHMIRI, GENTRY, 2016)**

O FLACON-7 (Figura 58) se baseia em um formato retangular, inserindo uma barra rígida para resolver problemas de estabilidade frente à velocidade de movimento. Desta forma, conseguiu-se chegar a velocidades de montagem maiores do que sem a barra (SHAHMIRI, GENTRY, 2016). Neste caso, o uso da barra rígida reduz vibrações causadas pelos movimentos, permitindo maiores velocidades. Contudo, seu uso reduz a carga total e área de trabalho.

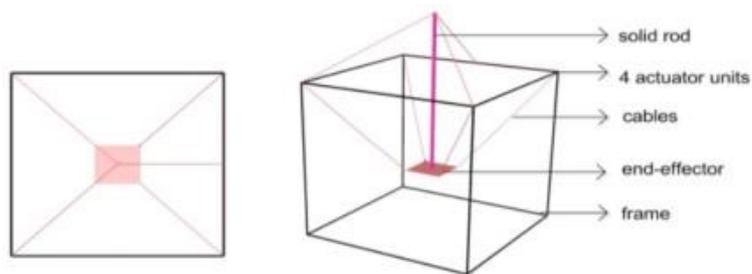


Figura 58 - FLACON – 7

Fonte: (SHAHMIRI, GENTRY, 2016)

O WARP, MACARM e BOSSCHER (Figuras 59, 60 e 61) se baseiam em diferentes configurações de cabos e motores, com base em uma forma retangular. Eles apresentam de seis a doze cabos, conseguindo grande estabilidade, precisão e velocidade. Contudo, os cabos extras reduzem significativamente a área de trabalho, devido às colisões pelos cabos, ou necessitam de barras verticais para controle dos cabos (SHAHMIRI, GENTRY, 2016).

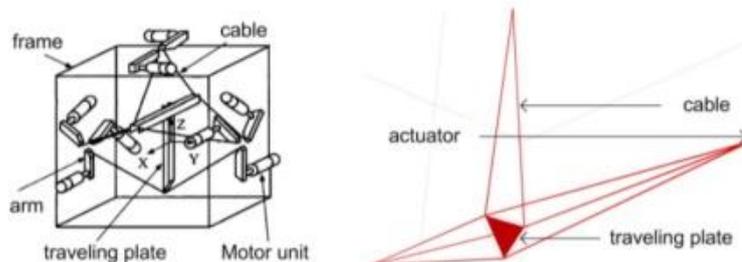


Figura 59 - WARP

Fonte: (SHAHMIRI, GENTRY, 2016)

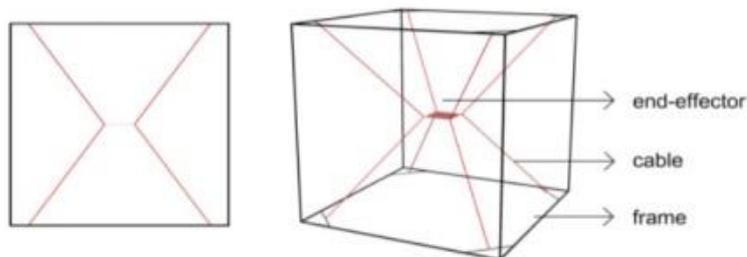
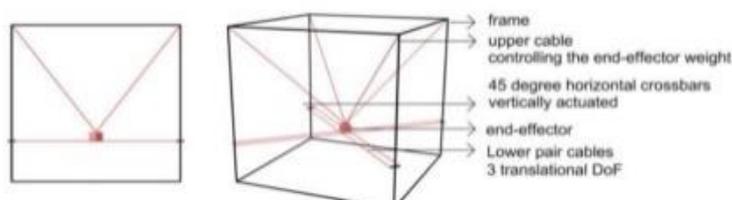


Figura 60 - MACARM

Fonte: (SHAHMIRI, GENTRY, 2016)



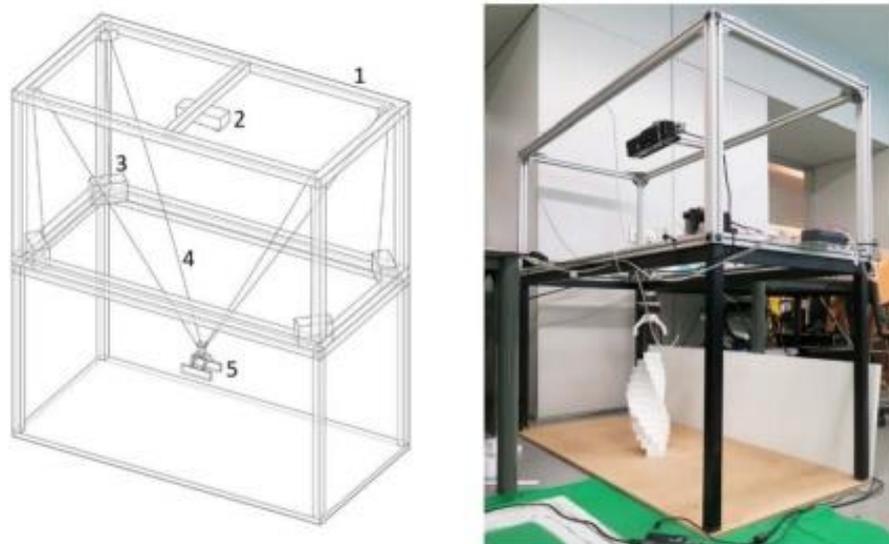
**Figura 61 - BOSSCHER CONTOUR CRAFTING**

Fonte: (SHAHMIRI, GENTRY, 2016)

O aumento da complexidade dos cablebot citados apesar de visar melhorar questões de precisão, vibração e velocidade, afeta a área de trabalho destes ou reduz outros aspectos flexíveis. Com aumento de motores, barras e demais eixos, a montagem, desmontagem e transporte apresenta uma complexidade maior do que o cablebot concebido para a pesquisa.

Durante a revisão, foram também identificados outros robôs que utilizam o mesmo princípio do cablebot com quatro cabos concebido pelo autor. Eles apresentam variações no nome de acordo com o autor, sendo chamados de SpiderBot, SPIDERobot e CableBot (OXMAN et al, 2014; SOUSA et al, 2016). Estes robôs apresentam duas diferentes funções: empilhamento 2,5D e impressão 3D. Para cada função o atuador é correspondente, sendo, respectivamente, uma garra com rotação e uma cabeça de impressão.

O SPIDERobot desenvolvido na Faculdade do Porto (Figura 62) apresenta a maior similaridade com o cablebot proposto. Ele utiliza somente quatro cabos e apresenta uma garra com rotação do plano (SOUSA et al, 2016), tendo também como função o empilhamento 2,5D de blocos.

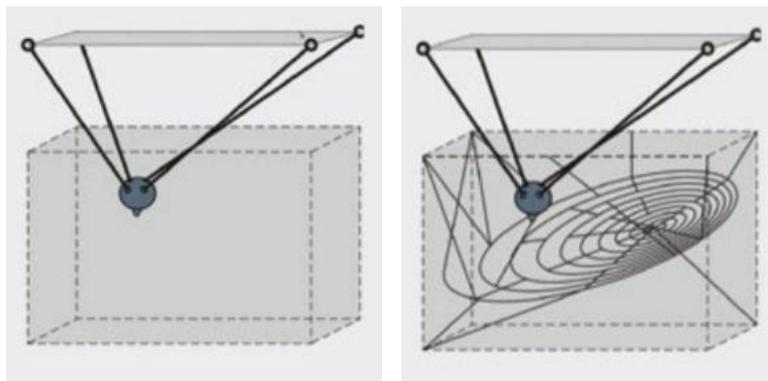


**Figura 62 - SPIDERobot**

**Fonte: (SOUSA et al, 2016)**

Como se mencionou, os demais cablebots acrescentaram mais cabos ou barras com o foco de manter a precisão (reduzir vibrações) e aumentar a velocidade de deslocamento. Para responder a estas questões, o SPIDERobot utilizou técnicas de visão computacional, que visou identificar as peças e corrigir problemas de posicionamento (SOUSA et al ,2016), reduzindo os efeitos das vibrações. Contudo, foi constatado que a montagem teve uma velocidade lenta (SOUSA et al, 2016). O grupo considerou que seria possível sua aplicação para construção in loco de edifícios (SOUSA et al, 2016).

Já o protótipo de 2012 desenvolvido pelo grupo Mediated Matter (Figura 63) apresentava um design com quatro cabos e uma cabeça de impressão (OXMAN et al, 2014), com foco em impressão 3D. Considerou-se que ele poderia trabalhar sozinho ou em conjunto com outros robôs, propondo áreas de sobreposição entre eles, criando uma rede de impressão 3D colaborativa através do enxame de cablebots (OXMAN et al, 2014). Cita-se como vantagens do uso deste robô sua capacidade de construir estruturas grandes e sua adaptação em terrenos naturais (OXMAN et al, 2014).

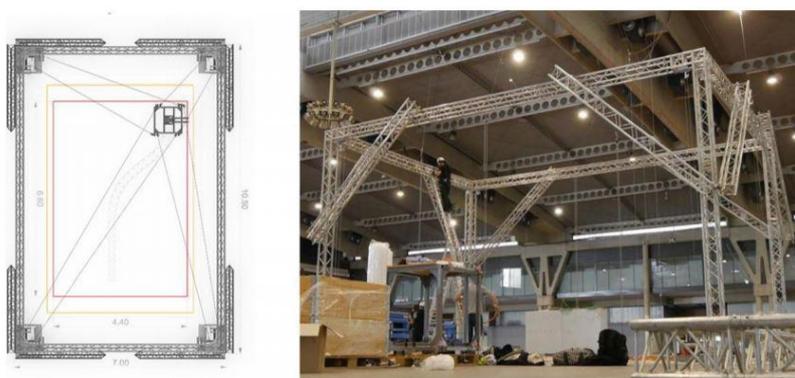


**Figura 63 – Impressão 3D com cablebot**

**Fonte: (OXMAN et al, 2014)**

Apesar de ambos citarem a potencialidade de seu uso em estruturas de escala real, não se encontrou registros do uso destes dois robôs na fabricação e montagem in situ ou de estruturas em escala real. Um exemplo, contudo, de cablebot que chegou a realizar a fabricação de uma estrutura em uma escala maior foi o COGIRO (DUBOR et al, 2018).

Este cablebot tem como função a impressão 3D de grande porte (Figura 64) apresentando, uma configuração com oito cabos, de modo similar ao NIST Spider, porém de base retangular. Esta disposição e quantidade de cabos se deve a busca por maior estabilidade e devido à distribuição do peso da cabeça de impressão (DUBOR et al, 2018).



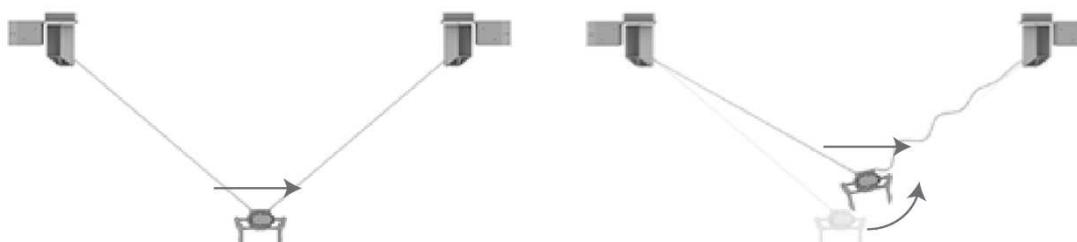
**Figura 64 – Impressão 3D com cablebot de grande porte**

**Fonte: (DUBOR et al, 2018)**

A estrutura do COGIRO apresentava 10,5 x 7m, com altura de 6m. Desta área, considerou-se como área útil de impressão 6,6 x 4,4m, com altura de até 3,5m. Este foi utilizado em uma feira internacional de construção por 15 dias para demonstrar o uso de cablebot com impressão 3D em adobe através da construção de um pavilhão de 20m<sup>2</sup> (DUBOR et al, 2018). Este uso demonstrou o potencial da tecnologia e capacidade de uso em escala real, contudo, aponta-se a necessidade de pesquisa e desenvolvimento para uso em terrenos reais e ambientes externos (DUBOR et al, 2018).

O artigo cita ainda que ocorreram problema de vibração no processo, em decorrência da geometria do robô e dificuldade de instalação de algumas juntas (DUBOR et al, 2018). Estas vibrações são apontadas como um problema recorrente nos cablebot, sendo identificadas em quase todos os exemplos levantados. Toda máquina apresenta um certo nível de vibração, dependendo de seu movimento, peso e características físicas. No caso dos cablebot, provavelmente estas vibrações se dão por duas questões: (1) flexibilidade dos cabos e (2) falta de rigidez que balanceie a inércia do atuador e sua carga durante o movimento.

Estes dois fatores em certas situações estão ligados, como é o caso de uma carga sendo movimentada e o movimento se interrompe. Neste momento, a inércia tende a manter a carga em movimento, sendo que, pelo menos, um cabo continua segurando-a, mas os demais podem ficar frouxos pela falta de tensão nestes (Figura 65). O mesmo pode ocorrer na situação de forças externas, causadas por eventos como vento ou colisões.

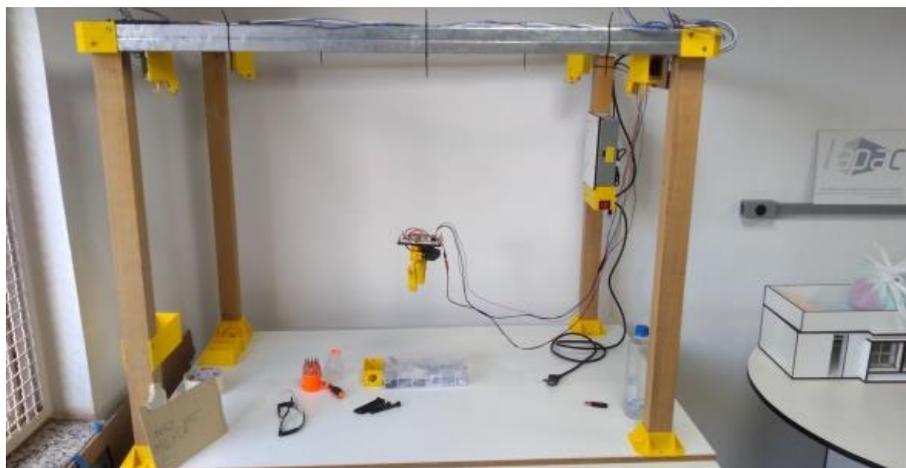


**Figura 65 –Movimentos e rotação da garra do cablebot**

**Fonte: do autor**

Apesar dos problemas identificados relacionados à vibração e redução de precisão nos movimentos em decorrência do uso de quatro cabos, a disposição com quatro cabos apresenta vantagens de maior área útil, facilidade na montagem, desmontagem e transporte e controle. Como será apresentado durante os testes de montagem, com o controle de velocidade do movimento e aplicação de encaixes, foi possível reduzir estas imprecisões a valores aceitáveis.

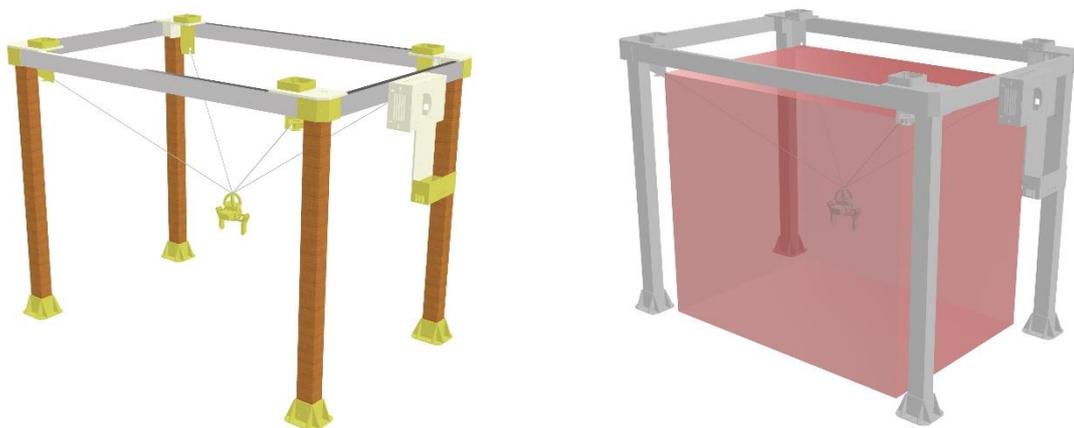
O cablebot final (Figura 66) apresentou quatro cabos (cada qual com um motor), uma garra com movimento de abrir/fechar e rotação 360° (sendo 180° no sentido horário e 180° no sentido anti-horário) paralelo ao plano de atuação. O robô apresenta, deste modo, quatro graus de liberdade. A construção e programação do cablebot durou menos de dois meses, com peças cortadas a laser e impressas em 3D (resultando em, aproximadamente, 50 horas de impressão). O custo total do cablebot foi de, aproximadamente, R\$1.400,00.



**Figura 66 – CableBot desenvolvido para a pesquisa**

**Fonte: do autor**

A estrutura apresenta 112 x 70 x 87 cm, com área útil de 91,5 x 63 x 75 cm (como destacado em vermelho na Figura 67). Deve-se salientar que os motores não precisariam ficar presos, necessariamente, nesta estrutura, podendo se adequar a diferentes estruturas.



**Figura 67 – Modelo digital do CableBot, com área útil destacada**

**Fonte: do autor**

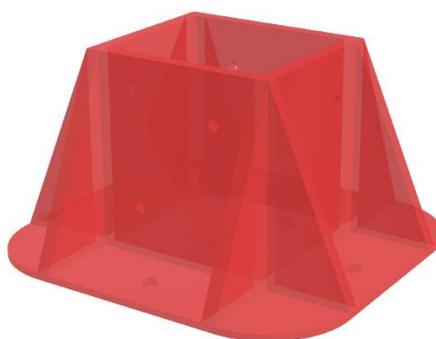
As peças com maior complexidade foram impressas em 3D (como destacadas em vermelho na Figura 68), sendo elas: a base dos motores, conexões, componentes da garra, base da garra e conectores da estrutura (superior e inferior). Já as peças de menor complexidade e que puderam ser planificadas foram cortadas a laser (como destacadas em verde na Figura 68), sendo elas: conector entre estrutura e motor, caixa do microcontrolador e base da fonte de energia.



**Figura 68 – Componentes do cablebot destacadas em vermelho (impressão 3D) e verde (corte a laser)**

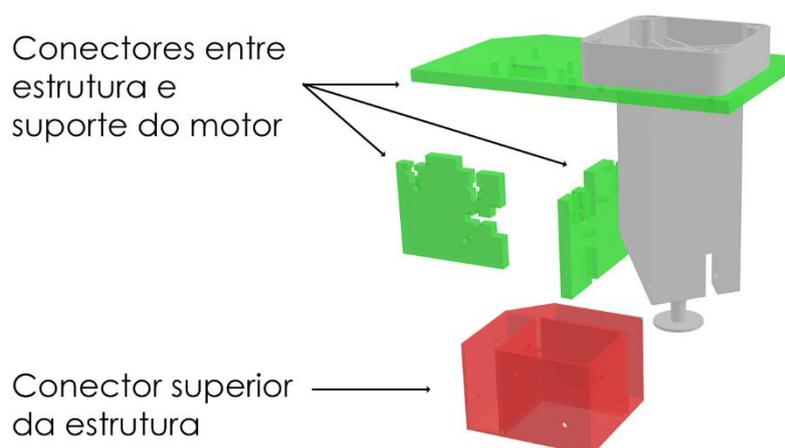
**Fonte: do autor**

Para a estrutura foram utilizadas peças de madeira para os elementos verticais e peças em alumínio utilizadas em estruturas de drywall para os elementos horizontais. As peças verticais são fixadas na base de MDF 12mm através dos conectores inferiores (Figura 69). O conector superior da estrutura (Figura 70) conecta as peças verticais e horizontais, fornecendo rigidez. Nesta conexão e nas peças verticais, são fixados os conectores entre a estrutura e suporte dos motores (Figura 70).



**Figura 69 – Conector inferior**

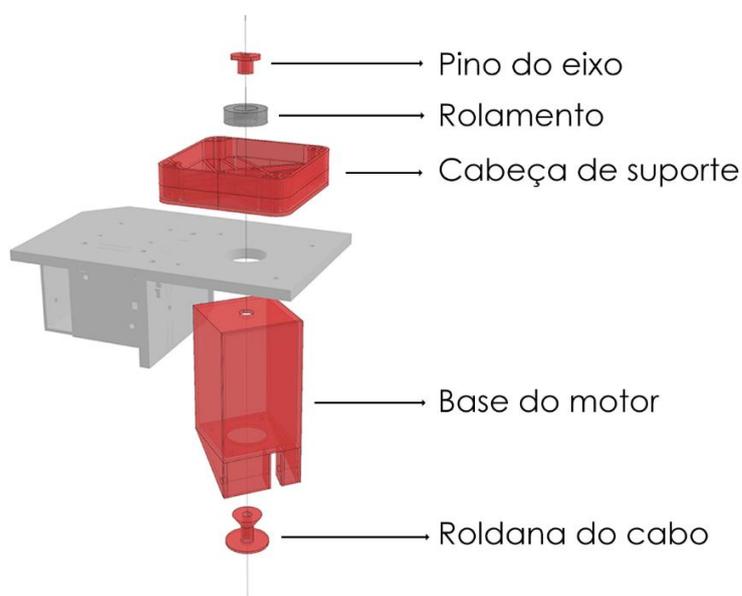
**Fonte: do autor**



**Figura 70 – Componentes dos conectores da estrutura e suporte do motor**

**Fonte: do autor**

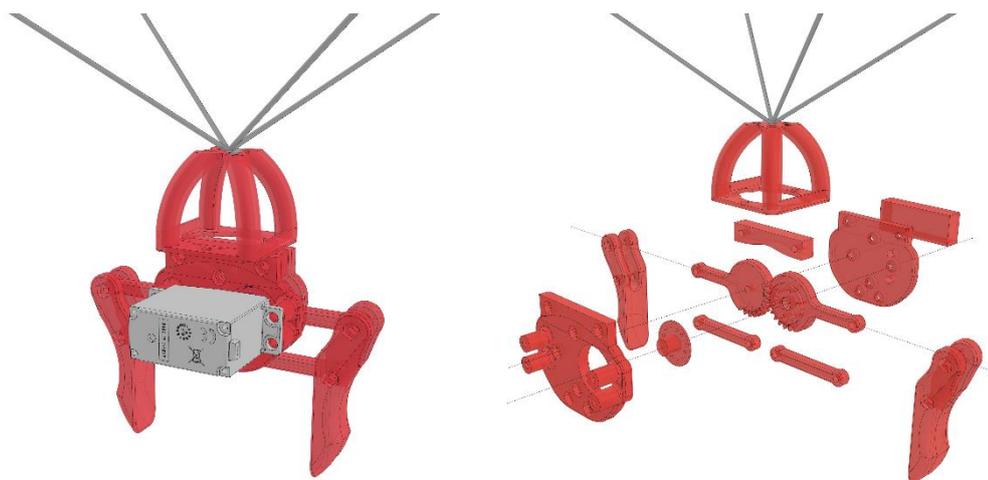
Os suportes dos motores são compostos pela base do motor (que segura o motor), roldana, cabeça de suporte, rolamento, pino do eixo e eixo (Figura 71). A cabeça de suporte se conecta fixamente com o conector entre a estrutura e o suporte, já o conjunto do rolamento, pino, eixo e base do motor permite que a base gire livremente, de acordo com o posicionamento da garra. A roldana realiza o direcionamento do cabo, com uma geometria que impede que o cabo enrole no eixo do motor.



**Figura 71 – Componentes do suporte do motor**

**Fonte: do autor**

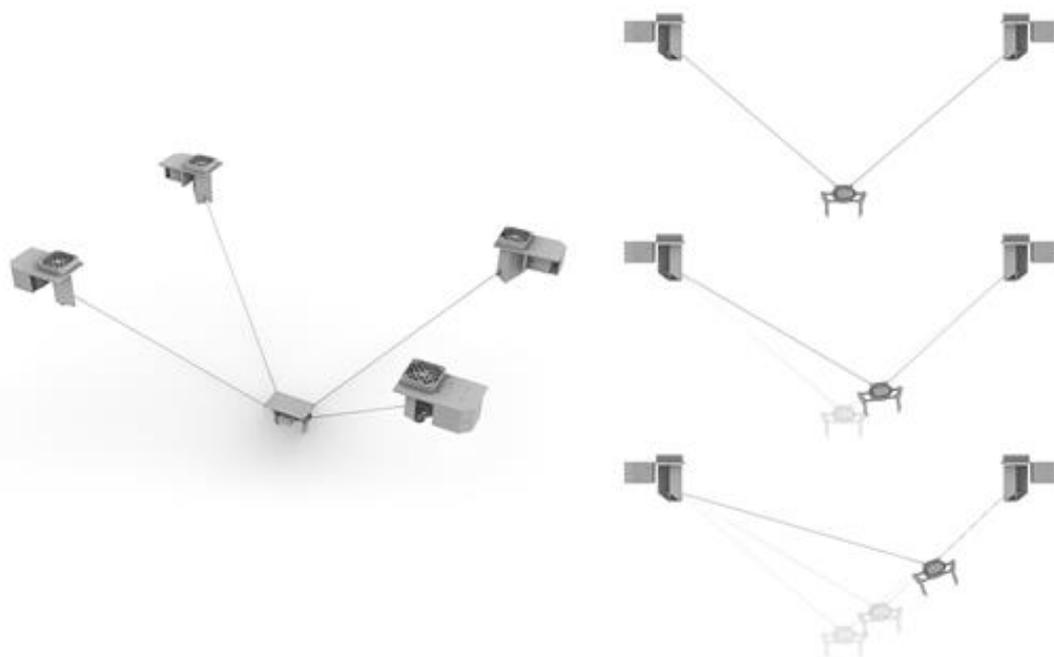
A garra se baseou no projeto de garra do braço robótico Moveo da BCN3D, sendo modificada para os parâmetros de produção e necessidades do cablebot. Entre as modificações, retirou-se a necessidade de suportes para impressão 3D por meio de ajustes na geometria, inseriu-se uma nova conexão mais firme entre o motor servo e a engrenagem principal, inseriu-se um contra-peso na parte posterior para equilibrar o pelo do motor servo e modificou-se o conector entre a garra e o motor de passo que realiza seu giro, adaptando-o para o motor utilizado. A base da garra conecta o motor de passo que segura a garra aos quatro cabos provenientes dos motores (Figura 72).



**Figura 72 – Componentes da garra e base da garra**

**Fonte: do autor**

A base da garra inicial apresentava uma base retangular e cada cabo era conectado a um vértice deste retângulo. Durante os primeiros testes, notou-se que ao sair do centro da área de atuação do robô, a base apresentou uma inclinação, sendo que esta se acentuava conforme chegava perto dos limites da área de atuação (Figura 73). Essa inclinação se dá, possivelmente, pela distribuição do peso e efeitos elásticos dos cabos. Esta inclinação poderia causar imprecisões no processo de montagem e, deste modo, a base da garra foi substituída, de modo que todos os cabos chegassem em um só ponto, como na figura acima (Figura 72).



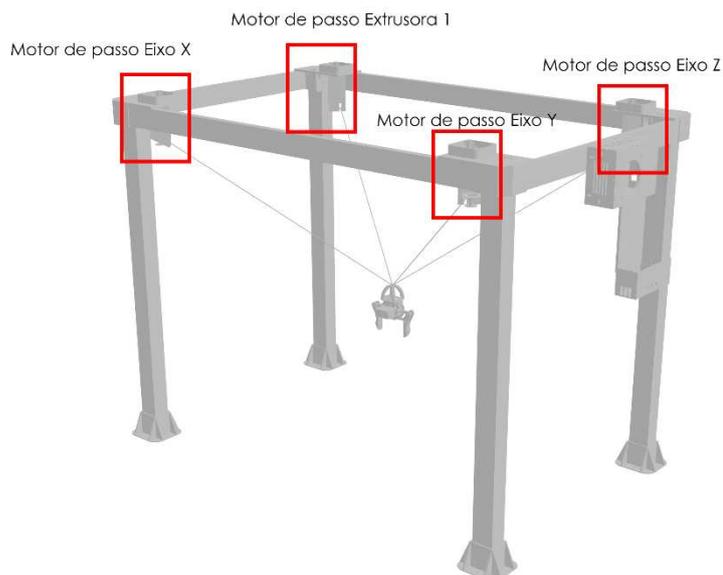
**Figura 73 – Base da garra retangular e a inclinação causada**

**Fonte: do autor**

Quanto ao hardware utilizado no cablebot, este foi baseado em projetos opensource de impressora 3D FDM tipo RepRap. Seu controle se dá por uma placa Arduino Mega 2560 R3, com firmware Marlin. Foi utilizado um shield RAMPS 1.4 e drivers A4988, também típicos deste tipo de impressora 3D FDM.

A base no projeto de impressora 3D se deu: (1) pela quantidade de motores disponíveis ser compatível com o cablebot, (2) facilidade em controlar uma impressora 3D através de softwares como Repetier-Host e GCodes e (3) pela afinidade do autor com a tecnologia, facilitando as modificações de hardware, firmware e software.

Os quatro motores de passo NEMA 17 tradicionalmente ligados aos eixos X, Y e Z e à extrusora 1 numa impressora 3D foram utilizados como os motores em cada coluna do cablebot (Figura 74). Estes realizam a movimentação da garra pelo espaço da área útil. Estes quatro motores podem se movimentar ao mesmo tempo, sendo ideal para a aplicação do cablebot.



**Figura 74 – Relação entre motores do cablebot e de uma impressora 3D FDM**

**Fonte: do autor**

Para a rotação da garra, foi utilizado um motor de passo 28BY (com modificação no driver para rotação 360° da garra), ligado ao controlador da extrusora 2 e a abertura/fechamento da garra é controlado por um motor servo MG995. Devido às configurações do firmware Marlin, as rotações da garra e fechamento/abertura só ocorrem quando não há movimento dos demais motores. As conexões da RAMPS referentes à mesa de aquecimento, aquecimento das extrusoras e sensores não foram utilizadas e foram desabilitadas nos códigos. Uma ventoinha (cooler) foi utilizada para resfriar o conjunto da placa Arduino, RAMPS e drivers.

Como citado, o cablebot é controlado por GCodes, através do software Repetier-Host. Para realizar o controle de modo correto, foi necessário realizar algumas modificações no firmware Marlin.

A última versão do Marlin (2.1) apresenta algumas características de segurança, como só permitir que o motor de extrusão realize a extrusão caso a temperatura do sensor esteja acima de um determinado parâmetro. Foi necessário desabilitar estas medidas de segurança relacionadas às extrusoras e mesa de aquecimento. Além disso, foi necessário ativar a extrusão dupla e uso do motor servo.

A principal modificação realizada foi a equivalência entre a rotação dos motores e a quantidade de cabo a ser solto. Esses valores variam de modelo de impressora por causa dos eixos ou engrenagens utilizadas. Para o cablebot, os motores que controlam os cabos apresentam a roldana. Esta foi projetada de modo que uma volta completa do motor equivalesse a 1,5cm de cabo. Esta equivalência foi inserida nos ajustes do firmware (via EPPROM). Questões relacionadas ao movimento, rotações, área de impressão e outras foram tratadas no GCode.

#### *3.1.1.2. Integração com Grasshopper*

Nas fases iniciais do desenvolvimento do cablebot foram analisados e testados aos métodos e bibliotecas de controle de robôs. Um dos métodos mais utilizados é através da biblioteca COMPAS, desenvolvida pela ETHz e utilizada por grupos como o Gramazio Kohler Research. Contudo ele tem como foco o controle de braços robóticos, não sendo adequado ao uso com o cablebot.

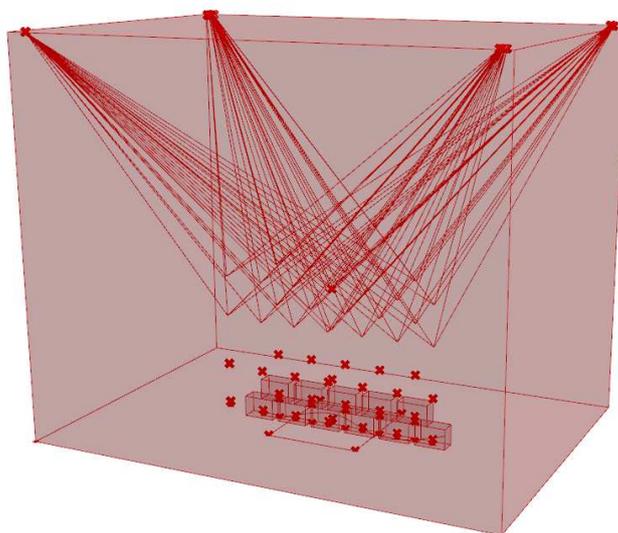
Outros métodos de controle do cablebot através do programa Grasshopper foram testados por meio de plugins como Firefly. Estes permitem o controle de micro-controladores como Arduíno. Podem ser utilizados para controle de impressões 3D ou braços robóticos com base em arduíno através do Grasshopper. Contudo, os testes iniciais demonstraram algumas limitações, principalmente no que diz respeito à movimentação de múltiplos motores ao mesmo tempo e a presença de delays causados pelo protocolo de dados.

Como citado anteriormente, optou-se por modificar o firmware utilizados em impressoras 3D (Marlin) visando seu uso pelo cablebot. Deste modo, tornou-se possível controlar o cablebot através de um GCode similar ao utilizado em impressões 3D. Para isso, foi necessário desenvolver um método de escrita automática do GCode personalizado para que ocorresse a correta comunicação entre o modelo paramétrico e o programa de controle do cablebot.

O modelo paramétrico fornece as coordenadas e rotações de cada peça. Como o cablebot não apresenta sensores de fim de curso, optou-se por definir a origem como o centro da base do cablebot. A partir desta origem, as coordenadas foram ajustadas

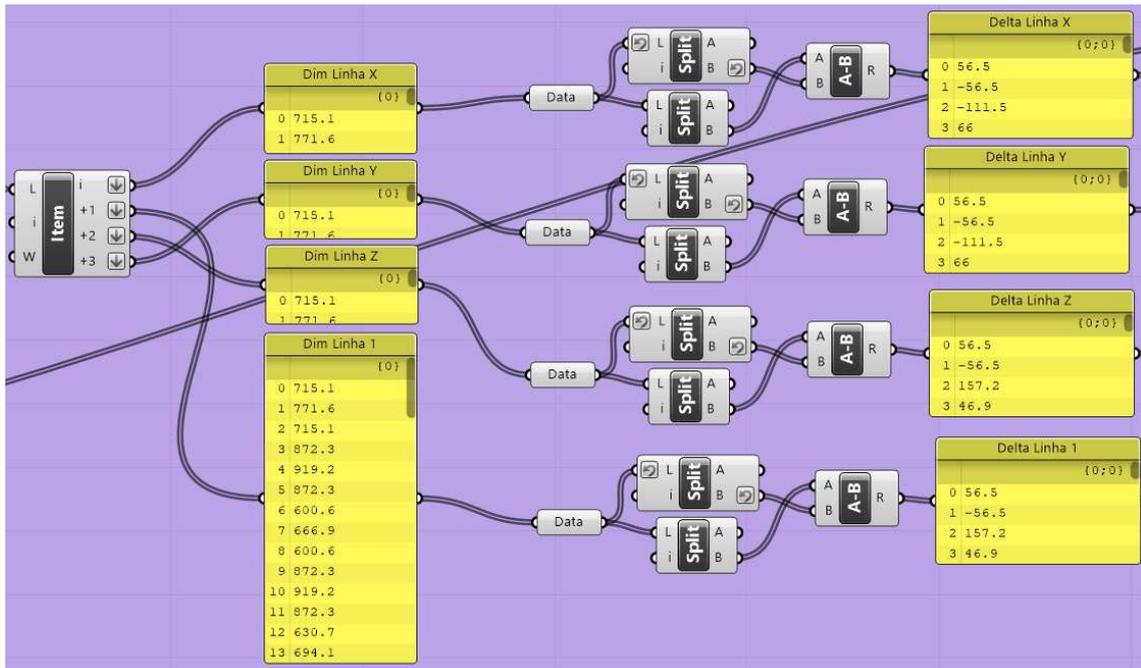
para o plano de trabalho do cablebot. Para definir o método de controle dos cabos, havia duas opções: (1) trabalhar com as coordenadas dos pontos e definir, no firmware, as relações matemáticas para que o programa compreendesse quanto cabo cada motor deveria fornecer ou puxar para movimentar o atuador, ou (2) trabalhar somente com o comprimento dos cabos em cada eixos, equiparando a rotação a quantidade de cabo solto em uma volta. Considerando que o GCode pode trabalhar tanto com coordenadas absolutas quanto relativas, escolheu-se a segunda abordagem.

Através de um modelo geométrico (Figura 75), o modelo 3D fornece a quantidade de cabo necessária para chegar em cada posição definida. Estes comprimentos foram separados em listas (Dim Linha X, Y, Z e 1) e depois transformados em comprimentos relativos (Figura 76). Ou seja, se o comprimento necessário ao ponto 1 era de 720mm e o necessário ao ponto 2 era de 770mm, definiu-se o comprimento relativo de +50mm. O uso de comprimentos relativos se deu, principalmente, pela falta de sensores de fim de curso e pela flexibilidade de dimensões. Além disso, o uso de coordenadas relativas é bem aceito pela impressora no caso GCodes personalizados como este.



**Figura 75 – Comprimento de cabos para coordenadas**

**Fonte: do autor**



**Figura 76 – Transformação de comprimentos absolutos em relativos**

Fonte: do autor

Estes comprimentos foram inseridos no GCode como coordenadas, seguindo o comando G1, que permite o controle simultâneo dos quatro motores. Os comprimentos relativos de cada cabo equivalem às coordenadas relativas de X, Y, Z e E, sendo que E diz respeito à extrusora 1. Desta forma, gerou-se uma lista de comandos de coordenadas (Figura 77).

```

{0;0}
0 G1 X56.5 Y56.5 Z56.5 E56.5
1 G1 X-56.5 Y-56.5 Z-56.5 E-56.5
2 G1 X-111.5 Y-111.5 Z157.2 E157.2
3 G1 X66 Y66 Z46.9 E46.9
4 G1 X-66 Y-66 Z-46.9 E-46.9
5 G1 X253.7 Y265 Z-256.3 E-271.7
6 G1 X47.7 Y47 Z64.8 E66.3

```

**Figura 77 – Coordenadas relativas**

Fonte: do autor

Foram inseridos os fatores de abertura e fechamento da garra pelo controle do motor servo (comando M280), identificando em quais momentos deveria abrir e fechar (Figura 78). Foram também inseridos os comandos de uso de coordenadas relativas (G91), delays (G4), mudança de motor de extrusão (M108 T0/1) para mudar entre movimento e rotação da garra e distâncias de segurança entre as camadas e a área de movimento da garra, gerando o código final (Figura 79)

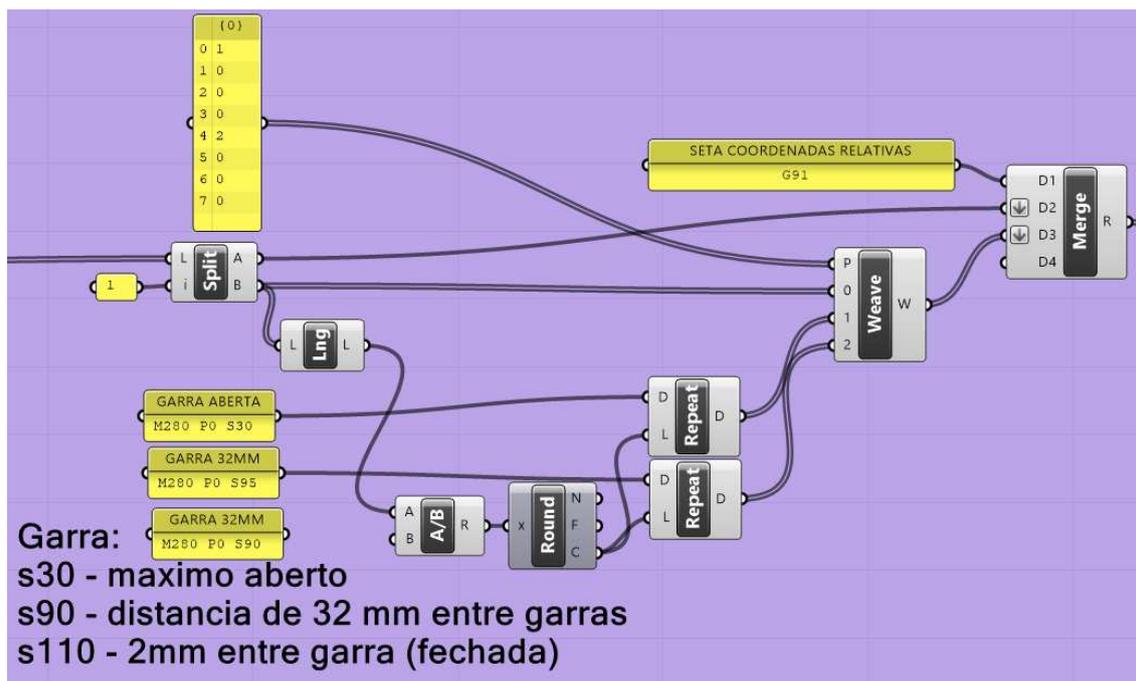


Figura 78 – Comandos de abertura e fechamento de garra

Fonte: do autor

```

{0}
0 G91
1 G1 X28.5 Y28.5 Z28.5 E28.5
2 M280 P0 S30
3 G1 X-28.5 Y-28.5 Z-28.5 E-28.5
4 G1 X-107.9 Y-107.9 Z153.6 E153.6
5 G1 X33.2 Y33.2 Z23.7 E23.7
6 M280 P0 S90
7 G1 X-33.2 Y-33.2 Z-23.7 E-23.7
8 G1 X44.4 Y58.4 Z-81.4 E-93.4
9 G1 X31.2 Y30.5 Z26.1 E26.4

```

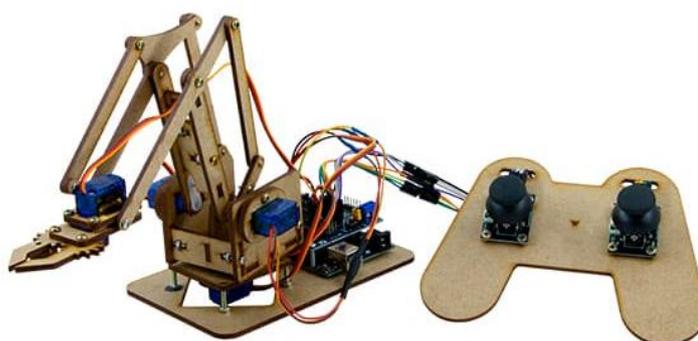
Figura 79 – Exemplo de GCode final de controle do cablebot

Fonte: do autor

O código pode então exportado em arquivo de texto e convertido para arquivo “.gco”. Este formato é lido pelo Repetier-Host, permitindo executar a programação e realizar a montagem. O programa Repetier-Host também permite a inserção manual de linhas de código ou controle independente dos motores, permitindo posicionar a garra na posição central ou modificar suas coordenadas.

### 3.1.2. Braço robótico MyCobot Pi

Existem no mercado diversos modelos de braços robóticos, seja de caráter industrial ou educacional. A maior parte dos braços educacionais apresentam poucos eixos, baixa capacidade de carga e materiais não duráveis (Figura 80). Eles apresentam um caráter relacionado ao aprendizado do funcionamento de um braço robótico, podendo ser do tipo “faça-você-mesmo” (DIY), porém não são adequados ao uso prático em pesquisa. Algumas empresas, como a Svenzva Robotics, apresentam braço robótico voltados para educação e pesquisa (Figura 81), com quantidade de eixos, carga, materiais e métodos de programação compatíveis.



**Figura 80 – Braço robótico educacional**

Fonte: <[www.makerhero.com.br](http://www.makerhero.com.br)>

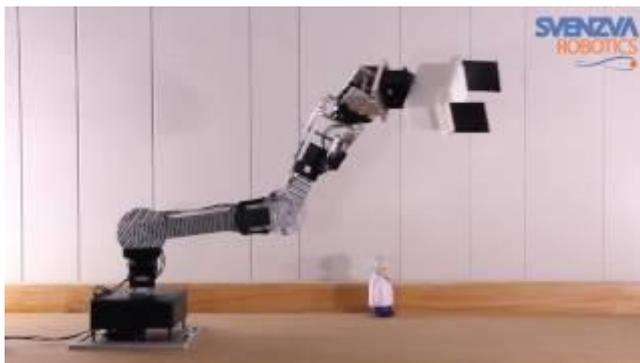


Figura 81 – Braço robótico Svenzva

Fonte: [Svenzva.com](http://Svenzva.com)

Comparando com os braços robóticos industriais, mesmo as versões com foco em pesquisa apresentam capacidades menores nos quesitos de carga e alcance. O braço robótico mais simples da Universal Robotics (UR3e), por exemplo, apresenta uma carga de 3kg e alcance de 50cm (Figura 82).



Figura 82 – Exemplo de GCode final de controle do cablebot

Fonte: [Universal-robots.com](http://Universal-robots.com)

Considerando estas limitações, colocou-se como requisitos mínimos para o braço robótico: (1) apresentar alcance de, pelo menos, 25cm, (2) aguentar uma carga de, pelo menos, 200 g e (3) apresentar seis eixos. Tendo estes requisitos, considerou-se duas possibilidades: a construção de um braço robótico com base em projeto open source ou aquisição de um braço robótico para pesquisa. Os projetos open source levantados (como Moveo da BCN3D, Thor ou outros) apresentavam limitações relacionadas à sua programação ou interface, além de problemas de projeto relatados nas respectivas comunidades. Como seria necessário analisar o projeto, modificar e realizar outras adaptações relacionadas a software e interface de usuário, optou-se pela aquisição de um braço robótico para pesquisa.

Em 2021 a Elephant Robotics lançou o MyCobot Pi, um robô educacional de seis eixos que simula, em escala reduzida, um robô industrial (Figura 83). Por sua capacidade de simular um robô industrial, atender aos requisitos mínimos e facilidade de programação, foi utilizado um braço robótico MyCobot Pi para realizar os experimentos de montagem com braço robótico. O braço apresenta um alcance de 28cm (sem contar com o atuador), carga de até 250g na distância máxima e seis eixos.



**Figura 83 – Braço robótico MyCobot Pi da Elephant Robotics**

**Fonte: [www.elephant-robotics.com](http://www.elephant-robotics.com)**

### 3.1.2.1. *Garra personalizada*

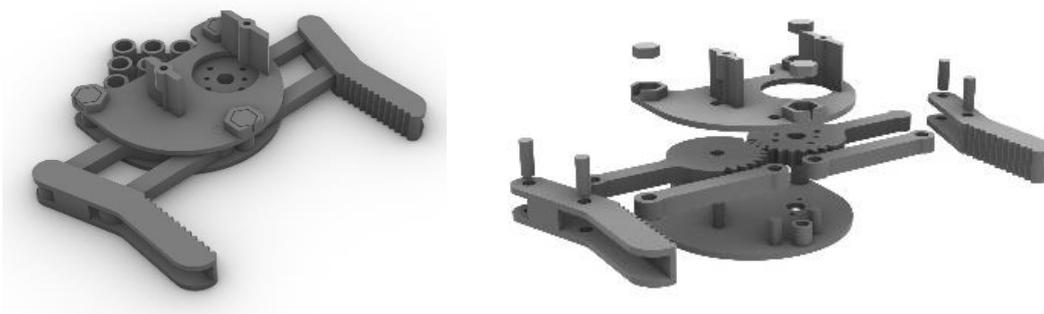
O MyCobot Pi apresenta diversos tipos de atuadores e acessórios. Foram realizados testes iniciais com a garra (gripper adaptativo) da Elephant Robotics (Figura 84). Para os testes iniciais de montagem, a garra pode realizar corretamente a função. Porém notou-se um desgaste rápido dessa, bem como limitações de dimensão e abertura e demora de resposta. A garra da Elephant Robotics apresenta uma abertura máxima de 45mm e aguentando um peso máximo de 150g, devido às limitações do motor servo desta.



**Figura 84 – Garra (gripper adaptativo) da Elephant Robotics**

**Fonte: [www.elephant-robotics.com](http://www.elephant-robotics.com)**

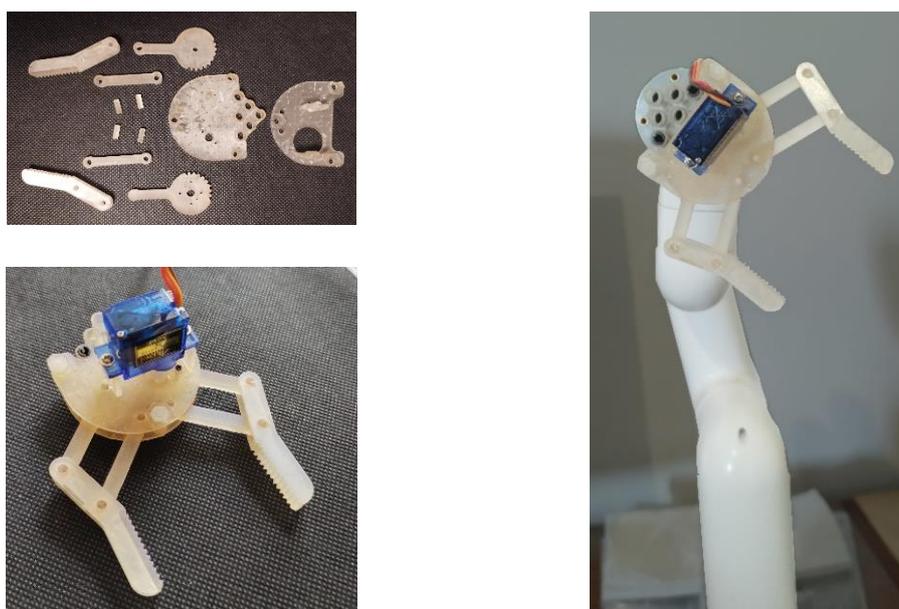
Para as demais montagens com o braço robótico, em função das dimensões da garra e falhas de ativação da garra original, foi necessário projetar e fabricar uma nova garra de maior abertura utilizando impressora 3D de resina Creality LD-006. A nova garra (Figura 85) apresenta uma abertura de 65mm, permitindo manipular e realizar as montagens com peças maiores.



**Figura 85 – Projeto da garra personalizada para MyCobot Pi**

**Fonte: do autor**

O projeto se baseia na garra utilizada para o cablebot, com modificações de tamanho, redução do número de peças (como redução dos parafusos utilizados como eixos e substituição por eixos impressos no corpo da garra), adaptação para um motor servo de maior potência e conexão com a cabeça do robô. Devida à precisão necessária para as conexões de encaixe rápido do braço robótico, foi necessário realizar a impressão em resina, já que a impressão tipo FDM não seria capaz de fornecer este nível de precisão (Figura 86).



**Figura 86 – Garra personalizada para MyCobot Pi**

**Fonte: do autor**

A nova garra foi utilizada nas montagens por empilhamento, como será apresentado no capítulo “5.3. Aplicação na Montagem de estruturas”. É importante salientar que também foram realizados testes de montagem por posicionamento 3D utilizando o atuador por sucção da Elephant Robotics na aplicação dos encaixes a painéis, porém a baixa potência e limitações do atuador não resultaram em uma montagem eficiente.

#### *3.1.2.2. Integração com Grasshopper*

Sendo os braços robóticos o tipo de robô mais comum, existem diversos métodos para programar e integrar os robôs às mais diversas tarefas. Durante a revisão bibliográfica (principalmente sobre robôs industriais), levantou-se algumas destas estratégias e protocolos, seja com foco na montagem ou integração com modelos virtuais. Um dos métodos mais é o “drag and record”, no qual o braço robótico é movimentado por um operador de modo manual de acordo com o movimento desejado e são gravadas estas posições durante o processo. Este método é muito utilizado na indústria principalmente pelas linhas de montagem tradicionais se basearem em operações repetitivas pré-determinadas.

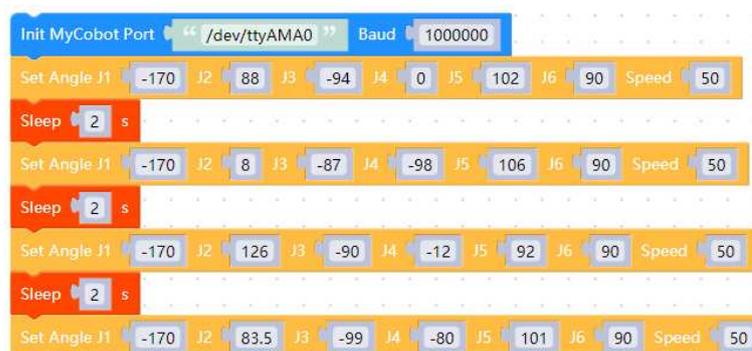
Quando se trata de processos de montagem ou fabricação com maior flexibilidade, ou seja, em processos de customização em massa, este processo deixa de ser adequado. Como paralelo, podemos citar as impressoras 3D. Elas apresentam um sistema flexível que permite ler um código e gerar geometrias cada vez diferentes. Caso seu sistema fosse similar ao método “drag and record”, só seria possível imprimir um único modelo, até que a programação fosse refeita.

Considerando essa necessidade de flexibilidade, buscou-se métodos que permitissem a leitura de um código-base ou GCode para controle do braço robótico. Diferentemente do caso do cablebot, o MyCobot Pi se baseia em um microcontrolador Raspberry Pi 4b, com sistema operacional Ubuntu Mate 20.4. Sua programação pode ser realizada através do programa Blockly, por Python ou ROS.

Como citado anteriormente, diversos grupos utilizam a biblioteca COMPAS para controlar robôs industriais. Seu objetivo é facilitar esta integração, visando a fabricação e montagem digital. Considerando que a biblioteca COMPAS é escrita em

python, foram realizados testes de integração entre o MyCobot Pi e a biblioteca COMPAS. Devido ao modelo e ao código-base do MyCobot Pi, ocorreram problemas de compatibilidade, não sendo possível realizar a integração da biblioteca.

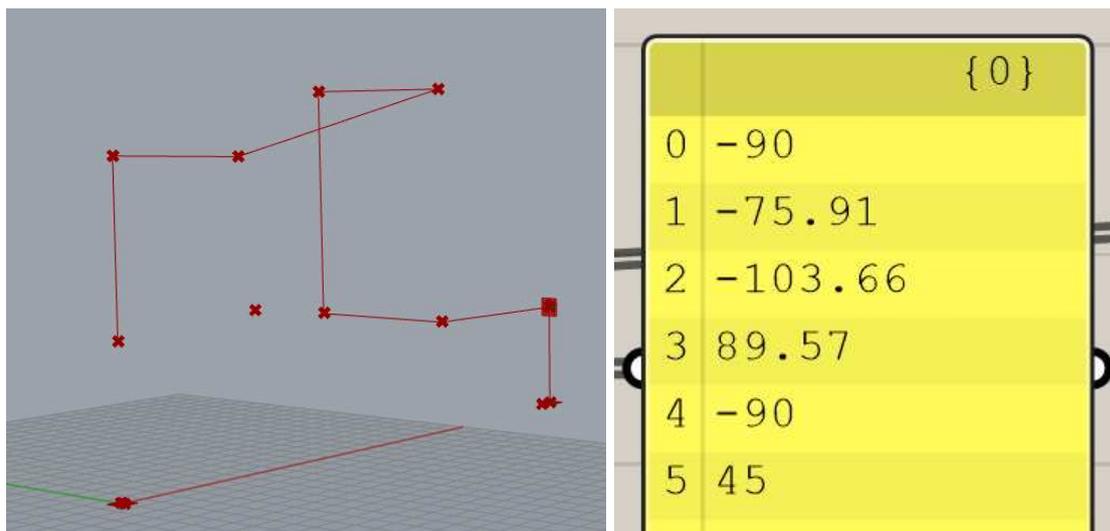
O braço robótico também apresenta a possibilidade de controle pelo programa Blockly. O programa foi inicialmente desenvolvido em conjunto pelo Google e pelo MIT, visando um método fácil de trabalhar a programação. Este foi adaptado para trabalhar com os componentes do MyCobot Pi, baseado em python. Este utiliza programação para gerar o código e controlar o robô (Figura 87), apresentando também a opção de edição do código python gerado. Deste modo, optou-se pela estratégia de controlar o braço robótico através dos seus eixos, pela biblioteca Blockly.



**Figura 87 – Garra personalizada para MyCobot Pi**

Fonte: <forums.raspberrypi.com>

O modelo paramétrico gerado no Grasshopper apresenta as coordenadas espaciais (X, Y e Z) e a orientação da garra (Rx, Ry e Rz). Estas informações foram utilizadas para determinar, de forma geométrica, o ângulo de rotação das juntas (J1, J2, J3, J4, J5 e J6). Para cada coordenada foi possível gerar estes valores (Figura 88), os quais foram exportados em um arquivo CSV e inseridas no Blockly.

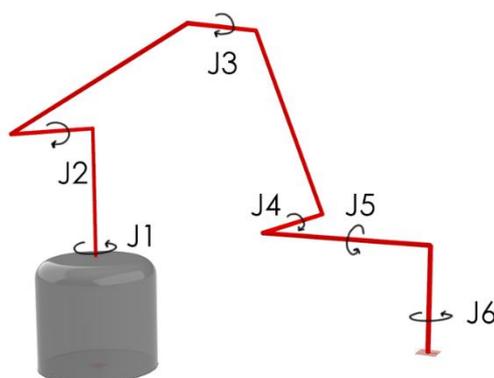


**Figura 88 – Simulação geométrica e ângulo de rotação das juntas**

**Fonte: do autor**

Pelo braço robótico apresentar seis eixos e sua disposição, este é classificado como redundante, ou seja, existe mais de uma configuração das juntas – ou eixos – em que o atuador esteja em uma determinada posição. Para solucionar esta questão, foi necessário determinar qual seriam os movimentos de cada eixo.

A imagem abaixo (Figura 89) demonstra de modo esquemático os eixos e seus movimentos. O eixo J1 determinava o ângulo entre o eixo central do robô e o ponto de posicionamento. Os eixos J2, J3 e J4, em conjunto, determinavam a profundidade do ponto em relação ao robô e sua altura. Os eixos J5 e J6 foram usados para corrigir a angulação de posicionamento da garra e rotacionar a peça na orientação correta.



**Figura 89 – Simulação geométrica e ângulo de rotação das juntas**

**Fonte: do autor**

É importante ressaltar que esta configuração foi pensada na montagem por empilhamento 2,5D. Desta forma, o plano final da garra está sempre paralelo ao plano de posicionamento das peças (plano de base do robô). No caso de outras aplicações, como posicionamento 3D, o plano de posicionamento não é paralelo ao plano de base do robô, não sendo utilizada esta configuração.

O planejamento de percurso é, até hoje, um grande desafio para a fabricação e montagem robótica com robôs redundantes ou hiper-redundantes. Simulações com modelos 3D podem indicar possíveis colisões e movimentos que não podem ser realizados pelo robô. Nesta pesquisa, pelo foco em empilhamento 2,5D, pôde-se considerar alturas seguras para os movimentos, impedindo colisões. Outros fatores relacionados aos limites dos movimentos do braço foram inseridos no código do modelo virtual, como distância mínima e relação entre o alcance vertical e horizontal do braço robótico.

Os métodos adotados para a movimentação e planejamento de percurso para o braço robótico consideram seu uso no empilhamento 2,5 D. Em outros usos, diferentes métodos podem – ou devem – ser adotados. Como citado, o uso de simulações de movimento pode ser fundamental em outras aplicações que apresentem características diferentes da explorada nesta pesquisa.

### 3.2. Testes iniciais de montagem

Foram realizados testes iniciais de montagem visando: (1) calibragem dos robôs e (2) medição da precisão dos processos. Em ambos os robôs, foi necessário ajustar os movimentos, delays, distância segura de movimento, processos de abertura da garra e outros, considerando o tempo de comunicação entre o software e o robô, bem como os problemas de movimento e inércia relatados anteriormente. Para estes, foram utilizados blocos de isopor.

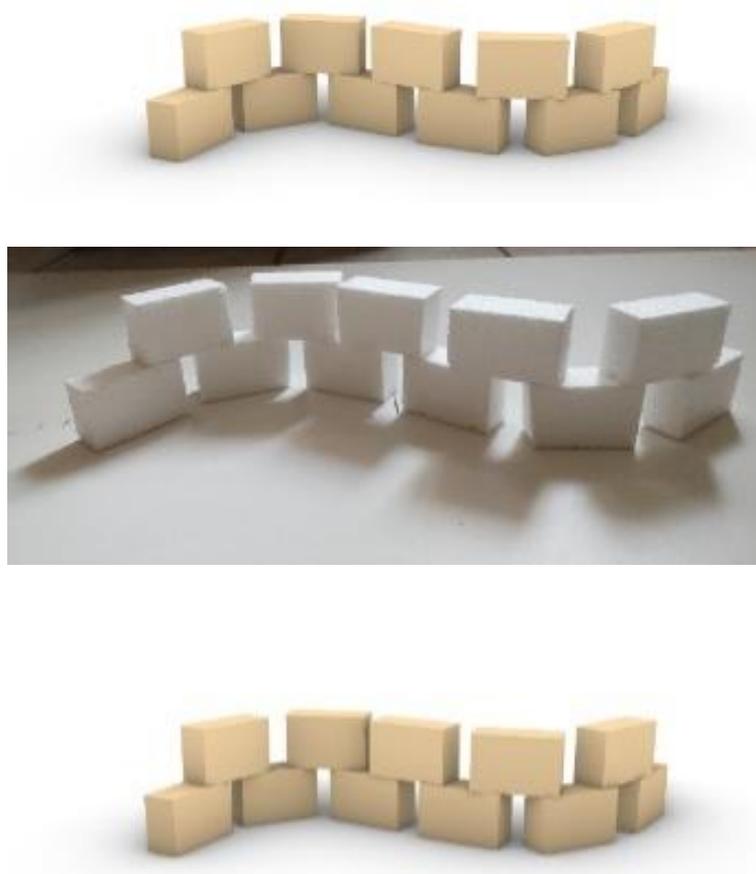
Para o cablebot, foram testadas diferentes velocidades e tempo de pausa (delay) nos movimentos horizontais. Primeiro foram testadas velocidades tradicionalmente usadas em impressoras 3D FDM, devido ao software utilizado, utilizando 40mm/s. Nessa velocidade, as vibrações causadas impediam o posicionamento das peças. A velocidade foi reduzida gradativamente em 5mm/s cada vez, até 10mm/s. Nessa velocidade as vibrações reduziram substancialmente. Em seguida, foram testados tempos de pausa entre movimentos. Como a pausa reduzia as vibrações entre movimentos, foram testadas as duas em conjunto, adotando a velocidade de 15mm/s e pausa de 2 segundos entre movimentos. As duas ações em conjunto reduziram as vibrações, permitindo a montagem das estruturas.

Para o braço robótico, utilizou-se a velocidade padrão do braço. Devido ao método de comunicação do software e tempo de resposta dos componentes, foi necessário adicionar um tempo de pausa (delay) antes e após todos os processos de abertura ou fechamento da garra. Caso não houvesse nenhum delay, o próximo comando se iniciava sem ter concluído o anterior, resultando em erros.

O delay utilizado para os processos da garra foi de 5 segundos. É importante destacar que esse tempo compreende desde o envio do sinal do controlador até o atuador, tempo de fechamento ou abertura e tempo adicional para não coincidir com o próximo movimento do braço. Por boa prática, optou-se por adicionar um delay de 1 segundo em todos os movimentos, para evitar problemas similares.

Após a calibragem dos robôs, realizaram-se experimentos para medir a precisão dos processos de montagem com ambos os robôs. Os experimentos consistiram na

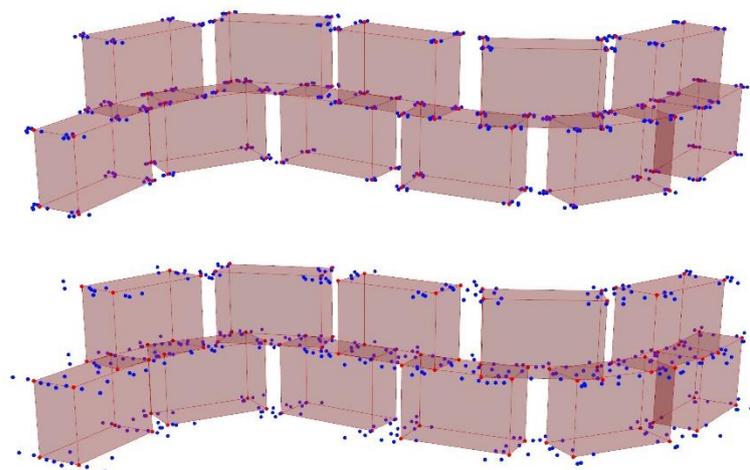
montagem de duas paredes em escala reduzida, uma reta e a outra com curvatura. Foram utilizados onze blocos de isopor sem encaixes com 6 x 4 x 2,5 cm. O experimento apresentou quatro fases: (1) modelagem digital, (2) montagem robótica de modelo físico, (3) digitalização do modelo físico e (4) comparação com o modelo digital (Figura 90).



**Figura 90 – Modelo digital, físico e digitalizado**

**Fonte: do autor**

A digitalização foi realizada com o digitalizador MicroScriber, o qual permite capturar os vértices dos blocos e comparar com o resultado digital inicial. Para cada robô e modelo usado, foram realizadas as digitalizações e comparadas, buscando averiguar a precisão dos processos. A imagem abaixo (Figura 91) apresenta o modelo digital de parede curva utilizado e os pontos digitalizados (em azul) da montagem por braço robótico e cablebot, respectivamente.



**Figura 91 – Modelo digital e nuvem de pontos digitalizadas da montagem com braço robótico e cablebot em parede curva**

**Fonte: do autor**

Foram realizadas 5 rodadas de montagem por tipo de parede (reta ou curva) e por robô, totalizando 20 testes. Como foram utilizados onze blocos em cada rodada, o total de pontos em cada teste de montagem foi de 88 ponto. A tabela abaixo (Tabela 6) apresenta a média de deslocamento dos pontos, bem como a diferença máxima em cada conjunto de teste.

Teste	Total de pontos	Diferença média	Diferença máxima
Cablebot – parede reta	440	5,47 mm	11,9 mm
Cablebot – parede curva	440	5,36 mm	11,7 mm
Braço robótico – parede reta	440	2,07 mm	3,8 mm
Braço robótico – parede curva	440	2,11 mm	4,0 mm

**Tabela 6 – Diferenças medidas entre modelo digital e modelos digitalizados**

**Fonte: do autor**

Para definir a precisão, considerou-se a diferença máxima dos processos. Apesar de nas medições ter-se utilizado uma casa decimal, considerou-se o arredondamento do

valor, de modo que não houvesse casas decimais. Isso se dá pela possibilidade de pequenos desvios durante a digitalização dos pontos, pois este processo é feito de modo manual. Pode-se notar também uma diferença mínima nos processos com parede reta e parede curva, que some no processo de arredondamento. O processo de montagem utilizando o braço robótico apresentou uma precisão de  $\pm 4\text{mm}$ , enquanto o processo utilizando o cablebot apresentou uma precisão de  $\pm 12\text{mm}$ .

Como citado, durante o processo de montagem, em ambos os robôs foi necessário ajustar os atrasos em relação à abertura/fechamento da garra. No caso do cablebot, foi necessário ajustar a velocidade do movimento: movimentos muito rápidos causavam muita movimentação da garra, devido a inércia. Para reduzir este efeito, a velocidade foi reduzida e adicionado um atraso para realizar a captura e soltar as peças durante a montagem. É importante colocar que distúrbios na garra podem levar a peça a ser pega na posição incorreta (espera-se que seja pega no centro), que seja solta na posição incorreta ou ainda que, durante a retração da garra, a garra ou a peça sendo colocada cause uma colisão com as demais peças.

Destaca-se também que a alimentação (colocação) das peças é realizada de forma manual em todos os casos, sendo o posicionamento pelo robô sendo realizado de modo automático. Esta prática foi observada em quase todos os experimentos acadêmicos envolvendo a montagem por robôs. Durante as visitas técnicas foi possível observar este fator em um dos laboratórios, além de outras intervenções manuais. Aponta-se que é possível automatizar esta etapa, como se pode observar em exemplos industriais.

### 3.3. Aplicação na Montagem de Estruturas

Como apontado na revisão bibliográfica, a montagem robótica pode ser aplicada visando diferentes tipos de peças, estruturas, materiais e técnicas de junção destas peças ou membros. Desde o uso de elementos padronizados até personalizados ou únicos, com ou sem intervenção manual nos processos de junção ou aplicação destes.

A maior parte destas aplicações solucionam problemas relacionados à montagem através de intervenção manual (como aplicação de adesivos e parafusos ou vibrações visando resolver conflitos de encaixes tradicionais) ou hardware (adicionando mais robôs ou prensas automatizadas). Nesta pesquisa, considerou-se como premissa que questões projetuais podem viabilizar a montagem com robôs (capítulo “2. Objetivos”). Deste modo, utilizando-se o método de Projeto Para Fabricação e Montagem (design for manufacturing and assembly – DFMA) e suas diretrizes, o uso de encaixes coloca-se como uma estratégia de resolução de problemas de posicionamento, precisão, movimento e outras questões referentes à montagem robótica.

Diversas pesquisas utilizam elementos em madeira na montagem robótica (SOONDERGAARD et al, 2016; GRASER et al, 2020; LEUNG et al, 2021) devido à sua facilidade de uso na fabricação digital. Além disso, é um material amplamente usado em conjunto com encaixes tradicionais, com as mais diversas aplicações. Deste modo, nesta pesquisa, foi definido o recorte de testes de montagem de elementos (blocos) em madeira utilizando encaixes adaptados à fabricação digital e montagem robótica através do método de projeto para fabricação e montagem (DFMA).

#### 3.3.1. Encaixes como solução para montagem robótica

Os encaixes em madeira são utilizados há séculos nas mais diversas culturas. Estes apresentam o objetivo básico de conectar peças menores em estruturas maiores, porém também podem ser providos de aspectos estéticos, criando diferentes efeitos visuais. Deste modo, eles foram utilizados (e ainda são) amplamente, seja em estruturas de grande porte ou até peças de mobiliário.

Cada cultura desenvolveu diferentes encaixes com base em seus objetivos. A arquitetura tradicional japonesa, por exemplo, deriva uma parte de sua estética do aprimoramento de técnicas de encaixes em madeira (Figura 92).



**Figura 92 – Peças demonstrando o uso de conexões na arquitetura japonesa na Japan Society de Nova York**

**Fonte: adaptado de <[www.architecturaldigest.com](http://www.architecturaldigest.com)>**

Em outras culturas os encaixes podem não ter tido uma influência tão grande na estética da arquitetura, optando muitas vezes por esconder estes encaixes. Independentemente de sua influência estética, os encaixes e suas geometrias tinham um aspecto prático de distribuição de forças. Atualmente, diversos encaixes em madeira foram também adaptados a outros materiais, sendo utilizados amplamente nas mais diversas indústrias. Além disso, novos tipos de encaixes ainda são desenvolvidos em diversos materiais, visando diferentes objetivos de distribuição de forças, montagem/desmontagem e outros.

Nas pesquisas levantadas de montagem robótica de elementos de madeira, quase todas utilizam adesivos ou pregos/parafusos para realizar a conexão entre as peças (JAN et al, 2015; SONDEGAARD et al, 2016). Estas formas de conexão atendem às normas de construções em madeira, porém insere mais processo e elementos na montagem. Sendo que nem sempre estes processos são realizados de modo

automático; normalmente, a aplicação de adesivos ou parafusos é feita de modo manual (SONDERGAARD et al, 2016). Considerando o uso secular de encaixes e que existem diversos edifícios atuais que utilizam somente conexões em madeira, o uso de encaixes reduziria o número de processos e elementos e pode tornar a montagem mais rápida e precisa.

Apesar de algumas pesquisas utilizarem encaixes nas obras produzidas, estes normalmente têm um aspecto estético ou de alinhamento, sendo ainda utilizados outros métodos de conexão entre as peças, além do encaixe. Até o momento, foi levantada somente uma pesquisa que explora o uso de encaixes com montagem robótica em madeira.

O grupo Gramazio Kohler Research vem desenvolvendo desde 2018 uma pesquisa de montagem de estruturas de madeira com encaixes (Figura 93). Os encaixes utilizados pelo grupo são do tipo meia-madeira (*cross-lap*), sempre ocorrendo nos planos correspondentes às faces das peças, podendo ser ortogonais ou em ângulo (LEUNG et al, 2021). Os encaixes seguem geometrias tradicionais, com pouca – ou nenhuma – modificação por terem sido fabricados digitalmente. A montagem contou com uso de grampos e ferramentas automáticas, em conjunto com o braço robótico (Figura 94). Diversos problemas foram solucionados por meio do hardware utilizado, não influenciando diretamente o projeto dos encaixes em si. Apesar da pesquisa desenvolvida em ETHz ter um objetivo similar à pesquisa do autor, esta teve um foco no projeto dos encaixes para solucionar os problemas encontrados, como será descrito neste capítulo.



**Figura 93 – Estrutura sendo montada com encaixes em madeira**

Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)



**Figura 94 – Detalhe de estrutura sendo montada com encaixes em madeira**

Fonte: [www.gramaziokohler.arch.ethz.ch](http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch)

### 3.3.1.1. Encaixes tradicionais

Na cultura japonesa, a arte de marcenaria é de extrema importância, sendo usados encaixes feitos com técnicas tradicionais até hoje (KANASAKI; TANAKA, 2013). Outras culturas, como a alemã, também desenvolveram encaixes próprios, ou absorveram os encaixes de outras culturas, como é o caso do movimento Maker de marcenaria nos Estados Unidos da América. Entre elas existem algumas diferenças, como o fato de a marcenaria japonesa não utilizar pregos ou adesivos, enquanto são amplamente utilizados na Alemanha (KANASAKI; TANAKA, 2013). Além disso, as características culturais do Japão mantiveram as técnicas de marcenaria vivas e sendo amplamente praticadas até hoje. Um exemplo disso são os templos, como o Santuário de Ise, no Japão, que são até hoje parcialmente reconstruídos ou reparados utilizando estas técnicas tradicionais. Diversas destas práticas também estão passando por um processo de reinterpretação para técnicas modernas.

As conexões japonesas podem ser de dois tipos: Tsugite e Shiguchi, sendo que o primeiro diz respeito a conectar duas peças de forma a criar uma peça de maior comprimento, enquanto o segundo diz respeito às conexões de dois ou mais peças em ângulo (Figura 95). Para cada tipo existem diversas conexões diferentes, as quais variam de acordo com os esforços, direção das forças e intenções estéticas.

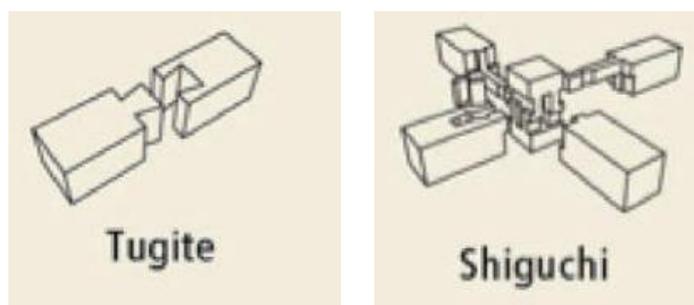
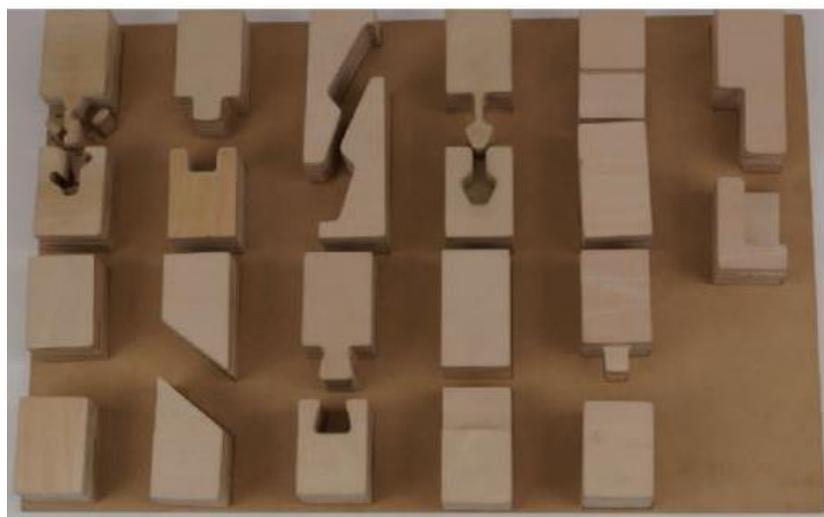


Figura 95 – Exemplos de encaixes tipo Tsugite e Shiguchi

Fonte: (KANASAKI; TANAKA, 2013)

Entre as conexões tradicionais, existem mais de duzentos tipos diferentes (KANASAKI; TANAKA, 2013), com variações para diferentes projetos ou entre diferentes artesãos. Em seu trabalho, Kanasaki e Tanaka identificaram 10 formas básicas para os encaixes (Figura 96), sendo que a combinação delas ou modificações na forma, compõe todas as demais (KANASAKI; TANAKA, 2013).



**Figura 96 – Dez formar básicas de encaixes**

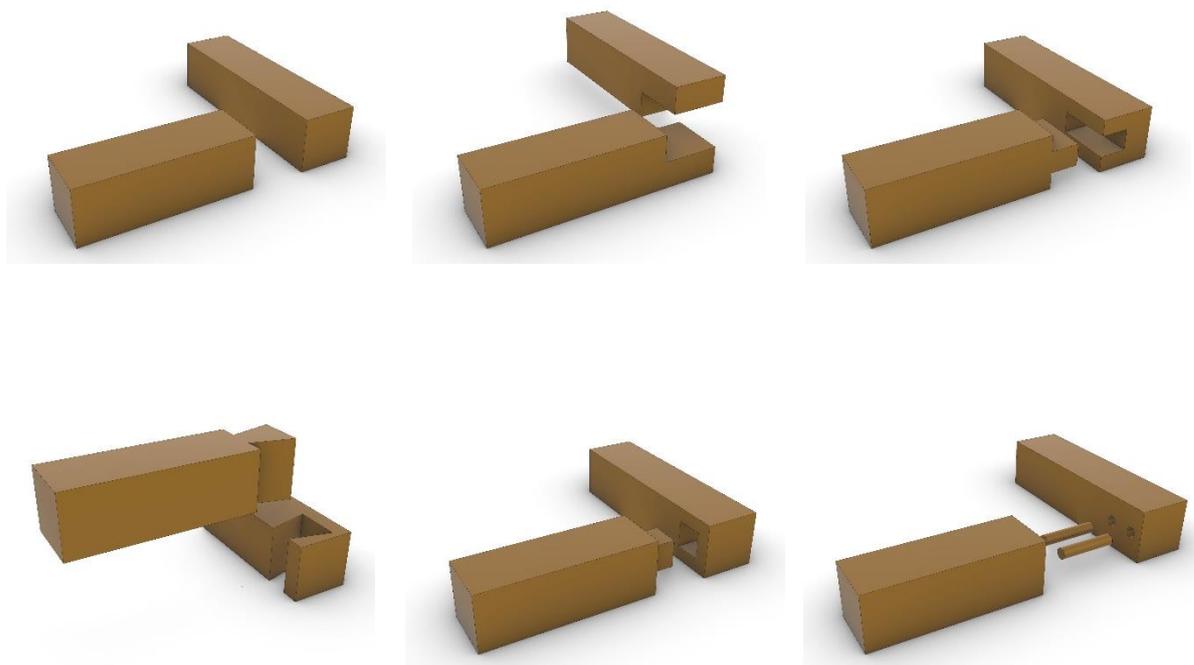
**Fonte: (KANASAKI; TANAKA, 2013)**

Dentre estas conexões, algumas são mais utilizadas, sendo elas a junta de topo, meia-madeira, lingueta-ranhura, rabo-de-andorinha, furo-espiga e com cavilhas<sup>9</sup> (Figura 97). A junta de topo se baseia no encontro entre a cabeça de uma peça e a cabeça de outra ou sua lateral, sendo uma conexão que sempre necessita de pregos ou adesivos fixadores. A conexão meia-madeira por ser feita entre duas pontas (ponta), uma ponta e o meio de outra peça (no meio) ou entre o meio de duas peças (cruzada). Dependendo das dimensões e posicionamento, pode ou não necessitar de adesivos. Na conexão lingueta-ranhura é criada uma lingueta em uma peça e um sulco na outra, de forma complementar, sendo uma conexão muito usada estruturalmente. A conexão rabo-de-andorinha é uma das mais utilizadas na produção de móveis e bastante usada também em estruturas, pois impede que as peças sejam separadas no sentido

---

<sup>9</sup> Em inglês: *butt joint, lap, tongue and groove, dovetail, mortise and tenon and pegs*

da “calda” formada. A conexão furo-espiga também é amplamente usada, permitindo esconder a conexão. A conexão com cavilhas se dá pela furação das duas peças e inserção de peças de madeira ou metálicas (cavilhas), fixadas com adesivo (como cola de madeira).



**Figura 97 – Modelos de conexões em madeira, respectivamente a junta de topo, meia-madeira, lingueta-ranhura, rabo-de-andorinha, furo-espiga e com cavilhas**

**Fonte: do autor**

Cada tipo de encaixe tem seu uso em decorrência das características esperadas, sejam elas estéticas, de distribuição de forças ou aplicação de cargas e estresse na estrutura. No caso da arquitetura tradicional japonesa, a questão estética tem grande peso na escolha do encaixe. Na atual cultura maker estado-unidense, apesar dos encaixes poderem ser escolhidos em decorrência da distribuição de forças e cargas, ainda há uma preocupação estética relacionada ao resultado final. Em termos gerais, há sempre uma preocupação com o resultado final, se os encaixes ficarão escondidos ou aparecendo – mas esteticamente agradáveis e bem-acabados.

### 3.3.1.2. Encaixes adaptados à fabricação digital

Com o desenvolvimento e popularização das fresadoras CNC, estes encaixes foram adaptados para a fabricação digital e desenvolvidos para geometrias mais complexas, fora dos eixos ortogonais tradicionais (KANASAKI; TANAKA, 2013). Em conjunto com a exploração de formas, a fabricação digital destes encaixes permitiu também explorar seus aspectos estéticos (Figura 98), além do que era possível nos encaixes tradicionais.

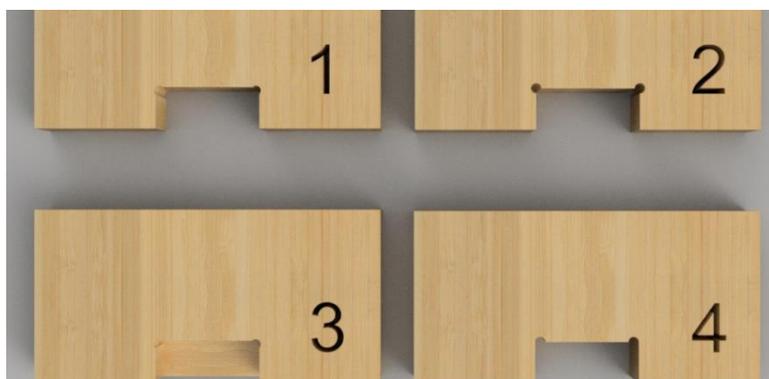


Figura 98 – Encaixes adaptados à fabricação digital

Fonte: [www.youtube.com/channel/UCckETVOT59aYw80B36aP9vw](http://www.youtube.com/channel/UCckETVOT59aYw80B36aP9vw)

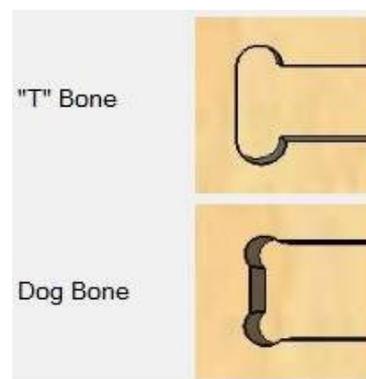
Outra diferença fundamental é que os encaixes tradicionais apresentam geometrias baseadas, quase que em sua totalidade, em retas, com ângulos bem definidos e sem arredondamento destes, pois com ferramentas manuais, como o formão, é mais fácil criar estes elementos retos. Já nos encaixes produzidos digitalmente, esta lógica é modificada. As fresadoras CNC, braços robóticos e outros trabalham com fresas que podem ter diversas geometrias, como tronco de cone, cilíndrica etc, porém por sua rotação, cria um volume de geometria radial, que cria sempre cantos arredondados. Uma das opções para solucionar esse problema é inserir furos arredondados nos cantos, criando os *dogbones* ou *t-bones* (Figuras 99 e 100), os quais servem para encaixar os cantos retos da outra peça, sendo algumas vezes usados como característica de design do encaixe (Figura 101). Outra solução é a incorporação dos ângulos curvos no projeto do encaixe (Figura 102). O uso destas estratégias está

ligado às possibilidades de produção, tendo em vista a limitação de graus de liberdade do robô produzindo a peça e sua geometria.



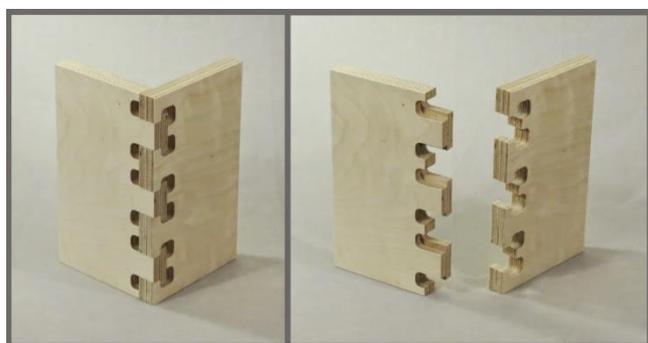
**Figura 99 – Arredondamento de cantos na fabricação digital de encaixes**

Fonte: [www.fablab.ruc.dk/more-elegant-cnc-dogbones/](http://www.fablab.ruc.dk/more-elegant-cnc-dogbones/)



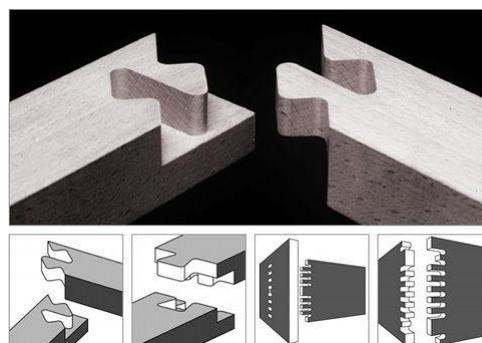
**Figura 100 – Exemplos de “T” Bone e Dog Bone**

Fonte: [www.mozaiksoftware4.com](http://www.mozaiksoftware4.com)



**Figura 101 – Arredondamento incorporado à estética do encaixe**

Fonte: [www.mkmra2.blogspot.com](http://www.mkmra2.blogspot.com)



**Figura 102 – Uso de arredondamento dos encaixes**

Fonte: [www.ponoko.com](http://www.ponoko.com)

Diversos estudos já foram realizados para adaptação destas conexões para a fabricação digital. O trabalho de Akiyoshi e Tanaka, por exemplo, buscou adaptar os princípios do tsugite e shiguchi para uma superfície regrada de dupla curvatura, apresentando uma malha triangular (Figura 103). Neste trabalho, utilizaram uma variação da meia-madeira para três eixos, visando o encaixe das peças nas três

direções da malha, criando “módulos” triangulares (Figura 104). Além disso, criaram uma peça bipartida para alongamento das peças (princípio do tsugite), a qual é travada com uma peça tipo rabo-de-andorinha (AKIYOSHI; TANAKA, 2014).



Figura 103 – Malha triangular com encaixes fabricados digitalmente

Fonte: (AKIYOSHI; TANAKA, 2014)

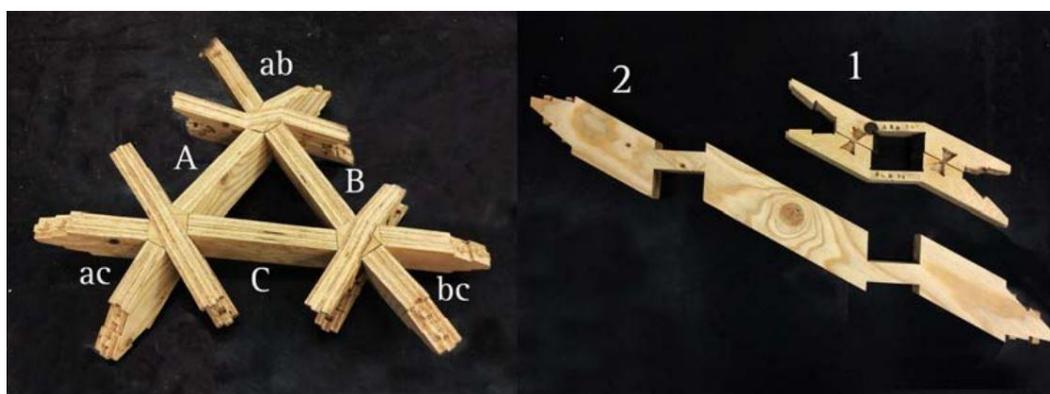
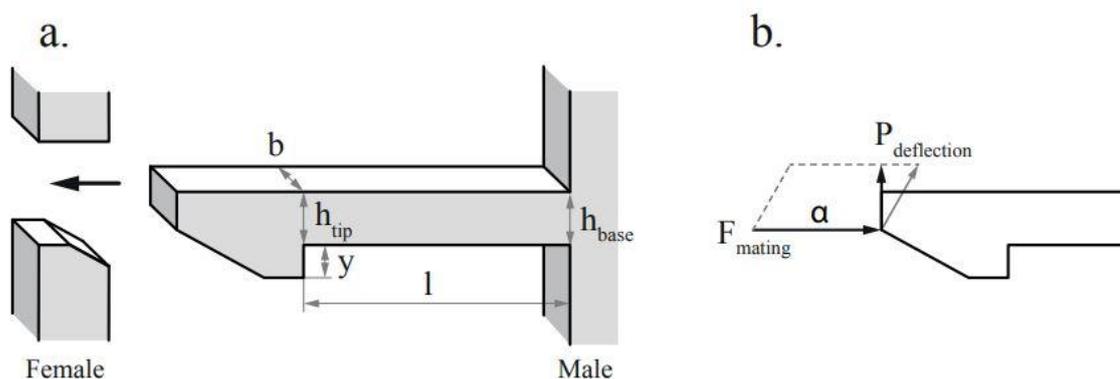


Figura 104 – Encaixes utilizados e método de conexão

Fonte: (AKIYOSHI; TANAKA, 2014)

Tanto os encaixes tradicionais quanto suas adaptações e releituras para geometrias complexas e fabricação digital se baseiam na rigidez do material e distribuição das forças. Outras pesquisas buscam encaixes feitos com outros materiais, como plástico, o qual possui flexibilidade, e adaptando-os à fabricação digital com madeira, como é o caso da conexão *snap-fit* (Figura 105) (ROBELLER et al, 2014). Esta

conexão é de fácil encaixe, por sua flexibilidade, criando também um travamento e impedindo que a peça saia (ROBELLER et al, 2014). Contudo, esta conexão não transmite adequadamente os esforços de uma peça para a outra, necessitando de componentes auxiliares em sua geometria.



**Figura 105 – Encaixes *Snap-fit***

**Fonte: ROBELLER et al, 2014**

Como se pode notar, a simples cópia de um encaixe já existente pode não ser adequada à fabricação digital. Este deve ser adaptado considerando o material, ferramenta de fabricação, distribuição de forças e outros fatores diversos. Além dos aspectos funcionais relacionados à geometria, pode-se apontar também aspectos estéticos. Estratégias como t-bone ou dog-bone, por exemplo, podem não garantir uma transição entre os elementos ou criar vazios indesejados nas peças. Uma solução integrada entre o encaixe e o método de fabricação é fundamental para garantir que sua função e objetivos sejam cumpridos.

### 3.3.1.3. Projeto para Fabricação e Montagem

Como citado, existem mais de duzentos tipos diferentes de encaixes tradicionais (KANASAKI; TANAKA, 2013), além das adaptações para a fabricação digital e encaixes utilizados com outros materiais, como o plástico. Nesta pesquisa selecionaram-se dois encaixes: por pinos (sendo este uma variação da cavilha) e rabo-de-andorinha. Ambos foram selecionados por serem amplamente utilizados na marcenaria tradicional e permitirem a conexão entre peças de modo vertical e horizontal, respectivamente.

As peças e encaixes para montagem podem ser fabricadas em diversos tipos de materiais e com diversas técnicas. Nesta pesquisa, utilizou-se a madeira e método de fabricação subtrativa para fabricar as peças de teste de empilhamento em escala reduzida. Somente as peças de teste do pavilhão foram impressas em resina, devido à escala.

Para a adaptação dos encaixes tradicionais à fabricação e montagem digitais, levando em conta as características das aplicações, utilizou-se os princípios do Projeto para Fabricação e Montagem. O Projeto para Fabricação e Montagem tem como objetivo reduzir o número e operações e peças no processo de montagem, tornando-o mais fácil de realizar (BOOTHROYD et al, 2011). Métodos tradicionais de projeto levam em conta somente fatores de produção e material gasto, podendo resultar em maior número de peças, complexidade na montagem e necessidade de ajustes manuais (BOOTHROYD et al, 2011). Sabe-se que os processos de fabricação têm impacto decisivo no projeto e design das peças (GHERY), o mesmo ocorre com os processos de montagem, os quais devem ser incorporados no projeto. Ao reduzir o número de peças e levar em conta as operações de montagem, este método de projeto pode reduzir os erros de montagem (BOOTHROYD et al, 2011).

Nos testes iniciais de montagem, identificou-se problemas durante a montagem com os robôs de baixa precisão e grandes deslocamentos. Estes fatores levaram à exploração de modificações dos encaixes, visando: (1) facilidade na montagem, (2) maior precisão no processo de montagem e (3) menor deslocamento entre as peças.

Considerando a montagem com robôs e este foco na precisão, selecionou-se como estratégias para as modificações dos encaixes (1) o uso de guias ou superfícies inclinadas para direcionar o movimento das peças, (2) retirada de cantos retos, tanto pela fabricação quanto pela montagem, e (3) redução das folgas entre peças a exclusivamente o necessário. Como citado, apesar de terem sido utilizadas em diversos projetos citados anteriormente, desconsiderou-se o uso de operações como aplicação de adesivos ou parafusar peças, devido a serem operações demoradas e complexas (BOOTHROYD et al, 2011).

Idealmente, os encaixes devem ser justos e refinados (KANASAKI; TANAKA, 2013), estando relacionados à precisão e força exercida pelo robô durante o encaixe. Contudo, devido aos testes preliminares e robôs utilizados, dois principais foram previstos: (1) falta de precisão em relação ao posicionamento inicial das peças e seu movimento, e (2) refinamento das dimensões do encaixe, para que não fique com folgas nem com excesso de material, evitando sua entrada. Estas questões foram trabalhadas durante o desenvolvimento dos encaixes e experimentos de montagem, como se verá a seguir.

### 3.3.2. Desenvolvimento e Experimentos de Montagem

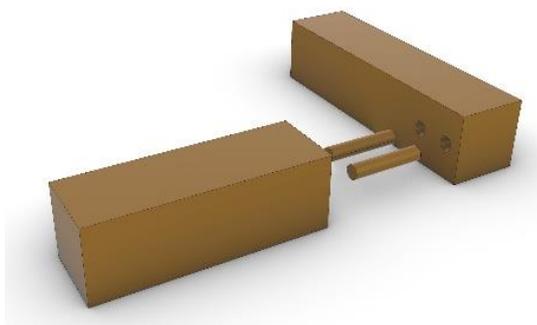
O desenvolvimento dos dois encaixes (por pinos e rabo-de-andorinha) teve como foco os processos de fabricação e montagem, levando em conta a precisão dos processos e buscando corrigir possíveis deslocamentos. Para cada encaixe foram realizadas três etapas: (1) montagem inicial sem modificações do encaixe, (2) iterações incrementais e suas influências da montagem e (3) montagem do encaixe modificado final e análise de precisão.

As modificações de design para cada encaixe variam de acordo com as características intrínsecas a este. Contudo, seguem alguns princípios do design para fabricação e montagem, sendo eles a dimensão dos elementos, inclinação de faces e diferença entre a parte positiva e negativa do encaixe – ou folgas (BOOTHROYD et al, 2011). Como se verá, a inclinação de faces – ou chanfros – permitiu o redirecionamento das peças durante a montagem, realizando a correção de seu posicionamento. Os testes

de folga permitiram identificar qual a folga mínima para cada caso, levando em conta a força necessária para realizar o encaixe e o torque dos robôs utilizados.

### 3.3.2.1. *Encaixe por pinos*

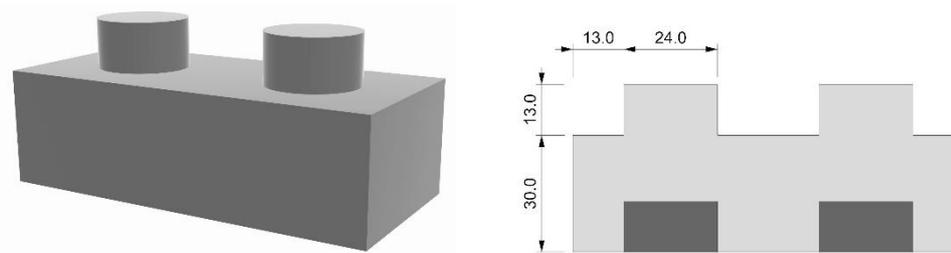
O encaixe por pinos é uma variação do encaixe por cavilha (Figura 106). Neste o pino está incorporado à peça e une as peças através da inserção do pino de uma peça no orifício de outra peça.



**Figura 106 – Encaixe com cavilha**

**Fonte: do autor**

Como citado, o desenvolvimento do encaixe tem três etapas: (1) montagem inicial do sem modificações do encaixe, (2) iterações incrementais e suas influências da montagem e (3) montagem do encaixe modificado final e análise de precisão. O encaixe original apresentava somente o pino e orifício incorporados à peça original (Figura 107). Tanto o pino quanto o orifício apresentavam raio de 12mm e altura de 10mm.

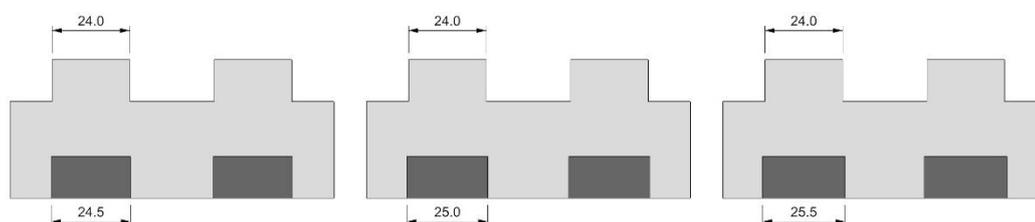


**Figura 107 – Perspectiva e corte do encaixe por pinos inicial (dimensões em milímetros)**

**Fonte: do autor**

O encaixe inicial não apresentou folgas entre o pino e orifício. Como resultado, não pode ser montado com nenhum dos robôs e apresentou dificuldades até na montagem manual. A necessidade de folgas era esperada, levando em conta a montagem com robôs. A primeira modificação explorou o uso de folgas, seguindo o terceiro item levantado do método de projeto para fabricação de montagem (redução de folga entre peça a exclusivamente o necessário).

Foram testados encaixes com folga de 0,5mm, 1mm e 1,5mm. Nestes manteve-se o raio dos pinos com 12mm e alterou-se o raio dos orifícios para 12,25mm, 12,5mm e 12,75mm (Figura 108). Na montagem manual do encaixe (Figura 109) notou-se facilidade na montagem para folga de 1mm e 1,5mm. Somente com a modificação da folga, o encaixe apresentou baixo sucesso nos testes de montagem por ambos os robôs utilizados na pesquisa (menos que 10% de sucesso no encaixe).



**Figura 108 – Teste de folga no encaixe por pinos (dimensões em milímetros)**

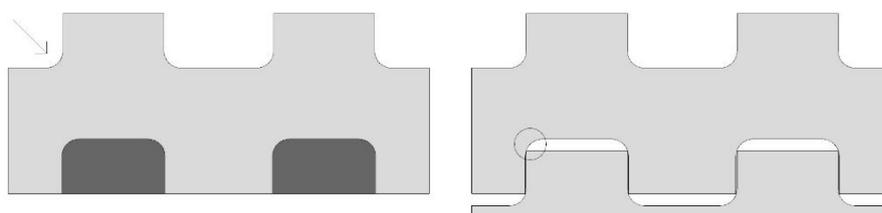
**Fonte: do autor**



**Figura 109 – Montagem manual de encaixe por pinos com folga de 1mm**

**Fonte: do autor**

Devido a geometria da fresa utilizada na fabricação das peças, os cantos retos internos apresentaram curvaturas (Figura 110). No processo de encaixe, esse arredondamento cria um vão entre as peças, impedindo que o encaixe ocorra de modo correto.

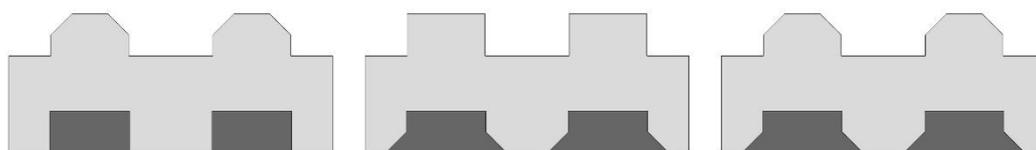


**Figura 110 – Arredondamento causado pelo método de fabricação no encaixe por pinos**

**Fonte: do autor**

Esta questão já havia sido prevista no segundo item no projeto para fabricação e montagem (retirada de cantos retos), sendo tratada de dois modos: (1) uso de superfícies inclinadas e (2) uso de sulcos para acomodar a geometria no encaixe. O primeiro segue a primeira diretriz do projeto para fabricação e montagem (uso de guias ou superfícies inclinadas para direcionar o movimento das peças), além de trabalhar também com o direcionamento do movimento.

As superfícies inclinadas podem variar de três formas: (1) presença no pino e/ou orifício, (2) área inclinada e (3) inclinação. Primeiro foram realizados testes com os itens 1 e 2 ao mesmo tempo, e considerando uma inclinação de 45°. A inclinação poderia estar presente somente no pino, somente no orifício ou em ambos (Figura 111). A área inclinada levou em conta o pino de orifício de 10mm, podendo variar de 30% a 70% em altura (Figura 112). Os testes foram avaliados de acordo com a taxa de sucesso na montagem por robôs e pela rigidez do encaixe (Tabela 7).



**Figura 111 – Uso de superfícies inclinadas no pino, orifício e em ambos**

Fonte: do autor



**Figura 112 – Variação das superfícies inclinadas no encaixe por pinos**

Fonte: do autor

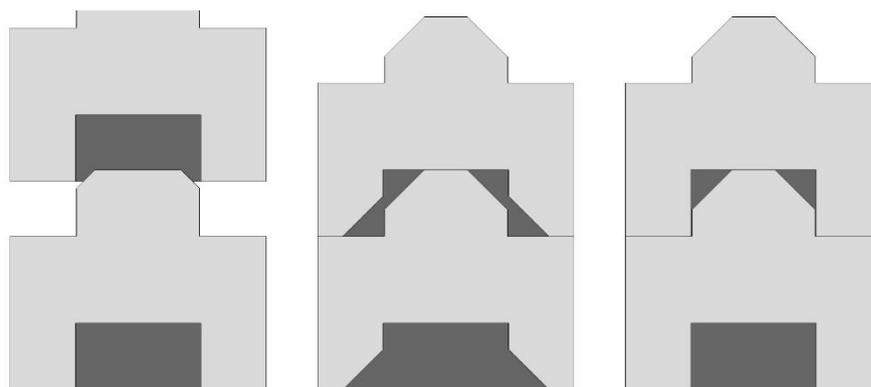
		Área inclinada				
		30%	40%	50%	60%	70%
Pino	Taxa de sucesso	Baixa	Média	Média	Alta	Alta
	Rigidez	Alta	Alta	Alta	Alta	Média
Orifício	Taxa de sucesso	Baixa	Média	Média	Média	Alta
	Rigidez	Alta	Alta	Alta	Alta	Média
Pino e orifício	Taxa de sucesso	Média	Alta	Alta	Alta	Alta
	Rigidez	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa

**Tabela 7 – Avaliação da área inclinada e disposição na montagem do encaixe por pinos**

**Fonte: do autor**

Considerou-se como taxa de sucesso baixa sendo de até 25% nos testes realizados, como médio de 25% até 75% e como alta acima de 75%. Considerou-se a rigidez de acordo com o deslocamento das peças por aplicação de uma força lateral. Caso a folga fosse similar a obtida no encaixe sem inclinação, foi considerada alta rigidez. Caso fosse maior, como média rigidez. Em certos casos, na aplicação da força as peças desencaixavam, sendo considerada como rigidez baixa. É importante salientar que, comparados com os modelos sem qualquer inclinação, os modelos com inclinação já apresentaram, em todos os casos, melhores resultados na taxa de sucesso de montagem.

Os testes indicaram que a superfície inclinada somente no pino e área inclinada de 60% teve os melhores resultados nestes testes. Para que o encaixe tenha sucesso, notou-se a necessidade de um equilíbrio entre a área inclinada (que permite o redirecionamento e facilidade de montagem) e a área reta (que, após a montagem, garante a rigidez). Nos casos em que havia pouco área inclinada, a montagem não teve tanto sucesso (por baixo redirecionamento e devida à precisão), ao mesmo tempo, grandes áreas inclinadas e, conseqüentemente, pouco área reta, levou a baixa rigidez e situações de desencaixe (Figura 113).



**Figura 113 – Variação de superfícies inclinadas no encaixe por pinos**

**Fonte: do autor**

A partir de determinada a área inclinada, foram realizados testes de inclinação. Inicialmente foi utilizada a inclinação de 45°, sendo também testados 30° e 60° de inclinação. Os testes de montagem com 30° e 60° apresentaram uma taxa de sucesso pouco menor que com 45°.

O pino originalmente apresentava 10mm, contudo, devido aos resultados dos testes de superfícies inclinadas, foram realizados testes variando a altura do pino (entre 10mm e 13mm) e a profundidade do orifício. Notou-se resultados similares, mas preferiu-se manter o pino com 13mm, para uma maior área de contato entre o pino e o orifício. Visando resolver as questões referentes ao processo de fabricação, que foram o arredondamento da base do pino e diferenças na altura pelo método de acabamento, foi inserido um sulco na base do pino e um aumento na profundidade do orifício.

A partir destas iterações e desenvolvimento incremental, foi possível chegar ao modelo final do encaixe. Estas etapas foram simplificadas no fluxograma abaixo (Figura 114). Os valores absolutos encontrados aqui de dimensões do encaixe podem não são universais para todas as aplicações, contudo, ao seguir as etapas do fluxograma, torna-se possível encontrar, para aplicações específicas, as melhores dimensões de encaixe para aquela aplicação, escala e geometria.

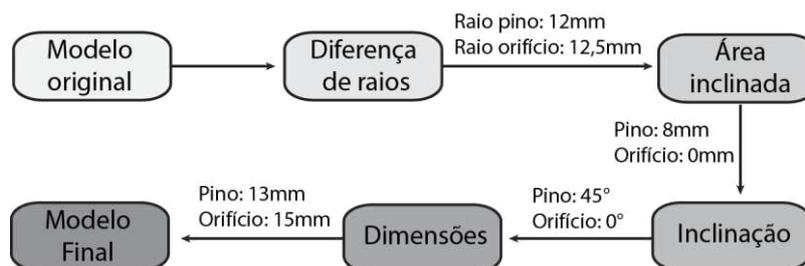


Figura 114 – Fluxograma de testes do encaixe por pinos

Fonte: do autor

O modelo final do encaixe por pinos apresentou uma folga de 1mm (pino com raio de 12mm e orifício com raio de 12,5mm), com 8mm de superfície inclinada no pino (60%) e sem inclinação no orifício, angulação de 45° nas superfícies inclinadas e altura de 13mm no pino e profundidade de 15mm no orifício (diferença de 2mm). Foi incluído também o sulco na base do pino considerando o diâmetro da fresa utilizada (6mm). Abaixo, tem-se o desenho técnico (Figura 115) e peças finais fabricadas (Figura 116).

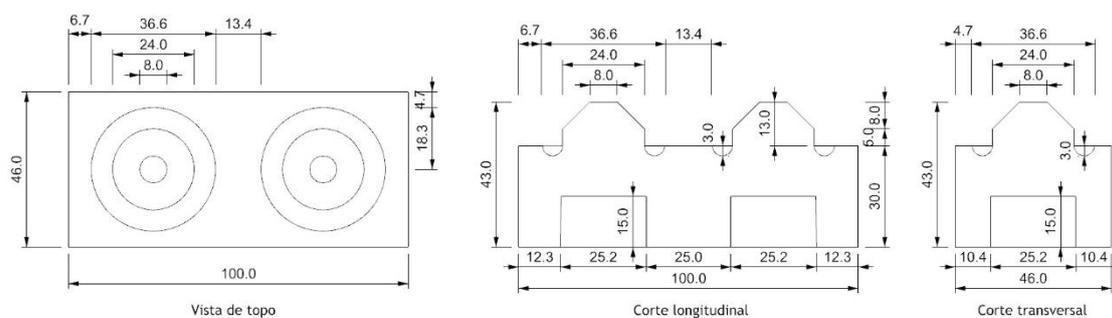


Figura 115 – Desenho técnico do encaixe por pinos (dimensões em milímetros, sem escala)

Fonte: do autor



**Figura 116 – Modelo físico do encaixe por pinos em sua versão final**

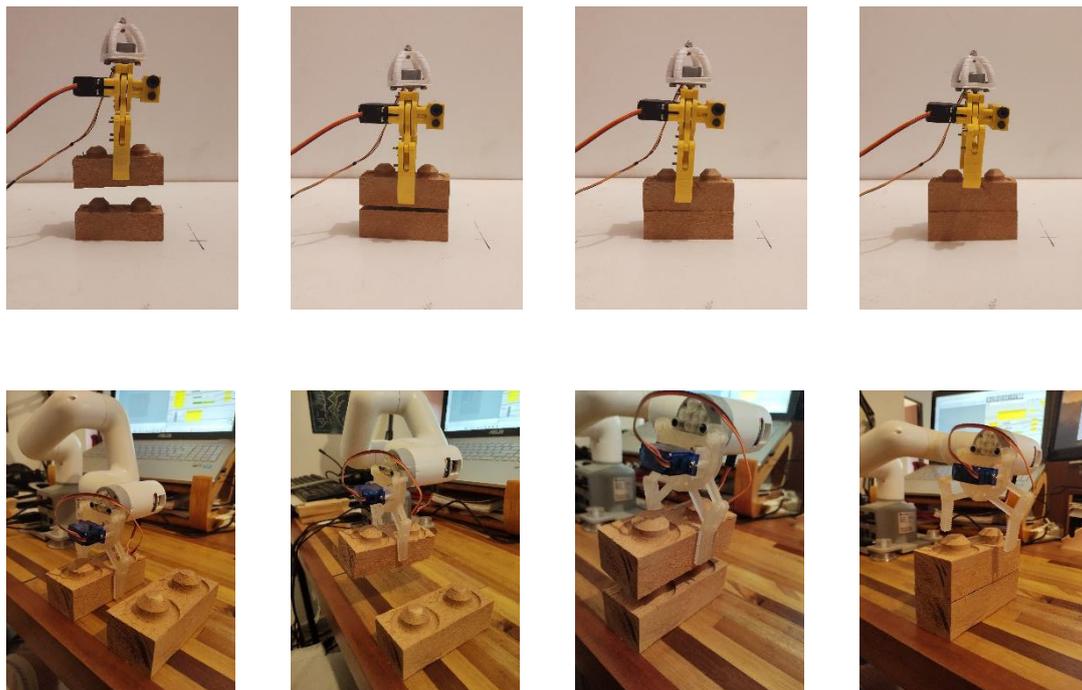
**Fonte: do autor**

O modelo foi testado no processo de montagem por empilhamento com ambos os robôs. Em ambos os casos, notou-se o redirecionamento e correção do posicionamento da peça durante o empilhamento. A precisão no processo de encaixe com pinos foi de  $\pm 2\text{mm}$  em relação ao modelo virtual com os dois robôs (Tabela 8). Desta forma, houve uma melhora significativa na precisão, realizando a montagem com sucesso (Figura 117).

Teste	Total de pontos	Diferença média	Diferença máxima
Cablebot	40	0,97 mm	2 mm
Braço robótico	40	0,89 mm	1,8 mm

**Tabela 8 – Diferenças medidas entre modelo digital e modelos digitalizados no encaixe por pinos**

**Fonte: do autor**



**Figura 117 – Montagem por empilhamento utilizando cablebot (superior) e braço robótico (inferior)**

**Fonte: do autor**

### 3.3.2.2. Encaixe tipo rabo-de-andorinha

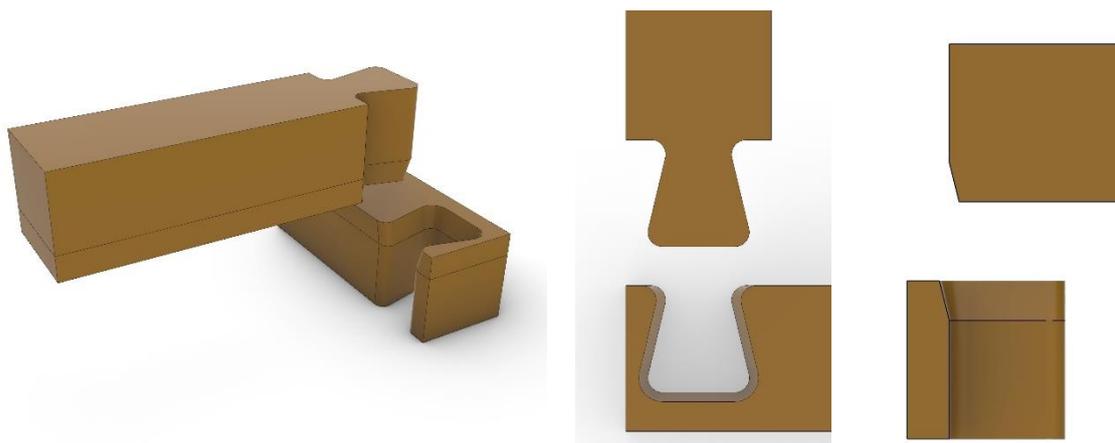
O encaixe tipo rabo-de-andorinha apresenta uma lingueta na qual a ponta é maior do que a base. Ele garante o travamento, enquanto realiza a distribuição do peso. Por este motivo, ele é amplamente utilizado desde em mobiliários (Figura 118) até em estruturas de madeira e grande porte.



Figura 118 – Uso do encaixe rabo-de-andorinha em mobiliário

Fonte: adaptado de [www.woodworkesjournal.com](http://www.woodworkesjournal.com)

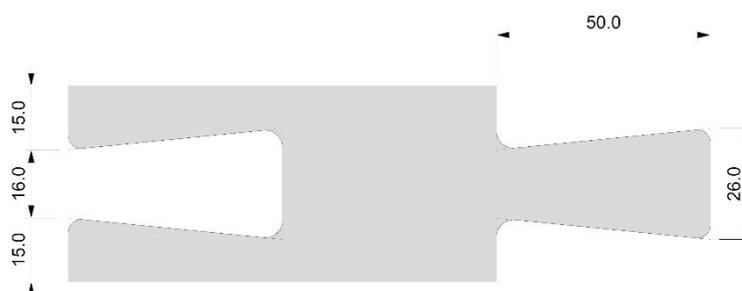
Apesar da geometria não ser igual ao do encaixe com pinos, foi possível utilizar parcialmente o fluxo de testes e alguns resultados obtidos para o desenvolvimento do encaixe rabo-de-andorinha. Inicialmente já se considerou o arredondamento das quinas, para permitir a fabricação digital, e considerou-se que seria necessária uma superfície inclinada para o redirecionamento das peças. A imagem abaixo apresenta um conceito esquemático deste encaixe (Figura 119).



**Figura 119 – Esquema conceitual do encaixe rabo-de-andorinha modificado**

**Fonte: do autor**

Para realizar a fabricação digital do modelo inicial encaixe rabo-de-andorinha, foi necessário adaptá-lo ao método de produção, com arredondamento dos cantos. As quinas com ângulo agudo tiveram um arredondamento com raio de 4mm e as com ângulo obtuso com raio de 3mm (Figura 120). Deste modo, garantiu-se que as quinas não seriam um empecilho durante os testes de encaixe.

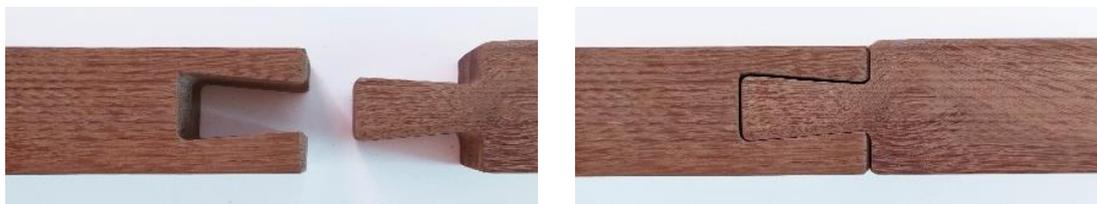


**Figura 120 – Modelo inicial do encaixe rabo-de-andorinha (dimensões em milímetros)**

**Fonte: do autor**

O modelo inicial não apresentou folga e foram inseridos chanfros de 5mm em 45° ao longo do encaixe visando a facilidade no encaixe. Tal como no encaixe por pinos, não foi possível realizar a montagem com os robôs e apresentou dificuldades na

montagem manual (Figura 121). Os chanfros se mostraram muito pequenos em relação ao encaixe todo (que apresentava 45mm) e não teve grande influência.



**Figura 121 – Teste de montagem com encaixe rabo-de-andorinha**

**Fonte: do autor**

A seguir foram realizados os testes de folga. Foram fabricadas peças com folga de 0,5mm, 1mm e 1,5mm. Estes encaixes apresentaram baixo sucesso nos testes de montagem com o braço robótico e não tiveram sucesso na montagem utilizando o cablebot. Nos modelos com folga, quando aplicada uma força lateral, estes apresentaram deslocamentos de 2mm (com folga de 0,5mm) até 11mm (com folga de 1,5mm) (Figura 122).

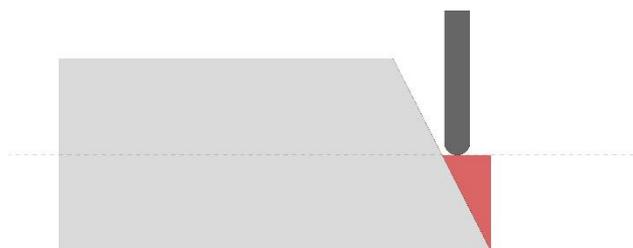


**Figura 122 - Deslocamentos no encaixe rabo-de-andorinha com tolerância de 0,5 e 1,5mm**

**Fonte: do autor**

Apesar do deslocamento obtido, preferiu-se manter a folga de 0,5mm, analisando sua influência nos demais testes. A seguir foram realizados os testes referentes às faces inclinadas. Devido ao equipamento de produção utilizado (fresadora CNC de 3 eixos com eixo rotacional MDX 540 Roland), houve limitações nas geometrias que precisaram tratadas. Considerando o caso demonstrado na imagem abaixo (Figura

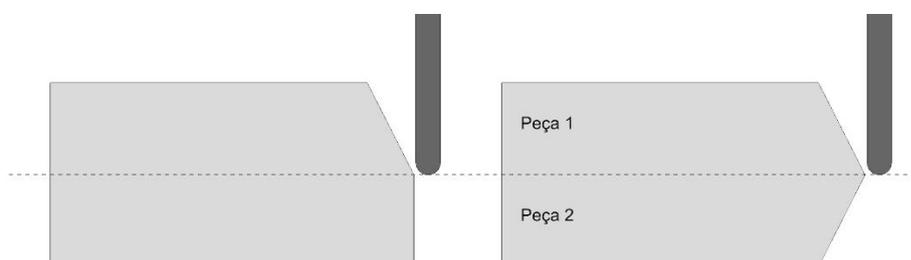
123), na qual se deseja fresar uma face inclina em toda a profundidade desta peça (em cinza claro). Neste caso, a fresa (em cinza escura) só será capaz de chegar até o eixo da peça, ou seja, sua metade. Neste caso, a área identificada em vermelho não será retirada e permanecerá na peça.



**Figura 123 – Exemplo de limitação no método de fabricação**

**Fonte: do autor**

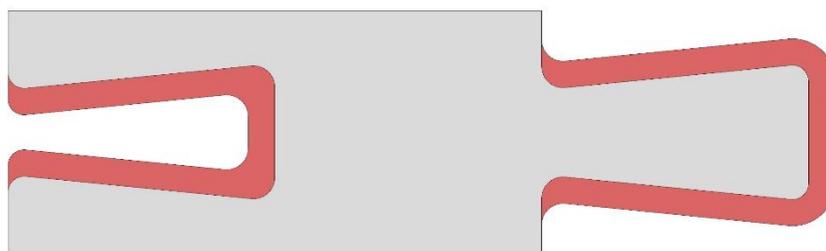
Existem duas formas de resolver este problema: (1) limitar as faces inclinadas a, no máximo, metade da peça ou (2) reduzir para a metade a altura da peça, de modo que sejam produzidas duas peças de cada vez, que possam depois serem separadas (Figura 124). Como a primeira solução limitaria a proporção de faces inclinadas e por acreditar que a inclinação total da face pode solucionar os problemas relacionados ao deslocamento das pelas, optou-se pela segunda. Assim, os demais testes foram realizados considerando peças de 22,5mm de altura.



**Figura 124 – Soluções para as limitações no método de fabricação do encaixe rabo-de-andorinha**

**Fonte: do autor**

Os testes de inclinação consideraram as faces do encaixe identificadas em vermelho na imagem abaixo (Figura 125). Foram testadas as inclinações de 34°, 24° e 12,5° que correspondem, respectivamente, a uma diferença entre o perfil superior e inferior de 15mm, 10mm e 5mm. Os encaixes foram avaliados pela taxa de sucesso e rigidez, seguindo os mesmos padrões do encaixe por pinos (Tabela 9).



**Figura 125 – Faces para aplicação de inclinação no encaixe rabo-de-andorinha**

**Fonte: do autor**

	Inclinação		
	34°	24°	12,5°
Taxa de Sucesso	Alta	Alta	Alta
Rigidez	Baixa	Média	Média

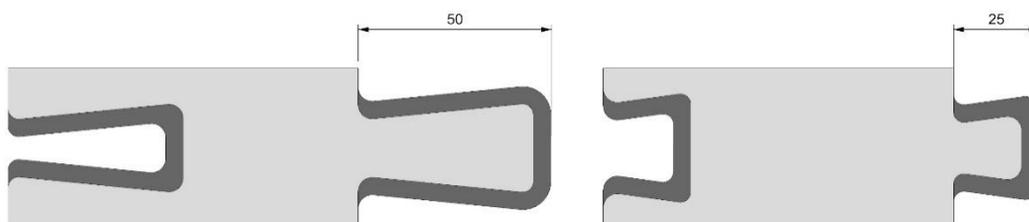
**Tabela 9 – Avaliação da área inclinada e disposição na montagem do encaixe por pinos**

**Fonte: do autor**

Todos os modelos com inclinação da face apresentaram uma boa taxa de sucesso na montagem. Todos também apresentaram um deslocamento quando aplicada uma força lateral e, no caso de inclinação de 34°, ocorreu a tendência ao desencaixe. Optou-se por utilizar a inclinação de 12,5° (5mm de diferença), sendo em vista que tenderia a uma rigidez.

Desde o modelo inicial, utilizou-se a dimensão para a aba do encaixe de 50mm, contudo, considerando o tamanho da peça, a aba equivalia a uma porção grande desta (um terço). Visando otimizar o encaixe e melhor uso do material, considerou-se

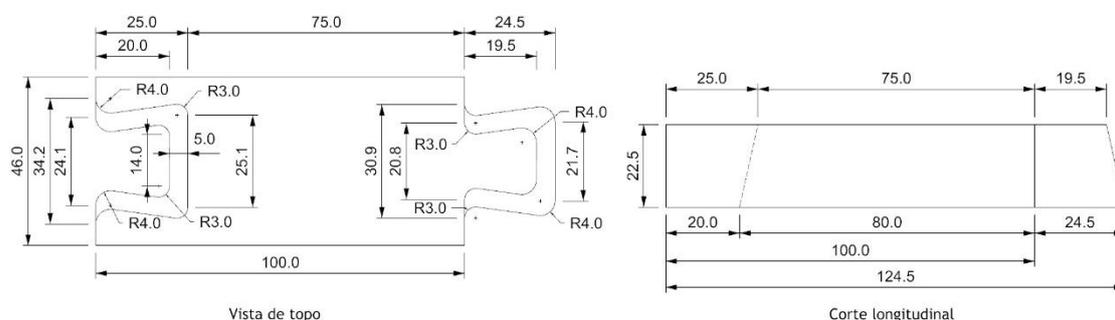
uma aba de 25mm (Figura 126). Ambos os modelos tiveram o mesmo desempenho, optando-se pela aba de 25mm, devido ao melhor uso do material e otimização do encaixe.



**Figura 126 - Desenho técnico do encaixe rabo-de-andorinha (dimensões em milímetros, sem escala)**

**Fonte: do autor**

O modelo final apresentou uma folga de 0,5mm, com inclinação de  $12,5^\circ$  em todas as superfícies do encaixe e tamanho da aba de 25mm. Como citado antes, em consequência do método de produção, houve uma redução na altura de cada bloco para 22,5mm. Foi necessário considerar o arredondamento dos ângulos, sendo que nos ângulos agudos foi adotado o raio de 3mm e nos ângulos obtusos o raio de 4mm. As imagens abaixo apresentam o desenho técnico da peça (Figura 127) e as peças fabricadas (Figura 128).



**Figura 127 - Desenho técnico do encaixe rabo-de-andorinha (dimensões em milímetros, sem escala)**

**Fonte: do autor**



**Figura 128 – Encaixes modificados**

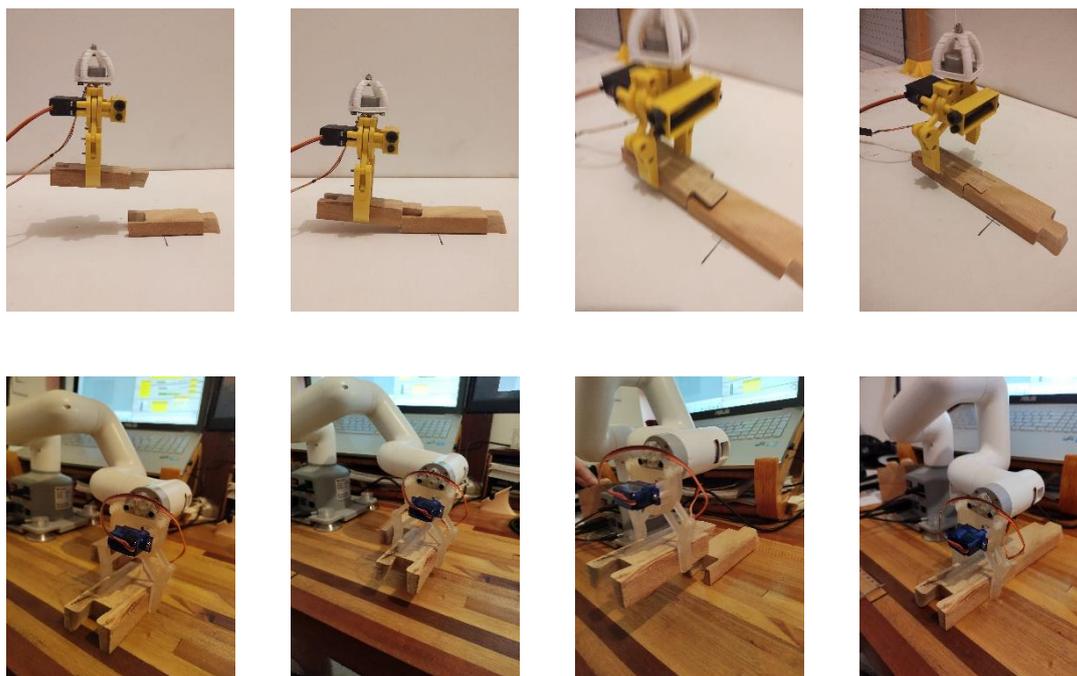
**Fonte: do autor**

O modelo foi testado no processo de montagem por empilhamento com ambos os robôs. Tal como no encaixe por pinos, em ambos os casos, notou-se o redirecionamento e correção do posicionamento da peça durante o empilhamento. A precisão no processo de encaixe rabo-de-andorinha foi de  $\pm 3,5\text{mm}$  em relação ao modelo virtual com os dois robôs (Tabela 10). Tal como no encaixe por pinos, o uso do encaixe rabo-de-andorinha modificado levou a uma melhora significativa na precisão, realizando a montagem com sucesso (Figura 129).

Teste	Total de pontos	Diferença média	Diferença máxima
Cablebot	40	1,69 mm	3,5 mm
Braço robótico	40	1,72 mm	3,4 mm

**Tabela 10 – Diferenças medidas entre modelo digital e modelos digitalizados no encaixe rabo-de-andorinha**

**Fonte: do autor**



**Figura 129 - Montagem por empilhamento utilizando cablebot (superior) e braço robótico (inferior)**

**Fonte: do autor**

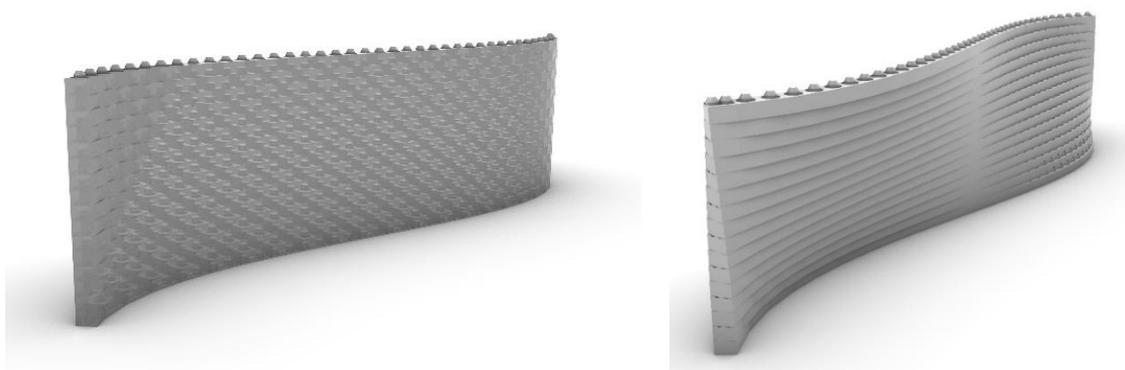
### 3.4. Modelagem paramétrica dos elementos

Após realização dos experimentos de montagem com os blocos com encaixes, estes foram incorporados em modelos paramétricos, permitindo que sejam utilizados em outras geometrias, em conjunto com os códigos e métodos desenvolvidos nesta pesquisa. Os encaixes foram modelados parametricamente, de modo a se adequar a diferentes geometrias, dentro das restrições de uso de cada um.

Estes foram aplicados a diferentes modelos virtuais, seguindo os princípios do empilhamento 2,5 D. Considerou-se diferentes aplicações possíveis destes. Como uma proposta complementar de aplicação, analisou-se o uso do encaixe rabo-de-andorinha em uma aplicação de posicionamento 3D, através de um projeto de pavilhão.

#### 3.4.1. Encaixe por pinos em blocos

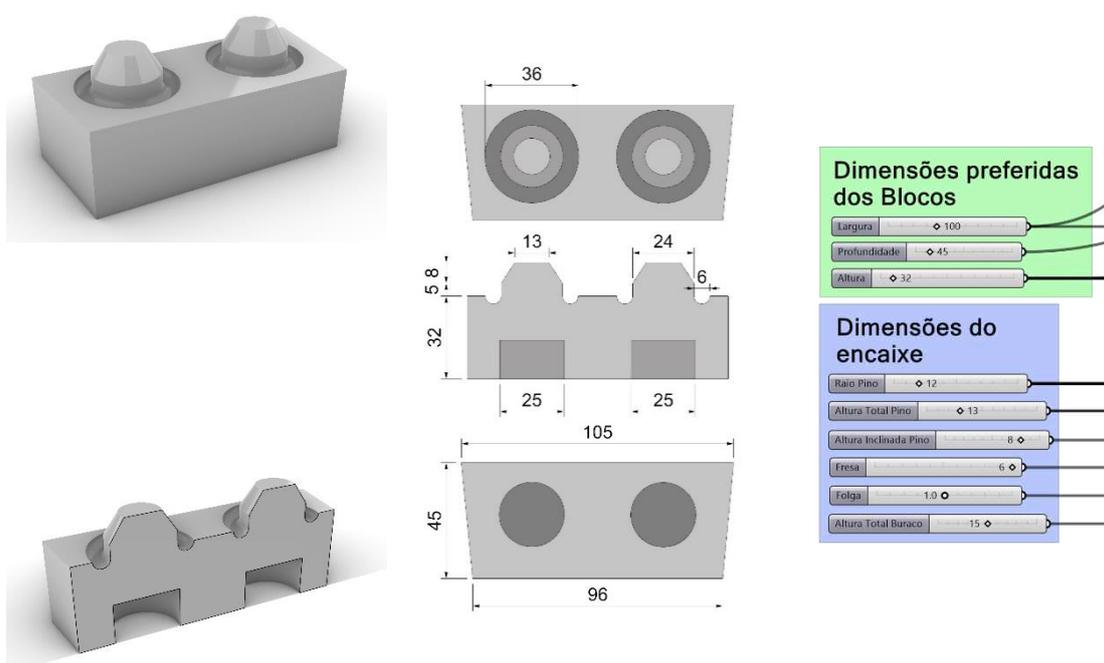
O principal uso do encaixe por pinos é pelo empilhamento de blocos, visando a construção de paredes que podem ter curvatura simples ou dupla curvatura (Figura 130). Seu travamento se dá entre camadas (vertical), similar a alguns blocos de construção.



**Figura 130 - Encaixe por pinos aplicado em parede de curvatura simples e dupla**

**Fonte: do autor**

O encaixe por pinos é gerado a partir das dimensões do bloco e do encaixe (Figura 131). Os blocos adequam suas posições, orientações e dimensões ao modelo digital da parede a serem aplicados. Em função do fato de as dimensões da parede não serem necessariamente múltiplas do tamanho do bloco, as dimensões do bloco podem sofrer ajustes de até  $\pm 5\%$  em sua largura. Utilizou-se um método de discretização que mantém as laterais dos blocos como planos (sem curvatura), visando reduzir o material gasto na produção (Figura 132).



**Figura 131 - Modelagem paramétrica e desenhos técnicos do encaixe por pinos (dimensões em milímetros)**

**Fonte: do autor**

A programação referente a modelagem do encaixe por pinos foi compilada em dois componentes: blocos iniciais e blocos com encaixes (Figura 133). Estes foram compatibilizados também com os componentes que geram os códigos de controle dos dois robôs (Figura 134).

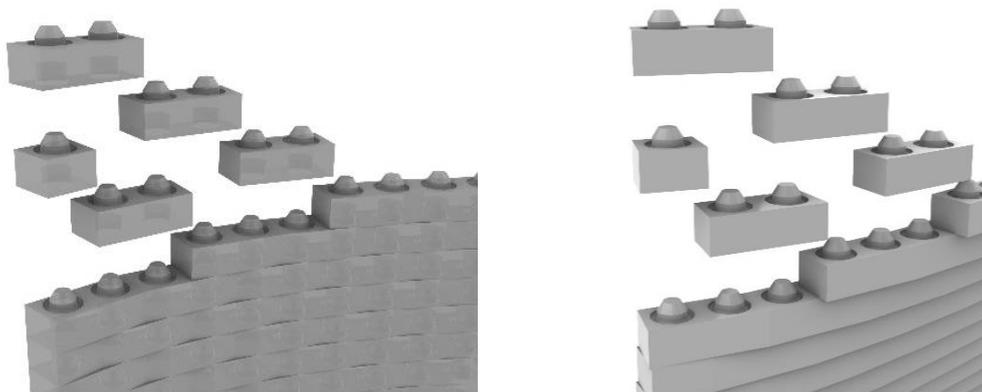


Figura 132 - Detalhe dos blocos aplicados aos modelos de paredes

Fonte: do autor



Figura 133 – Componentes para geração das peças com encaixe por pinos

Fonte: do autor

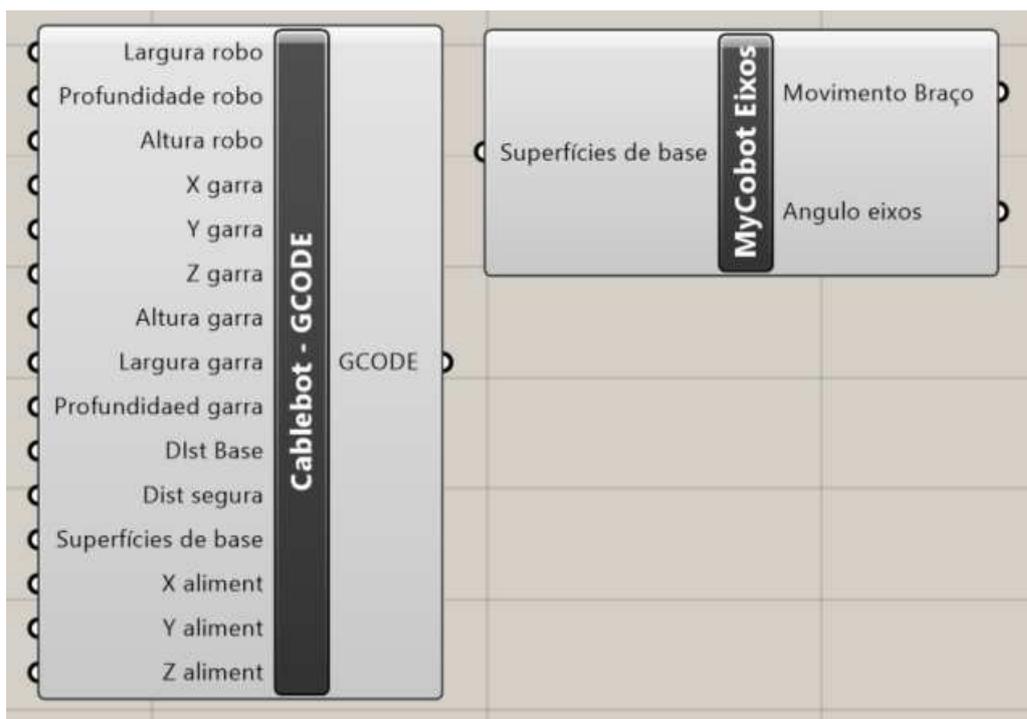
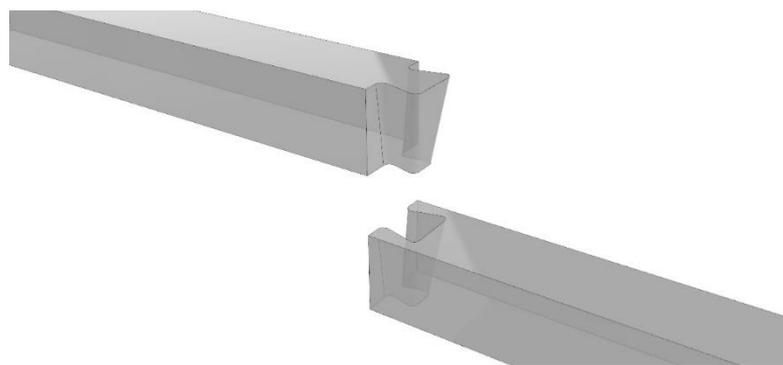


Figura 134 – Componentes de integração entre a geometria e os robôs

Fonte: do autor

#### 3.4.2. Encaixe rabo-de-andorinha em elementos lineares

O encaixe rabo-de-andorinha teve sua exploração em elementos lineares, visando os processos de montagem por empilhamento com os dois robôs. Nos estudos desenvolvidos, foram unidas duas ou mais peças de modo linear (Figura 135), podendo também ocorrer de forma angulada ou perpendicular.

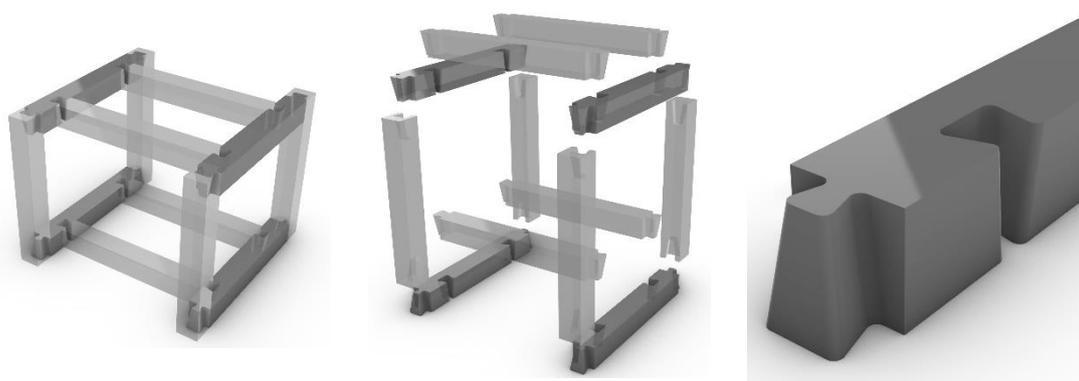


**Figura 135 – Encaixe rabo-de-andorinha em elementos lineares**

**Fonte: do autor**

Esta conexão pode se dar pelos vértices coincidentes de duas vigas ou um vértice de uma viga e uma aresta de outra. Apesar de não ter sido testado fisicamente a montagem de elementos angulados ou tipo “vértice–aresta”, é possível realizá-los também. Para isso, no processo de modelagem paramétrica do encaixe se levou em conta esta possibilidade.

Para demonstrar esta possibilidade, realizou-se a aplicação na estrutura de um banco (Figura 136), apresentando a orientação de encaixes e posicionamento dos encaixes. No caso da intersecção de múltiplas vigas, é necessário realizar o deslocamento destas, de modo que nunca haja a intersecção de mais de duas vigas.



**Figura 136 - Encaixe rabo-de-andorinha aplicado em elementos lineares**

**Fonte: do autor**

O modelo paramétrico segue os princípios geométricos utilizados no modelo final do encaixe rabo-de-andorinha. A modelagem paramétrica foi compilada em um componente (Figura 137) e compatibilizada com os componentes de controle dos robôs. O componente gera o encaixe-base, permitindo controlar a face e posição de aplicação do encaixe. O encaixe-base é gerado a partir das dimensões da peça, inclinação das faces, tamanho de aba e raio da fresa. A profundidade média do encaixe é de metade da espessura da viga no qual será inserido, visando evitar problemas estruturais e falta de continuidade da peça no modelo paramétrico.

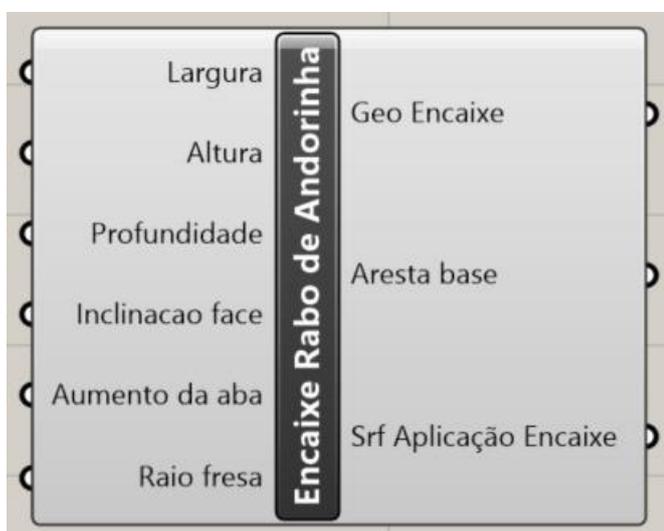


Figura 137 – Componente para geração de peças com encaixe rabo-de-andorinha

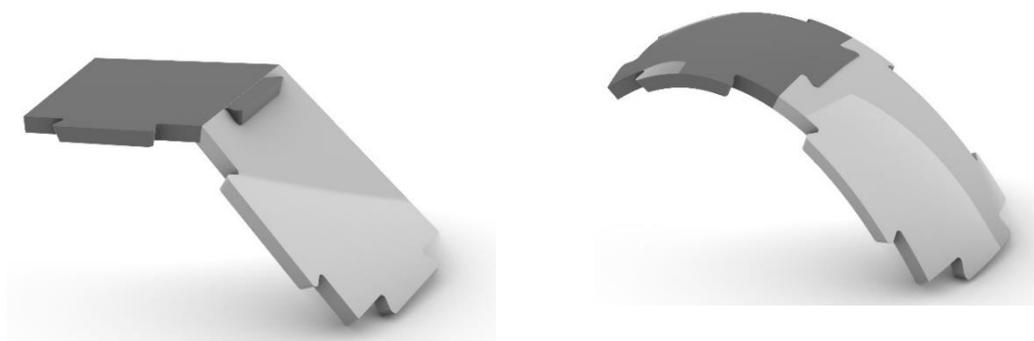
Fonte: do autor

#### 3.4.3. Encaixe rabo-de-andorinha em painéis

Além da aplicação em elementos lineares, o encaixe rabo-de-andorinha foi também aplicado, em modelos digitais, em painéis. No caso de aplicação aos painéis, foram considerados diversos métodos de discretização de superfícies, os quais haviam sido utilizados na pesquisa de mestrado (CAMPOS, 2017). Os métodos de divisão com base em superfícies quadrangulares apresentaram dimensões mais regulares e menor complexidade na ordenação dos encaixes que os demais métodos explorados.

Dentre os métodos com superfícies quadrangulares, foram realizados testes com o uso de faces planas e face curvas.

A discretização utilizando faces planas apresentou problemas na orientação, angulação e dimensão dos encaixes. A zona de encontro de duas faces entre  $25^\circ$  e  $65^\circ$  não permite a aplicação do encaixe rabo-de-andorinha de modo eficaz, resultando em deformações ou redução do encaixe, inutilizando-o. O método de discretização utilizando a curvatura original da superfície (painéis com laterais coincidentes) apresentou uma continuidade dos encaixes, com baixa deformação destes no quesito dos ângulos e dimensões dos encaixes. Deste modo, adotou-se a discretização quadrangular de faces curvas, seguindo a curvatura original da superfície (Figura 138).

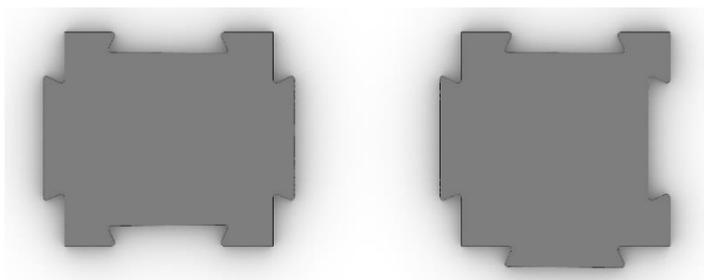


**Figura 138 - Métodos de discretização de superfície e sua influência no encaixe**

**Fonte: do autor**

Em ambas as aplicações do encaixe rabo-de-andorinha, foi necessário considerar a ordem de montagem para determinar a orientação e escolha das faces às quais os encaixes seriam aplicados. Para a realização da montagem, as peças já colocadas devem ter os encaixes vagos com ângulo complementar aos dos encaixes da peça a ser inserida. Na imagem abaixo (Figura 139), a disposição dos encaixes à esquerda (positivo em faces opostas) não permite realizar os encaixes sucessivamente, pois haverá, pelo menos, uma peça que terá ângulos de encaixe positivos e negativos a serem encaixados, impedindo o encaixe da peça. Já na disposição dos encaixes à

direita (positivo em faces adjacentes), permite os encaixes sucessivos, pois sempre terão encaixes positivos ou negativos, mas nunca os dois ao mesmo tempo. Desta forma, adotou-se a ordenação de faces adjacentes para aplicação dos encaixes.



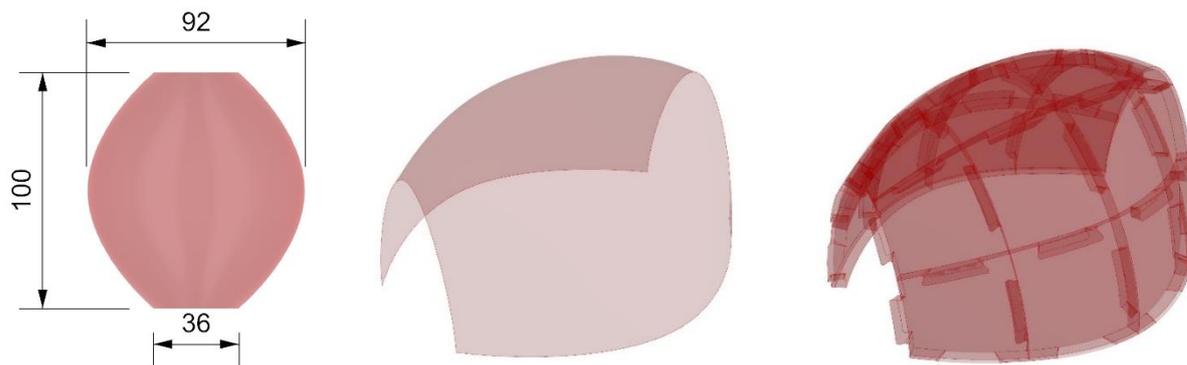
**Figura 139 - Geometria do encaixe rabo-de-andorinha aplicado em faces opostas e adjacentes**

**Fonte: do autor**

Para analisar a influência destes fatores, foi realizado um experimento de projeto, fabricação e montagem de um pavilhão em escala reduzida. Este também permitiu explorar a possibilidade de montagem por posicionamento 3D, para além dos experimentos de montagem com encaixes por empilhamento em planos paralelos. Este experimento não se relaciona com a comparação inicial realizada dentro dos experimentos de empilhamento 2,5 D e tem como foco a exploração do encaixe rabo-de-andorinha desenvolvido em um modelo complexo.

Considerando que o pavilhão iria utilizar somente encaixes, utilizou-se os princípios de formas-ativas para a geometria deste. As formas ativas apresentam o mesmo tipo de força agindo em todos os seus componentes, nesse caso, a compressão. Desta forma, seria o tipo de distribuição de forças ideal para esta aplicação.

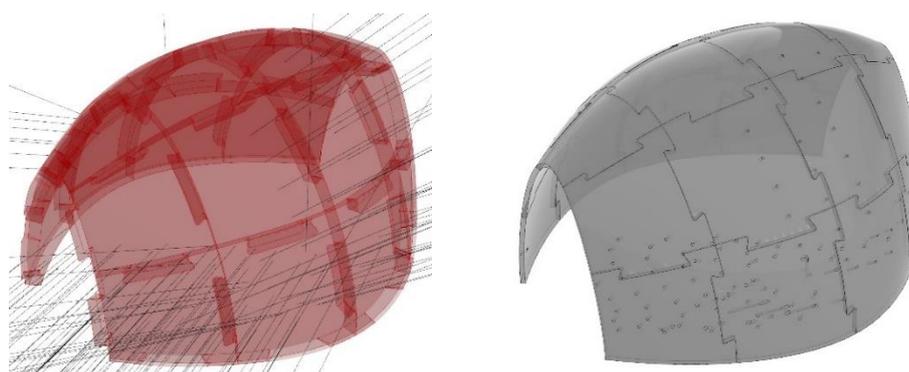
A forma do pavilhão foi gerada com uma geometria simétrica e convexa, visando o foco na montagem. Esta foi subdividida (discretizada) em faces, nas quais aplicou-se o encaixe rabo-de-andorinha de acordo com o modelo paramétrico desenvolvido (Figura 140).



**Figura 140 – Geometria e discretização do pavilhão (dimensões em milímetros)**

**Fonte: do autor**

Durante o período inicial da pesquisa, desenvolveu-se uma técnica de sombreamento e iluminação de precisão, que envolvia a fabricação e montagem digital. Contudo, devido ao foco da pesquisa em montagem, o método não foi incorporado nos experimentos de montagem. O Apêndice II apresenta os testes realizados referentes à iluminação e sombreamento de precisão. A Figura 141 demonstra como ficaria a geometria do pavilhão com este método aplicado às peças.



**Figura 141 – Aplicação do método de iluminação de precisão**

**Fonte: do autor**

Após a discretização e aplicação dos encaixes, as peças foram preparadas para a fabricação (Figura 142). Aponta-se que, tal como descrito no capítulo anterior, levou-se em conta a sequência de montagem durante a aplicação dos encaixes. Sem esta sequência, não seria possível realizar a montagem robótica ou manual.



**Figura 142 – Placas finais para impressão**

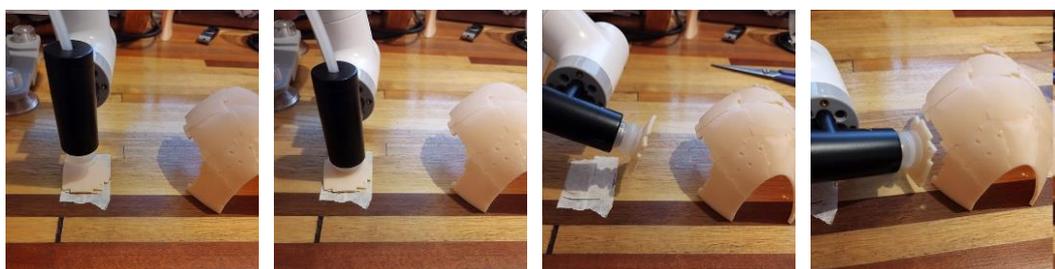
**Fonte: do autor**

As peças foram impressas em resina utilizando a impressora Creality LD-006, em consequência da precisão (devido aos encaixes e aberturas para a iluminação de precisão) e das dimensões na escala escolhida (1:50) (Figura 143). Nesta escala, o modelo do pavilhão apresentou 100 x 92 mm, sendo que as peças apresentaram de 22,4mm a 33mm, variando de acordo com a curvatura e posição. Por se tratar de posicionamento 3D, o código de controle do MyCobot Pi foi alterado, utilizando a posição da garra e orientação. Este método de controle apresentou problemas de controle na transmissão de dados entre o programa Blockly e o braço robótico. Pela geometria das peças, as tentativas de montagem foram realizadas com um dispositivo de sucção, mais adequado à geometria dos painéis e tamanho destes (Figura 144).



**Figura 143 – Peças do pavilhão impressas**

**Fonte: do autor**



**Figura 144 – Processo de montagem com atuador de sucção**

**Fonte: do autor**

Como citado antes, a sequência de montagem influenciou o posicionamento dos encaixes. A sequência de movimento considerou uma distância segura do modelo para realizar as principais movimentações e rotações, só então se aproximando de modo tangente ao modelo. Alguns problemas foram levantados durante as tentativas de montagem, indicando a necessidade de futuros desenvolvimentos, além de limitações e características da montagem por posicionamento 3D com braço robótico.

Além dos problemas relacionados ao equipamento e seu código-fonte, notou-se problemas: (1) relacionados à montagem angulada, no qual as primeiras peças não se sustentavam, (2) de escala em relação às peças e a precisão e (3) referentes ao movimento e caminho para o posicionamento das peças.

O primeiro foi solucionado realizando-se a montagem manual da base para então realizar o posicionamento das demais peças. Outras estratégias, como outros

elementos de base ou uso de robôs trabalhando de forma colaborativa podem também solucionar esta questão.

Em consequência da escala das peças e da impossibilidade de escalar a precisão do equipamento do mesmo modo, nem todas as peças puderam ser encaixadas deste modo. Os encaixes foram testados e concebidos em uma escala. Para a escala reduzida, seria necessário aumentar o tamanho relativo dos encaixes. Além disso, a escala reduzida utilizada não condiz com a precisão dos equipamentos utilizados. Possivelmente, a montagem poderia ser realizada em uma escala maior, com peças maiores, pelo mesmo equipamento.

A última questão diz respeito ao planejamento do movimento. No caso do empilhamento, era possível considerar uma altura segura para realizar os movimentos e rotações. Do contrário, o posicionamento 3D apresenta uma complexidade de geometria e movimentos que impede o uso somente de uma distância segura, sendo necessário realizar um planejamento do movimento, possíveis colisões, posição de aproximação e outros.

Apesar da primeira questão ser solucionada, a complexidade envolvida no planejamento de caminho e questão de escala do modelo impediram de todo o modelo ser montado com o uso do braço robótico. O modelo final foi parcialmente montado pelo robô e parcialmente de modo manual (Figura 145).



**Figura 145 – Pavilhão em escala reduzida montado**

**Fonte: do autor**

#### 4. Discussão dos resultados e conclusões

O principal objetivo desta pesquisa foi analisar como a montagem robótica em arquitetura pode ser viabilizada através de questões projetuais. Para isso se explorou o uso de robôs de dois tipos de robôs para experimentos de montagem por empilhamento em escala reduzida, através do método *Research by Design*. Como demonstrado no capítulo “5. Experimentações: Provas de conceito”, a aplicação de uma abordagem de solução projetual através de encaixes adaptados às estratégias de fabricação e montagem adotadas viabilizou a montagem por robôs, no que diz respeito às questões de precisão e tolerância.

A pesquisa apresentou sete fases, cada qual com seu objetivo, métodos e resultados, visando o objetivo principal da pesquisa. Estes estão resumidos na tabela abaixo (Tabela 11).

Objetivo	Métodos utilizados	Resultados obtidos
Fase 1: identificar tendências e lacunas de pesquisa de robôs em arquitetura	Revisão da literatura e estado da arte e revisão quantitativa de artigos nas bases definidas	Identificação de 5 lacunas e 5 tendências principais nas pesquisas
Fase 2: identificar pontos em comum e particularidades das pesquisas sobre uso de robôs em arquitetura nos centros visitados	Visitas técnicas a centros de pesquisa internacionais que desenvolvem pesquisa na área de robôs aplicados à arquitetura	Identificação de aspectos de pesquisa e possíveis barreiras ou potencialidades de desenvolvimento no país
Fase 3: desenvolvimento de um robô com características que visam a montagem por empilhamento	Adaptação de projeto open-source de impressora 3D modificada para o uso como cablebot	Criação e fabricação de robô (cablebot) para montagem por empilhamento

Fase 4: criar uma integração entre o código de controle dos robôs, o método de montagem abordado e os modelos utilizados	Conversão de coordenadas e rotações em arquivos CSV ou GCode	Desenvolvimento de código de integração e controle dos robôs com base no modelo digital paramétrico
Fase 5: adaptar encaixes tradicionais para a fabricação digital e montagem robótica	Uso do método de Projeto Para Fabricação e Montagem (DFMA)	Desenvolvimento de método de aplicação do DFMA em encaixes e aplicação em dois tipos de encaixes
Fase 6: testar os métodos aplicados utilizando montagem robótica através de provas-de-conceito	<i>Research By Design</i> com estudos de montagem por empilhamento e análise de precisão	Viabilização da montagem robótica pelo uso de encaixes, com aumento da precisão dos processos
Fase 7: analisar os resultados obtidos na pesquisa, comparando os resultados das duas primeiras fases com os experimentos realizados	Avaliação das modificações de projeto em decorrência dos processos de fabricação e montagem e comparativo com pesquisas realizadas no exterior	Panorama geral dos resultados obtidos, descrição do fluxo de trabalho desenvolvido na forma de um método de aplicação de robôs em arquitetura utilizando encaixes e identificação de três principais barreiras de desenvolvimentos para uso de robôs em arquitetura no Brasil

**Tabela 11 – Objetivos, métodos e resultados das fases da pesquisa**

**Fonte: do autor**

#### 4.1. Discussão dos resultados

Das cinco lacunas e cinco tendências de pesquisa identificadas, o recorte desta pesquisa explorou uma lacuna (montagem robótica) e duas tendências (uso de braço robótico e aplicação em processos de empilhamento/posicionamento). Em comparação ao braço robótico, desenvolveu-se o cablebot para também ser usados nos experimentos de montagem, em decorrência de sua compatibilidade com o método de montagem escolhido (empilhamento). A aplicação de encaixes modificados de acordo com o Projeto Para Fabricação e Montagem (DFMA), em conjunto com os demais passos citados acima, permitiram realizar os experimentos de montagem com robôs. Estas montagens finais apresentaram boa taxa de sucesso, bem como alta precisão – se comparadas com os resultados iniciais.

Como citado, identificou-se que este fluxo de trabalho pode ser descrito na forma de um método de aplicação de robôs em arquitetura. Deste modo, o método (Figura 146) apresenta nove etapas: concepção inicial, discretização da forma, avaliação do método de montagem, aplicação de encaixes (DFMA), definição do robô, compatibilização da precisão e tolerância, geração do GCode, montagem da estrutura, avaliação dos resultados e, caso necessário, reavaliação das etapas iniciais.

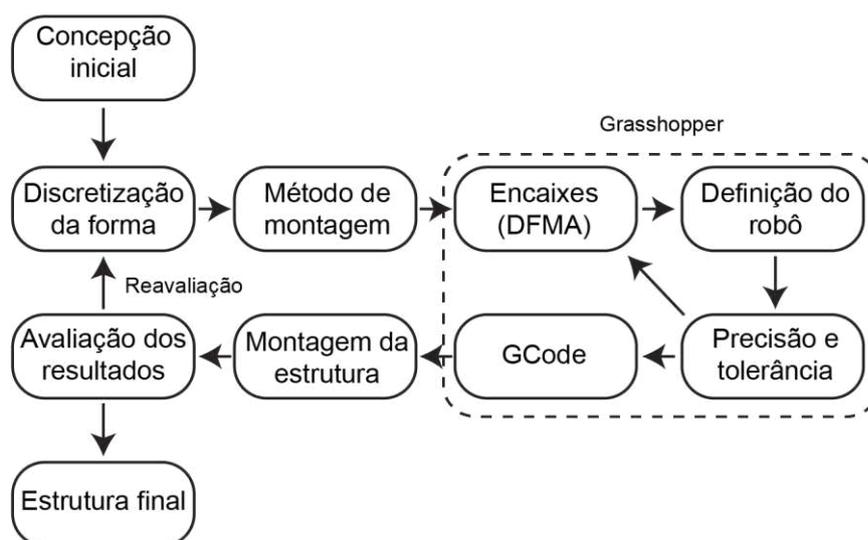


Figura 146 – Fluxograma do método desenvolvido

Fonte: do autor

No quesito prático de montagem, os princípios utilizados do Projeto Para Fabricação e Montagem (DFMA) foram fundamentais para a montagem correta dos modelos com os robôs selecionados. A aplicação dos encaixes modificados aumentou a precisão dos processos, permitindo realizar as montagens com os robôs.

Sobre a precisão dos processos, os testes iniciais de montagem permitiram definir a precisão do braço robótico e cablebot para  $\pm 4\text{mm}$  e  $\pm 12\text{mm}$ , respectivamente. Com o uso dos encaixes modificados, a precisão aumentou, chegando a valores de  $\pm 2\text{mm}$  no encaixe por pinos e de  $\pm 3,5\text{mm}$  no encaixe tipo rabo-de-andorinha. Comparando os resultados da montagem preliminar (sem encaixes) e final (com encaixes modificados) pode-se notar uma melhora na precisão dos processos, sem alteração dos robôs utilizados (Tabela 12).

Teste	Diferença média	Diferença máxima
Cablebot – parede reta	5,47 mm	11,9 mm
Cablebot – parede curva	5,36 mm	11,7 mm
Braço robótico – parede reta	2,07 mm	3,8 mm
Braço robótico – parede curva	2,11 mm	4,0 mm
Cablebot – encaixe por pinos	0,97 mm	2 mm
Braço robótico – encaixe por pinos	0,89 mm	1,8 mm
Cablebot – rabo-de-andorinha	1,69 mm	3,5 mm
Braço robótico – rabo-de-andorinha	1,72 mm	3,4 mm

**Tabela 12 – Diferenças medidas entre modelo digital e modelos nos testes realizados**

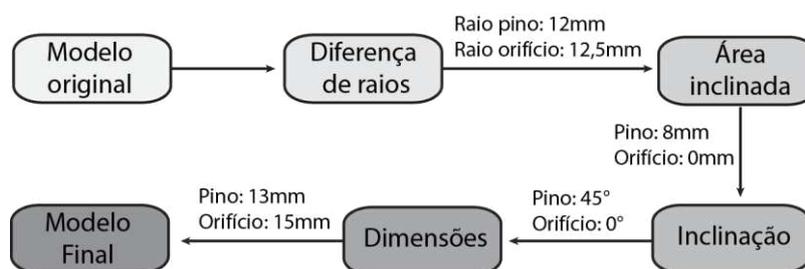
**Fonte: do autor**

Esperava-se que a nova precisão dos processos fosse definida pelo conjunto robô e tipo de encaixe, contudo, não se notou diferença na precisão dos processos com o mesmo tipo de encaixe, mas com diferentes robôs. Deste modo, pode-se concluir que a nova precisão dos processos está ligada, principalmente, ao design do encaixe.

Em ambos os encaixes, observou-se uma correção no posicionamento das peças, resultando em melhora de precisão dos processos. Virtualmente, considerando as geometrias dos encaixes utilizados, o encaixe com pinos é capaz de corrigir o posicionamento em até 16mm por peça e o encaixe rabo-de-andorinha em até 10mm

por peça. Esta correção permitiu a realização do encaixe com os robôs, inclusive com a combinação robô-de-andorinha e cablebot.

Apesar do foco nos encaixes por pinos e rabo-de-andorinha, os princípios levantados do Projeto para Fabricação e Montagem (DFMA) podem ser aplicados em outros tipos de encaixes, considerando suas características. O próprio fluxograma utilizado para o encaixe por pinos pode ser usado para outros encaixes (Figura 147), tal como foi utilizado no encaixe tipo rabo-de-andorinha, considerando as características de cada tipo de encaixe.

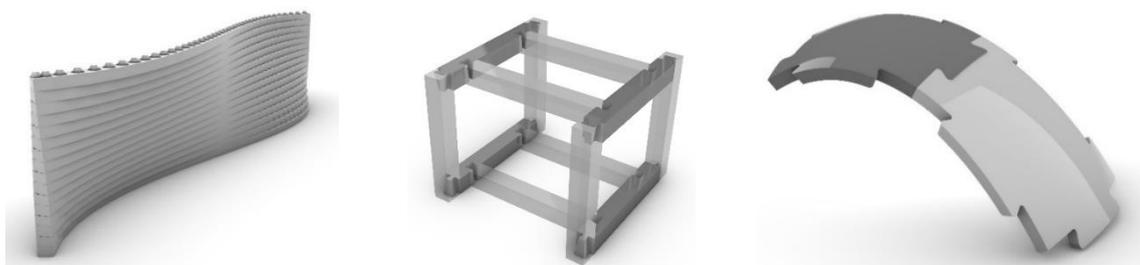


**Figura 147 – Fluxograma de modificação de encaixes**

**Fonte: do autor**

É importante salientar que algumas características da montagem tiveram também influência dos métodos de fabricação, como citado anteriormente. Possivelmente, outros métodos de fabricação poderiam apresentar resultados com pequenas diferenças. Há uma relação importante também entre método de fabricação e escala, considerando os problemas encontrados na montagem do pavilhão em escala (experimento do uso do rabo-de-andorinha em painéis).

Além dos experimentos práticos realizados, demonstrou-se que os encaixes e os componentes desenvolvidos podem ser utilizados em diversas geometrias. Entre eles, demonstrou-se (1) o uso do encaixe por pinos em blocos compondo uma parede de dupla curvatura, (2) o uso do encaixe rabo-de-andorinha em elementos lineares gerando uma estrutura e (3) o uso do encaixe rabo-de-andorinha na conexão de painéis (Figura 148).



**Figura 148 – Aplicações diversas dos encaixes desenvolvidos**

**Fonte: do autor**

As aplicações em paredes claramente seguem os mesmos princípios dos experimentos práticos de montagem realizados. A aplicação em elementos lineares criando estruturas, como o banco apresentado, pode ser montada a partir de métodos similares, utilizando o empilhamento 2,5 D. Já a aplicação em painéis, como apresentado, não pode ser montada com os mesmos métodos ou equipamentos. Como contraponto, o exercício do pavilhão demonstrou que a simples aplicação de uma mesma geometria, mas com outros métodos de fabricação e montagem, não garante a exequibilidade da montagem.

Estes experimentos indicaram que a compatibilização entre todos os fatores (projeto, fabricação e montagem) é fundamental para a montagem com robôs. Neste caso, o uso de técnicas de fabricação digital pelo fresadora Ronald MDX540 e montagem pelo cablebot desenvolvido ou pelo braço robótico MyCobot Pi, compatibilizados pelo uso do projeto para fabricação e montagem, levou ao sucesso de montagem nos experimentos realizados. Já nos primeiros experimentos ou casos em que não ocorreu esta compatibilização, não ocorreu o mesmo sucesso na montagem.

Deste modo, demonstrou-se que alterações projetuais podem viabilizar a montagem robótica, através de soluções que integrem os fatores de fabricação e montagem. Destaca-se que, dentro do recorte da pesquisa, esta viabilidade se dá, principalmente, no quesito de precisão dos processos. Independentemente da precisão inicial dos robôs, foi possível ajustar essa precisão a valores aceitáveis através das técnicas e métodos utilizados. Aponta-se também que, apesar dos testes iniciais de montagem terem sido realizados, em estruturas de maior porte e com maior número de elementos, a imprecisão encontrada na montagem poderia levar a problemas estruturais, possível colapso desta, ou ainda falta de definição da geometria.

Esta pesquisa considerou, como descrito no objetivo principal, que alterações projetuais (no caso, uso de encaixes modificados) poderiam viabilizar a montagem robótica, principalmente no quesito de precisão. Em comparação, cabe destacar a pesquisa “Timber assembly with distributed architectural robotics”, desenvolvida em ETHz e acompanhada durante as visitas técnicas. Esta também utiliza montagem robótica para elementos de madeira com encaixes, identificando problemas relacionados à precisão durante a montagem (apesar do uso de robôs industriais e visão robótica), os quais foram solucionados através de equipamentos (como grampos de pressão automáticos) e software (como visão robótica).

Ambas as soluções encontradas são válidas e permitiram a montagem robótica – apesar das escalas diferentes. Estas podem ser aplicadas a diferentes cenários, considerando os equipamentos, objetivos e métodos construtivos usados. Porém, destaca-se que o método usado pelo autor pode ser aplicado em qualquer pesquisa ou aplicação que trate da montagem robótica, inclusive viabilizando aplicações de robôs de baixa precisão.

Além dos resultados referentes ao objetivo principal da pesquisa, como já citado, cada fase apresentou seus resultados, sendo importante destacar alguns deles. A própria revisão da literatura permitiu não só identificar as lacunas e tendências na área de pesquisa (que são fundamentais para o desenvolvimento de pesquisas futuras, considerando o impacto na área), como também buscou uma melhor definição e classificação dos robôs, uma área em constante modificação e necessidade de revisão.

No decorrer da pesquisa, foram implementados 7 componentes no Grasshopper, sendo eles para a aplicação do encaixe por pinos e encaixe rabo-de-andorinha, para a compatibilização entre os modelos virtuais e cada um dos robôs, além de componentes específicos para os modelos usados nesta pesquisa. Estes estão descritos ao longo desta tese, de acordo com sua aplicação e utilização. Foram também realizadas modificações ao firmware Marlin, permitindo seu uso no cablebot (como descrito no capítulo 5.1.1). O desenvolvimento do cablebot, as modificações do firmware e componentes de integração entre os modelos e os robôs foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa e testes realizados. É importante destacar que alguns componentes e fluxos de integração foram gerados para sanar

dificuldades encontradas no controle e uso dos robôs. Como citado, existem uma falta de interfaces de usuários de fácil integração e com baixa flexibilidade, considerando operações complexas de montagem.

Considerando que foram usados tanto o braço robótico quanto o cablebot nos experimentos de montagem e a questão de compatibilidade entre o robô e a aplicação, faz-se necessária uma avaliação comparativa destes. A tabela abaixo (Tabela 13) busca comparar diversos aspectos de ambos os robôs, em relação aos usos realizados nesta pesquisa.

	Cablebot	Braço Robótico (MyCobot Pi)
Programação/ construção	Foi necessário construir e modificar o firmware	Tipo plug-and-play, pronto de fábrica
Facilidade de uso	Fácil controle pelo Repetier-Host	O Blockly permite um fácil uso
Integração com modelo virtual	O fluxo usado permitiu uma fácil integração por GCode	O fluxo usado permitiu uma fácil integração por CSV para empilhamento 2,5D
Flexibilidade no uso	Uso limitado a empilhamento 2,5D	Uso flexível (empilhamento e posicionamento) e atuadores
Flexibilidade na área de aplicação	Área flexível e pode ser ajustada de acordo com a área de aplicação	Área fixa e limitada às dimensões do braço
Manutenção	Pode ser realizada pelo usuário (hardware de impressora 3D open-source)	Precisa ser realizada pela empresa
Custo aproximado	R\$ 1.400,00	R\$ 5.300,00
Precisão original	+/- 12 mm	+/- 4mm

**Tabela 13 – Diferenças medidas entre modelo digital e modelos nos testes realizados**

**Fonte: do autor**

Ambos os robôs foram capazes de realizar os experimentos, contudo, considerando os aspectos listados de ambos, nota-se que, para a aplicação específica de empilhamento 2,5D, o cablebot apresenta mais vantagens que o braço robótico. Principalmente no que diz respeito à área de aplicação, manutenção e custo. A

facilidade de uso e integração também poderiam ser levadas em conta, porém advém do fluxo de trabalho e concepção do autor.

Apesar da maior precisão do braço robótico, esperava-se uma maior facilidade no seu uso, em termos de interface de usuário e facilidade de integração. Em termos de outras aplicações, como posicionamento 3D, ou em termos da flexibilidade de usos e atuadores, o braço robótico é mais vantajoso do que o cablebot. Esta questão retoma a necessidade do robô, métodos e geometria serem compatíveis entre si, podendo essa compatibilidade ser solucionada de diversos modos.

Durante a pesquisa, foram também identificados problemas e limitações gerais dos processos, os quais não haviam sido previstos no início da pesquisa. Estes, bem como um comparativo entre a pesquisa desenvolvida pelo autor e os centros de pesquisa visitados, levaram a enumeração de barreiras que impedem o desenvolvimento da área, principalmente no Brasil. Estes serão descritos a seguir, nas conclusões.

#### 4.2. Conclusões

Os robôs estão cada vez mais presentes na nossa vida cotidiana e nas mais diversas áreas. Já existem aplicações na área de arquitetura e espera-se um crescimento destas em breve. Como apontado, o uso de robôs pode ser com foco na produtividade e substituição de mão de obra ou com foco na exploração criativa. Esta exploração criativa permite extrapolar os atuais limites das aplicações robóticas, desenvolvendo novos meios de se trabalhar com os robôs, bem como soluções inovadoras e integradas.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, explorou-se o uso de robôs em escala para tipos determinados de montagem em arquitetura (empilhamento 2,5D). Através dos experimentos, demonstrou-se o potencial das técnicas do Projeto Para Fabricação e Montagem (DFMA) aplicadas à montagem robótica. Os experimentos permitiram analisar como questões projetuais podem viabilizar a montagem robótica, principalmente no que diz respeito à precisão dos processos, além de desenvolver uma metodologia para a montagem com robôs em arquitetura e um método de

aplicação dos princípios do projeto para fabricação e montagem em encaixes em madeira.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, notaram-se diversas características que, possivelmente, limitam o desenvolvimento de pesquisas sobre robôs em arquitetura no Brasil, bem como sua possível aplicação prática. Durante as visitas técnicas em centros de pesquisa internacionais que desenvolvem pesquisa na área foi possível compreender algumas características de como funcionam estes centros, as pesquisas desenvolvidas, características destas e da equipe e aplicações comerciais práticas na área de arquitetura. Esta dualidade permitiu um comparativo entre estas duas situações e identificação de algumas atuais barreiras para o desenvolvimento da área no Brasil.

A partir dos fatores observados na pesquisa desenvolvida pelo autor e nas visitas técnicas, pode-se identificar algumas possíveis barreiras para o desenvolvimento deste tipo de pesquisa na área. Foram identificadas seis barreiras atuais que necessitam de desenvolvimento: (1) interface do usuário, (2) flexibilidade dos softwares, (3) planejamento de movimento, (4) imprecisão dos robôs, (5) relações de custo dos robôs e (6) necessidade de uma equipe qualificada.

A falta de uma interface para o usuário que seja fácil de trabalhar foi algo notado nesta pesquisa e citado nas visitas técnicas. Comparando-se com impressoras 3D FDM domésticas: estas se baseiam em inserir um modelo, fornecer algumas características da impressão, realizar o fatiamento e a impressora é capaz de realizar a impressão. Não se encontrou um programa com interface adequada a um usuário leigo (ou semi-leigo) utilizar para controlar os robôs. Mesmo o controle do MyCobot Pi através do Blockly requer um mínimo de entendimento de programação visual, apresentando ainda diversos problemas e limitações. Nesta pesquisa isso pode ser identificado pelas as modificações de firmware e componentes de integração que precisaram ser desenvolvidos para realizar os experimentos. Atualmente, para se utilizar um robô que não seja pelo método “drag and record”, são necessários conhecimentos de programação.

Seria ideal um ambiente de trabalho digital onde se insere o modelo 3D – como os blocos com encaixes –, suas características e as características do robô (provavelmente seria necessário limitar os tipos de robôs utilizados, por ser muito

amplo). Possivelmente, programas específicos, como para o empilhamento 2,5D de blocos, poderiam solucionar esse problema pela segmentação dos usos e aplicações.

Sobre a questão de flexibilidade do software, atualmente os robôs são programados pelo método “drag and record” ou através de código de texto, contendo as coordenadas de seu movimento. Cada vez que há uma modificação na geometria, na aplicação ou similar, é necessário refazer o código – que normalmente não é feito de modo automático.

Por esta questão, a integração do cablebot com o grasshopper foi feito com base em um GCode personalizado. Este é gerado automaticamente com qualquer alteração da geometria e pode ser lido automaticamente pelo programa. Idealmente, este tipo de flexibilidade da programação, em que o programa do robô só precisa ler um arquivo com as coordenadas e seu movimento, também facilitaria seu uso – principalmente de modo criativo.

Comparativamente com impressoras 3D FDM cartesianas – e agora SLA, de cerâmica e etc – estas apresentam programas muito fáceis de serem utilizados, onde o modelo é facilmente carregado e os parâmetros de impressão são adicionados. Claro que existem usos e aplicações nas quais se faz necessário mudar o GCODE ou escrever GCODES específicos, mas foge das aplicações comuns.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, notou-se uma dificuldade por parte de outros desenvolvedores e programadores consultados no início da pesquisa em compreender estas necessidades. Este foi um dos motivos que levou ao autor desenvolver suas próprias soluções, além das restrições causadas pela pandemia COVID-19 (como a dificuldade de acesso ao laboratório).

A popularização das impressoras 3D FDM na última década tem relação direta exatamente com a capacidade de leigos poderem utilizar facilmente a tecnologia. Ao mesmo tempo, pessoas com maior afinidade conseguem adaptar e modificar de modo que a utilizar de jeitos diferentes.

O planejamento de movimento foi um fator notado, principalmente, no exercício do pavilhão e citado na pesquisa “Timber Assembly with Distributed Architectural Robotics” em ETHz. O posicionamento 3D de peças (bem como outros métodos de montagem) apresenta questões relacionadas a identificação de colisões, seja com

peças já colocadas ou elementos pré-existentes. Considerando as aplicações de posicionamento em 3D, é uma questão que precisa de maior aprofundamento.

Apesar de serem aspectos distintos, a interface do usuário, flexibilidade de programação e planejamento de movimento, podem ser agrupadas em problemas relacionados a software. Enquanto as demais barreiras são de outras naturezas.

Quanto à imprecisão dos robôs, obviamente existem robôs com maior ou menor grau de precisão e – como já citado – toda máquina ou processo apresenta a sua precisão, sendo que não existe precisão absoluta ou tolerância zero. Em alguns casos, como nesta pesquisa, nota-se que a questão de precisão pode ser trabalhada e incorporada na aplicação, sendo levada em conta desde o início do processo de projeto. Em outros casos – como notou-se nas visitas técnicas – a questão de falta de precisão está ligada, principalmente, a uma incompatibilidade entre o robô utilizado e a aplicação, ou ainda, ao uso de um robô muito genérico para uma aplicação muito específica. A principal solução para este problema pode estar relacionada ou a incorporação das características de montagem no processo de projeto (como feito nesta pesquisa) ou no uso de robôs específicos e com maior compatibilidade com a aplicação.

Como apontado, os centros de pesquisa visitados apresentam braços robóticos industriais – sendo que até o grupo Gramazio Kohler Research iniciou com um destes. O custo de aquisição de um braço robótico ainda é, relativamente, alto, considerando seu uso em somente uma pesquisa. A pesquisa desenvolvida apresentou limitações orçamentárias que impediram a aquisição de um braço robótico industrial e hardware mais robusto para um cablebot de maior capacidade. Este fator impediu o desenvolvimento de experimentos em escala real, mantendo-se em escala reduzida. É importante destacar que os experimentos em escala são fundamentais para um futuro desenvolvimento de experimentos em escala real. Deste modo, seria necessário montar centros ou grupos de pesquisa com foco em aplicações robóticas em arquitetura. Outra opção seria o desenvolvimento dos próprios robôs, como foi feito nesta pesquisa, contudo se mostra uma tarefa complexa. Ambos os casos indicam para a última barreira encontrada.

Por fim, notou-se que os centros de pesquisa de robôs em arquitetura apresentam profissionais de diversas áreas que trabalham em colaboração. Pelo que foi notado na pesquisa desenvolvida e nas pesquisas acompanhadas durante a visita técnica,

atualmente ainda é muito difícil para uma única pessoa desenvolver uma pesquisa do uso de robôs em arquitetura, considerando a falta de softwares flexíveis, interface de usuário, questões de planejamento de movimento e outros. Em todas as pesquisas acompanhadas, identificou-se, pelo menos, um profissional da área de arquitetura, um da área de robótica e um da área de programação. Deste modo, nota-se que ainda é necessária uma equipe multidisciplinar qualificada para o amplo desenvolvimento de uma pesquisa na área.

Em resumo, têm-se como resultado adicional à pesquisa a identificação das três principais barreiras ao desenvolvimento de pesquisas com robôs em arquitetura, sendo elas:

1. Falta de software e interface que correspondam às necessidades e flexibilidade deste tipo de pesquisa;
2. Alto custo de aquisição de robôs industriais ou comerciais;
3. Falta de equipes multidisciplinares e centros com foco em robótica aplicada em arquitetura;

É importante também citar que existem diferenças culturais, sociais e até históricas relacionadas ao momento em que estas pesquisas tiveram início na Europa (e até ao momento atual destes centros) se comparadas com a situação atual destas pesquisas no Brasil. O grupo Gramazio Kohler Research tornou-se uma semente deste tipo de pesquisa na Europa após 2006, com diversos grupos surgindo a partir dele (como o Digital Fabrication – Mobile Additive Manufacturing, em TUM). O mesmo ainda não correu no Brasil, pois ainda não há um centro específico para esta finalidade, embora haja iniciativas de aquisição de robôs por escolas de arquitetura brasileiras e grupos de pesquisas ativos no tema (RHODE, 2018; LOPES, 2020; MATIAS, 2021).

Existem ainda estigmas em relação ao uso de robôs e automação na arquitetura, seja na fase de projeto ou de construção. Muitas pessoas ainda acreditam que o uso destas tecnologias irá substituir toda a mão de obra utilizada, causando desemprego. A constante comparação entre a mão de obra humana e robôs instiga este estado de receio frente a tecnologia, ainda mais se comparado a outros setores, como o automobilístico, onde grande parte da montagem hoje realizada é feita através de robôs.

Apesar da substituição da mão de obra ser possível, os exemplos e aplicações levantados dizem respeito a aplicações com geometrias complexas que são muito difíceis, se não impossíveis, de serem realizadas manualmente, ou uma resposta à falta de mão de obra qualificada. A substituição parcial da mão de obra pode ocorrer quando a automação apresenta um custo competitivo, que pode surgir da redução do custo do robô e operação ou do encarecimento de mão de obra humana. Durante as visitas, diversos grupos apontaram a falta de mão de obra – ou seu alto valor – como fator para alguns programas governamentais financiarem estas pesquisas. Porém, os casos e estudos levantados – bem como as visitas técnicas realizadas – indicam uma automação de processos repetitivos ou que humanos teriam dificuldade em realizar. Diversos exemplos apontam o uso de robôs colaborando com mão de obra tradicional, servindo como auxílio para carregar peso, realizar tarefas repetitivas e outras. E como já apontado, os robôs ainda não apresentam a mesma destreza para realizar certas tarefas, principalmente em ambientes desconhecidos para eles.

No caso do Brasil, onde a mão de obra para a construção civil é abundante e de relativo baixo custo, o uso provável de robôs é em geometrias complexas e obras que seriam difíceis – se não impossíveis – serem realizadas por humanos. Deste modo, os robôs se colocariam no setor de exploração criativa, e não substituição de mão de obra.

Pode-se apontar novamente que este processo de automação de processos já ocorreu em outras fases em arquitetura. A automação de processos de projeto e design já é bem estabelecida (design digital), usando desde os métodos mais simples de CAD, até a modelagem NURBS, design generativo e outras ferramentas diversas. A fabricação de elementos únicos e customizáveis, com o uso de equipamentos de controle numérico e fabricação digital também já começa a se tornar cada vez mais comum. Surge agora a exploração desta automação na fase de montagem com o emprego de robôs (montagem digital), permitindo novas possibilidades de exploração criativa, tal como nas outras fases.

Quanto aos encaixes, as mudanças realizadas tiveram por objetivo viabilizar a montagem, corrigindo a precisão do processo. Os métodos utilizados para modificar os encaixes seguem os princípios do Projeto para Fabricação e Montagem (DFMA), cujo objetivo é facilitar a montagem (BOOTHROYD et al, 2011). Como resultado, os

encaixes modificados permitiram sucesso na montagem com ambos os robôs e correção da precisão dos processos, com possível aplicação em diversas geometrias. Os resultados obtidos nos experimentos demonstram que a adoção do Projeto para Fabricação e Montagem apresenta vantagens nos processos de montagem robotizada.

Nesta pesquisa, adotou-se como pressuposto que as modificações no projeto do encaixe seriam capazes de solucionar questões como a precisão do processo. Outras pesquisas adotam estratégias diversas para solucionar o problema da montagem com robôs, seja com ou sem o uso de encaixes. Como a citada a pesquisa “*Timber assembly with distributed architectural robotics*”, desenvolvida em ETHz (LEUNG et al, 2021), na qual a solução para a montagem robótica com encaixes se deu através de hardware e software. Cada abordagem apresenta soluções diferentes, que podem ser aplicadas a diferentes cenários, seja da aplicação, tipo de robô usado, materiais e outros.

É importante salientar que existe o mito da “precisão absoluta”, ou seja, tolerância zero. Este se baseia em não haver qualquer diferença entre o modelo virtual e físico, considerando equipamentos com precisão absoluta, seja na fabricação das peças ou na montagem com robôs. Apesar de haver um aumento significativo da precisão dos processos nesta pesquisa, não foi um objetivo da pesquisa buscar uma precisão absoluta, logo, tolerância zero dos equipamentos e processos. Todo equipamento e processo tem sua precisão. Materiais variam suas dimensões ou características de acordo com a temperatura, umidade e outras forças como o vento ou cargas (KOLAREVIC). Peças de madeira, por exemplo, se expandem e contraem de acordo com a umidade do ambiente. Peças de metal ou concreto fazem o mesmo, dependendo da sua temperatura. Na indústria trabalha-se com tolerâncias, deste modo, se aceitam variações dentro de um valor estipulado e estes são levados em conta (KOLAREVIC). Na arquitetura o mesmo ocorre, seja através de juntas de dilatação e materiais e estratégias que permitem e acomodam estas diferenças e movimentações naturais das coisas. Peças completamente fixadas entre si, de modo que não tenham espaço para movimentação, expansão e contração, podem fadigar e se partir ou deformar.

Obviamente devemos levar em conta qual a tolerância desejada e projetar dentro desta. Deste modo, a tolerância e a precisão podem ser encaradas frente à flexibilidade. A flexibilidade é planejada e leva em conta os fatores do material, objeto e processos (KOLAREVIC).

Apesar do recorte desta pesquisa, os métodos e aplicações desenvolvidos podem ser aplicados em outras geometrias, encaixes, aplicações e, potencialmente, outros robôs. As próprias lacunas e tendências identificadas podem levar a pesquisas futuras. Principalmente no que diz respeito à montagem robótica e robôs macios – duas áreas ainda pouco exploradas e diversas.

Em resumo, os resultados desta pesquisa apontam que ainda existem diversos tipos de robôs que podem ser explorados dentro da montagem em arquitetura, uma área ainda pouco automatizada. Essa exploração provavelmente será realizada com foco na exploração criativa e nas novas possibilidades que o uso de robôs fornecerá. Deve-se ainda apontar que soluções integradas e a compatibilização entre o projeto, fabricação e montagem demonstrou-se fundamental, permitindo realizar a montagem em escala utilizando robôs. A popularização dos robôs se dará com a flexibilidade dos códigos e melhores interfaces, permitindo seu controle de forma mais fácil. Além disso, deve haver um foco de desenvolvimento de robôs específicos, visando que estes possam realizar melhor suas funções.

A área de robôs em arquitetura é muita vasta e ainda foi relativamente pouco explorada. Não é possível prever o futuro, mas espera-se um desenvolvimento em conjunto da criatividade humana e com o uso de robôs, de modo integrado e colaborativo. A eliminação – ou redução – de tarefas repetitivas pode agilizar os processos criativos e viabilizar a criação de projetos complexas, permitindo novas soluções inovadoras nas mais diversas áreas e aplicações, começando com as ferramentas de CAD e parametrização, depois com a fabricação digital e agora rumo a uma montagem digital, em soluções integradas e visando uma criatividade aumentada pelo uso de robôs.

## Bibliografia

AALST, W.; BICHLER, M.; HEINZL, A. Robotic Process Automation. In: **Business and Information Systems Engineering**, V. 60, N. 4, p.269-272, Springer, 2018.

ABDELWAHAB, S.; ELGHAZI, Y. "A generative performance-based design for low-cost brickwork screens." **Proceedings of the Building Simulation and Optimization Conference (BSO16)**. 2016.

ABNT NBR ISO 5725-1/2018: **Exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018.

AEJMELAEUS-LINDSTROM, P., MIRIAN, A., GRAMAZIO, F., KOHLER, M., KERNIZAN, S., SPARRMAN, B., LAUCKS, J., TIBBITS, S. **Granular Jamming of Loadbearing and Reversible Structures: Rock Print and Rock Wall**. In: *Architectural Design*, vol. 87, no.4, p.82-87, 2017.

ASBECK, A.; ROSSI, S.; GALIANA, I.; DING, Y.; WALSH, C. Stronger, Smarter, Softer: Next-Generation Wearable Robots. In: **IEEE Robotics & Automation Magazine**. 2014, p. 22-33.

ASIMOV, I. I. **Asimov: a memoir**. Editora Bantam, Reissue, 1994

ASSIS, A. K. T. **The experimental and historical foundations of electricity**. Editora Apeiron, 2010.

BERG, M. **The Age of Manufactures: Industry, Innovation and Work in Britain 1700-1820**. Editora Basil Blackwell, Oxford, 1985

BIER, H. **Robotic Building**. Ed. Springer, Suíça, 2018.

BONWETSCH, T.; KOBEL, D.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. "The informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture." In **Synthetic Landscapes [Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture]**, 489–495. 2006.

BONWETSCH, T.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. "Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls." In **ManuBuild, conference proceedings, 191–196**. Rotterdam: D. M. Sharp, 2007.

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly**. CRC Press, Terceira edição, EUA, 2011.

BRELL-COCKAN, S.; BRAUMANN, J. Towards Robots in Architecture. **Proceedings of Rob| Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design**, p. 8-11, 2012.

BUDIG, M.; LAUER, W.; PETROVIC, R.; LIM, J. **Design of robotic fabricated high rises**. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Michigan, Springer, 2014.

BULFINCH, T. **O livro de ouro da mitologia: histórias de deuses e heróis**. Tradução de David Jardim. 1.ed. Rio de Janeiro: Agir, 2015

BUNNELL, K. **Craft and digital technology**. This paper was first presented as a key note speech at the World Crafts Council 40th Anniversary Conference in Metsovo, Greece, 2004.

BURRY, J.; BURRY, M. **The New Mathematics of Architecture**. Londres, Ed. Thames & Hudson, 2010.

BURRY, M. **Robots at the Sagrada Família Basilica: A Brief History of Robotised Stone-Cutting**. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Ed. Springer, 2016.

CAMPOS, F. **Estudo do uso de parametrização e simulações computacionais nas etapas iniciais do processo de projeto visando à otimização**. **Dissertação de mestrado**, UNICAMP, 2017.

CAMPOS, J. C. G. **Fabricação Robótica em Arquitectura - Princípios, processos e aplicações**, dissertação de Mestrado, orientador José Pedro Sousa, Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, 2016

CANEPARO, L. **Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction**. Ed. Springer Netherlands, 2014. DORFLER, H.; SANDY, T.; GIFTTHALER, M.; GRAMAZIA, F.; KOHLER, M.; BUCHLI, J. **Mobile Robotic**

**Brickwork.** In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Ed. Springer, 2016.

CAPEK, J. **Opilec.** In: *Lelio A Pro DelWna*. Aventinum, Prague, 1925.

CAPEK, K. **Rossum's Universal Robot.** Editora Penguin Group, Nova York, 1929.

CASTRIOTTO, C.; CARVALHO, G.; JUNIOR, V.; CELANI, G. O futuro do detalhamento arquitetônico: Concepção e representação na era digital, e impactos para a formação dos arquitetos. **Revista Geometria Gráfica**, v.1, n.1, p. 1-16, 2017.

CELANI, G. The seven myths in architectural detailing that are changing in the digital age. **Arquitectura Y Cultura**, Santiago de Chile, n. 5, 2014.

6CHUI, Q.; BARROS, C.; SILVA, T. Parâmetros r e R obtidos de programa interlaborial – como usá-los. In: **Química Nova**, vol. 32, no. 8, p. 2209-2213, 2009.

CORBUSIER, L. **Towards a new architecture.** Courier Corporation, 1931.

CORDEIRO, A. O uso de cobogós como segunda pele em edifícios de escritórios: análise do desempenho lumínico de diferentes geometrias. Dissertação de Mestrado. USP, 2018.

DOERSTEALMANN, M.; KNIPPERS, J.; MENGES, A.; PARASCHO, S.; PRADO, M.; SCHWINN, T. ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14: Modular coreless filament winding based on beetle elytra. In **Architectural Design: material synthesis: fusing the physical and the computational**, v. 85, n. 5, p. 54-59, 2015.

DORAN, D.; GOKHALE, S. Web robot detection techniques: overview and limitations. In: **Data Min Knowl Disc**, n.22, p183-210, 2011.

DORFLER, H.; SANDY, T.; GIFTTHALER, M.; GRAMAZIA, F.; KOHLER, M.; BUCHLI, J. **Mobile Robotic Brickwork.** In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Ed. Springer, 2016.

DUBOR, A.; IZARD, J.; CABAY, E.; SOLLAZO, A.; MARKOPOULOU, A.; RODRIGUEZ, M. On-site robotics for sustainable construction. In **Robotic fabrication in architecture, art and design**. Springer International Publishing, 2018.

DUGAS, R. **A History of Classical Mechanics**. Nova Iorque, NY: Dover Publications Inc, 1988, pg 19

FELBRICH, B.; FRUH, N.; PRADO, M.; SAFFARIAN, S.; SOLLY, J.; VASEY, L.; KNIPPERS, J.; MENGES, A. Multi-Machine Fabrication: An Integrative Design Process Utilising an Autonomous UAV and Industrial Robots for the Fabrication of Long-Span Composite Structures. In **ACADIA 2017: DISCIPLINES & DISRUPTION [Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)**, Cambridge, MA 2-4 November, 2017), pp. 248-259

FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D. **Teoria e Projeto Para Medições Mecânicas**. Editora LTC, 4ª edição, 2007.

FRAMPTON, K. AND CORREA, C. (1997) Charles Correa. London, Thames and Hudson.

GARCIA, E.; JIMENEZ, M.; SANTOS, P.; ARMADA, M. The evolution of robotics research: from industrial robotics to field and service robotics. In: **IEEE Robotics & Automation Magazine**, Março 2007 p. 90-103.

GARFINKEL, S.; GRUNSPAN, R. **The Computer Book: from the abacus to artificial intelligence, 250 milestones in the history of computer science**. Nova York, Editora Sterling, 2018.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Flight Assembled Architecture – Gramazio&Kohler and D’Andrea**. Editions HYX, França, 2013.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; WILLMANN, J. Authoring robotic processes. In **Architectural Design**, v.84, n.3, 2014

GROAT, L.; WANG, D. **Architectural Research Methods**. Segunda Edição, Wiley, Nova Jersey, 2013.

GRASER, K.; BAUR, M.; APOLINARSKA, A.; DOFLER, A.; HACK, N.; JIPA, A.; LLORET-FRTSCHI, E.; SANDY, T.; PONT, D.; HALL, D.; KOHLER, M. "DFAB House: a comprehensive demonstrator of digital fabrication in architecture." In **Fabricate 2020: Making Resilient Architecture**, 130—139. London: UCL Press, 2020.

GUIZZO, E. **What is a robot**. 2018. Available: <https://robots.ieee.org/learn/what-is-a-robot/> (URL).

GUTIERREZ, G. **Avaliação do desempenho térmico de três tipologias de brise-soleil fixo**. Dissertação de mestrado. UNICAMP, 2004.

HACK, N.; LAUER, W.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Mesh mould: differentiations for enhanced performance**. In Proceedings of the 19th International Conference of the Association of Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRA. Kyoto, 2014.

HASAN, Z. **Inside Vancouver's Brock Commons, The World's Tallest Mass Timber Building**. 2017. Disponível em <[www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)>, ultimo acesso em 20/02/2018.

HAUBERG, J. Research by Design: a research strategy. **AE... Revista Lusófona de Arquitectura e Educação**. N 5, p. 45-56, 2011.

HELM, V.; ERCAN, S.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Mobile Robotic Fabrication on Construction Sites: dimRob**. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, 2014.

HOCKSTEIN, N. G.; GOURIN, C. G.; FAUST, R. A.; TERRIS, D. J. A history of robots: from science fiction to surgical robotics. In: **Journal of Robotic Surgery**, v. 1, p. 113-118, 2007.

ISO 8373:2012 **"Robots and robotic devices – Vocabulary"**, 2012 Available: <https://www.iso.org/standard/55890.html> (URL).

ISO 8373:2021 **"Robots and robotic devices – Vocabulary"**, 2021 Available: <https://www.iso.org/standard/75539.html> (URL).

International Federation of Robotics (IFR), 2021. Available: <https://ifr.org/> (URL).

JAN, W.; KNAUSS, M.; BONWETSCH, T.; APOLINARSKA, A.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Robotic timber construction – Expanding additive fabrication to new dimensions**. In Automation in Construction, 2015.

JONES, R., HAUFE, P., SELLS, E., IRAVANI, P., OLLIVER, V., PALMER, C., BOWYER, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1), 177-191. doi:10.1017/S026357471000069X

KANASAKI, K.; TANAKA, H. **Traditional Wood Joint System in Digital Fabrication**. Digital Fabrication, vol. 1, Computation and Performance – eCAADe 31, p. 711-716. 2013.

KATZ, N. C. (2008) Analemma Skylight. White paper. Available at: [https://www.som.com/ideas/research/analemma\\_skylight](https://www.som.com/ideas/research/analemma_skylight). Access in: Nov 28, 2019.

KATZ, N. C. (2010) Algorithmic Modeling; Parametric Thinking: Computational Solutions to Design Problems. CAAD - Cities - Sustainability [5th International Conference Proceedings of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design (ASCAAD 2010 / ISBN 978-1-907349-02-7], Fez (Morocco), 19-21 October 2010, pp. 19-36. Available at: [http://papers.cumincad.org/data/works/att/ascaad2010\\_019.content.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/ascaad2010_019.content.pdf). Access in: Nov 28, 2019.

KAYSER, M.; CAI, L.; BADER, C.; FALCONE, S.; INGLESSIS, N.; DARWEESH, B.; COSTA, J.; OXMAN, N. FIBERBOTS: Design and digital fabrication of tubular structures using robot swarms. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Ed. Springer, 2018.

KNIPPERS, J., MAGNA, R., MENGES, A., REICHERT, S., et al. ICD/ITKE Research Pavilion 2012: Coreless Filament Winding Based on the Morphological Principles of an Arthropod Exoskeleton. In: **Architectural Design: material synthesis: fusing the physical and the computational**, vol. 85, no. 5, p. 48-53, 2015.

KOETSIER, T. On the prehistory of programmable machines: musical automata, looms, calculators. Elsevier. **Mechanism and Machine Theory**. 36 (5): 589–603, 2001.

KOLAREVIC, B.; **Architecture in the digital age: Design and manufacturing**. 1<sup>a</sup> Edição. Londres, Spon Press, 2005.

KRUYSMAN, B.; PROTO, J. Impossible objects. In **Architectural Design**, v.84, n.1 p.106-111, 2014.

LEHMANN, S. Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. In **Sustainable Cities and Society**, v. 6, p. 57-67, 2013.

LEUNG, V., APOLINARSKA, A., TANADINI, D., GRAMAZIO, F., KOHLER, M. Automatic Assembly of Jointed Timber Structure using Distributed Robotic Clamps. In **PROJECTIONS - Proceedings of the 26th CAADRIA Conference** - Volume 1, The Chinese University of Hong Kong and Online, Hong Kong, 2021, p. 583-592.

LOPES, E. I. **O concreto digital e as novas materialidades da arquitetura contemporânea**, Tese de Doutorado. Faculdade Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 8 jun. 2020.

MANTI, M.; CACUCCILO, V.; CIANCHETTI, M. Stiffening in Soft Robotics: a Review of the State of the Art. In: **IEEE Robotics & Automation Magazine**, 2016, p. 93-106

MARIO, H.; TOBIAS, P.; BORIS O. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. In Proceedings 49<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2016.

MATIAS, M. J. S. **Fabricação digital: concepção e desenvolvimento de um equipamento CNC para produzir elementos construtivos**, dissertação de Mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie: Tese Mestrado, 2021.

MAYER, H.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. Disarmed Strategies. In **Architectural Design**, v.87, n.4, p.110-119, 2017.

MIRJAN, A.; AUGUGLIARO, F.; ANDREA, R.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Building a Bridge with Flying Robots**. In Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Ed. Springer, 2016.

MUXFELDT, A.; KLUTH, J.; KUBUS, D. Kinesthetic Teaching in Assembly Operations - A User Study. In: **Modeling, and Programming for Autonomous Robots: 4th International Conference, SIMPAR 2014**, Bergamo, Italy, October 20-23, 2014. Proceedings. P

NEEDHAM, J. **Science and Civilization in China**. 1991

NOLTE, T., WITT, A. Ghery Partner's Fondation Louis Vuitton: Crowdsourcing Embedded Intelligence. In: **Architectural Design: High Definition: Zero Tolerance in Design and Production**, vol.84, no. 1, 2014.

NORMAN, K. **A history of Indian Literature**. Editora Wiesbaden Harrassowitz, v. 7, n. 2, 1983

OED Online, Oxford University Press. Available: <http://www.oed.com/> (URL).

OXMAN, N.; DURO-ROYO, J.; KEATING, S.; PETERS, B. TSAI, E. Towards Robotic Swarm Printing. In **Architectural Design – Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale**, v. 84, n. 3, p. 108-115, 2014

PAJCHROWSKI, G.; NOSKOWIAK, A.; LEWANDOWSKA, A.; STRYKOWSKI, W. Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. In **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 428-436, 2014.

PICON, A. Robots and architecture: experiments, fiction, epistemology. In **Architecture Design**, v.84, n.3, p.54-59, 2014.

QUIGLEY, M.; ASBECK, A.; NG, A. A low-cost compliant 7-DOF robotic manipulator. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, 2011, pp. 6051-6058, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980332.

REINHARDT, D.; SAUNDERS, R.; BURRY, J. **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016**. Ed. Springer, 2016.

ROBELLER, C.; WEINAND, Y. Fabrication-Aware Design of Timber Folded Plate Shells with Double Through Tenon Joints. In **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016**. Ed. Springer, 2016.

ROHDE, C. **Design Computacional e Fabricação Robótica**, Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - PROARQ, 2018

ROMDHANE, L.; ZEGHLOUL S. (2009) AL-JAZARI (1136–1206). In: **Ceccarelli M. (eds) Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science. History of Mechanism and Machine Science**, vol 7. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2346-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2346-9_1)

RUS, D.; TOLLEY, M. Design, fabrication and control of soft robots. In: **Nature**. N. 521, 2015, p. 467-475.

SASS, L. **A digitally fabricated house for New Orleans**. Massachusetts Institute of Technology Journal, 2008.

SCHOLZ, M. P. **Advanced NXT: The Da Vinci Inventions Book**. Springer-Verlag, New York, 2007

SIMÕES, M.; ALVARENGA, J.; LEFÉVRE, S. **Dicionário de Mitologia Greco-Romana**. Editora Abril Cultural, São Paulo, 2ª edição, 1976

SIMON, M. **Wired**. 2017. Available: <https://www.wired.com/story/what-is-a-robot/> (URL).

SPRINGER, P. **Military robots and drones: a reference handbook**. Santa Bárbara, Califórnia, ABC-CLIO, 2013.

SWEDIN, E.; FERRO, D. **Computers: The life story of a technology**. JHU Press, 2007.

SWEET, K. Resurrecting the master builder: a pedagogical strategy for robotic construction. In **Automation in Construction**, v. 72, p. 33-38, 2016.

SOLLY, J.; FRUEH, N.; SAFFARIAN, S.; PRADO, M.; VASEY, L.; FELBRICH, B.; REIST, D.; KNIPPERS, J.; MENGES, A. ICD/ITKE Research Pavilion 2016/2017: Integrative design of a composite lattice cantilever. In Proceeding of the IASS Symposium 2018, Boston – MA, p. 1 – 8, 2018.

SOM. **Timber Tower Research Project**, 2017. Disponível em <[http://www.som.com/ideas/research/timber\\_tower\\_research\\_project](http://www.som.com/ideas/research/timber_tower_research_project)> ultimo acesso em 20/02/2018

SONDERGAARD, A.; AMIR, O.; EVERSMAAN, P.; PISKOREC, L.; STAN, F.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Topology optimization and robotic fabrication of advanced timber space-frame structures**. In Robotic fabrication in architecture, art and design. Springer International Publishing, 2016.

SOUSA, P. Robotic Technologies for non-standard design and construction in architecture. In **Nexus Network Journal: Architecture and Mathematics**, v. 19, p. 73-83, Kim Williams Books, Turin, 2016.

SOUSA, J.; PALOP, C.; MOREIRA, E., PINTO, A.; LIMA, J.; COSTA, P; MOREIRA, A. The SPIDERobot: A cable-robot system for on-site construction in architecture. In **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016** (pp. 230-239). Springer, Cham, 2016.

SPRINGER, P. **Military robots and drones: a reference handbook**. Publisher ABC-CLIO, 2013.

SULLIVAN, C. **Building wood towers: How high is up for timber structures?**. In Building Design + Construction, Abril, 2015. Disponível em <www.bdcnetwork.com>, ultimo acesso em 20/02/2018.

SUMIYOSHI, T.; MATSUI, G. **Wood joints in classical Japanese architecture**. Japão, Kajima Institute Publishing Co, 1991.

SWEDIN, E., FERRO, E. **Computers: The life story of a technology**. JHU Press, 2007.

TIBBITS, S. From automated to autonomous assembly. In **Architectural Design: Designing for a New Era of Collective Construction**, v. 87, n. 4, p. 6-15, 2017.

TRIVEDI, D.; RAHN, C.; KIER, W.; WALKER, I. Soft robotics: Biological inspiration, state of art, and future research. In: **Applied Bionics and Biomechanics**. Vol. 5, No. 3, Setembro 2008, p. 99-117

VACCARI, A. Legitimizing The Machine: The Epistemological Foundation Of Technological Metaphor In **The Natural Philosophy Of René Descartes**. Editora Brill, 2008.

WALLÉN, J. **The history of the industrial robot**. Linköping University Electronic Press, 2008.

WILLMANN, J.; KNAUSS, M.; BONWETSCH, T.; APOLINARSKA, A. A.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. Robotic timber construction – Expanding additive fabrication to new dimensions. In **Automation in Construction**, n. 61, p. 16-23, 2016.

WINTER, T. N. **The Mechanical Problems in the Corpus of Aristotle**. 2007 < <https://digitalcommons.unl.edu/classicsfacpub/68/> >

WOOD, D.; YABLONINA, M.; AFLALO, M.; CHEN, J.; TAHANZADEH, B.; MENGES, A. Cyber physical macro material as a UAV [re]configurable architectural system. In

**Robotic fabrication in architecture, art and design.** Springer International Publishing, 2018.

YABLONINA, M.; MENGES, A. Towards the development of fabrication machine species for filament materials. **In Robotic fabrication in architecture, art and design.** Springer International Publishing, 2018.

## Sites

- [1] <<https://insights.globalspec.com/article/4788/what-is-the-real-cost-of-an-industrial-robot-arm>> Acesso em Julho 2020.
- [2] <<https://www.robotics.kawasaki.com>> Acesso em Setembro de 2020
- [3] <<https://www.robotics.org/blog-article.cfm/The-History-of-Robotics-in-the-Automotive-Industry/24>> Acesso em Setembro de 2020
- [4] <<https://www.kuka.com/en-de/about-kuka/history#:~:text=The%20history%20of%20KUKA%20begins,suppliers%20of%20intelligent%20automation%20solutions>> Acesso em Outubro de 2020
- [5] <<https://www.robotics.org/blog-article.cfm/The-History-of-Robotics-in-the-Automotive-Industry/24>> Acesso em Outubro de 2020
- [6] <<http://www.wabot-house.waseda.ac.jp/html/e-wabot.htm>> Acesso em Agosto de 2020
- [7] <<https://www.universal-robots.com/br/sobre-a-universal-robots/nossa-hist%C3%B3ria/>> Acesso em Setembro de 2020
- [8] <<https://robots.ieee.org/learn/what-is-a-robot/>> Acesso em Agosto de 2020
- [9] <<https://www.wired.com/story/what-is-a-robot/>> Acesso em Agosto de 2020
- [10] <<https://www.irf.org>> Acesso em Outubro de 2020
- [11] <<https://www.icd.uni-stuttgart.de/>> Acesso em Outubro de 2020
- [12] <<https://www.bcn3d.com>> Acesso em Agosto de 2020
- [13] <<https://www.mojoptix.com/>> Acesso em Setembro de 2020
- [14] <<https://www.archdaily.com.br/br/786301/prescription-propoe-relogio-de-sol-construido-a-partir-de-impressao-3d>> Acesso em Setembro de 2020
- [15] <<https://www.maslowcnc.com/>> Acesso em Outubro de 2020
- [16] <<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/aboutInfrastructure/index.html>> Acesso em Outubro de 2020

(APIS COR, 2017) <<https://apis-cor.com/>> Acesso em Novembro 2022

(WASP, 2021) <<https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>> Acesso em Novembro 2022

(CYBE, 2023) <<https://cybe.eu/>> Acesso em Junho 2023

(ALL3DP, 2023) <<https://all3dp.com/2/best-companies-building-3d-printed-houses/#i-20-mighty-buildings>> Acesso em Junho 2023

(COBOD, 2022) <<https://cobod.com/the-worlds-tallest-3d-printed-building-is-now-in-saudia-arabia/>> Acesso em Junho 2023

## Apêndice I – Visitas Técnicas

Durante a pesquisa, foram realizadas visitas técnicas a centros de pesquisa internacionais que desenvolvem pesquisa na área de robôs aplicados à arquitetura. Foram visitados os laboratórios: (1) Digital Fabrication – Mobile Additive Manufacturing e (2) Building Realization and Robotics (ambos pertencentes à Universidade Técnica de Munique – TUM), (3) Instituto de Design Computacional e Construção (ICD) da Universidade de Stuttgart e (4) Gramazio Kohler Research do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHz).

As visitas aos laboratórios permitiram conhecer o funcionamento dos grupos de pesquisa, as pesquisas em desenvolvimento, os equipamentos disponíveis e outras questões intrínsecas às pesquisas sobre o uso de robôs em arquitetura. Foram notadas também questões referentes à implementação comercial e industrial de robôs em arquitetura para casas ou edifícios de grande porte, que serão tratadas neste capítulo.

Durante as visitas, foi possível acompanhar a montagem de uma estrutura para a pesquisa “Timber Assembly with Distributed Architectural Robotics” (Figura 149), em desenvolvimento no grupo Gramazio Kohler Research em ETHz. Como já citado, a pesquisa é uma das poucas que também explora o uso de encaixes em elementos de madeira com montagem robótica.



**Figura 149 – Montagem de estrutura em madeira no NCCR Digital Fabrication - ETHz**

**Fonte: do autor**

A pesquisa se foca na montagem de estruturas em madeira utilizando elementos lineares pré-fabricados com encaixes, manipulação por um ou dois braços robóticos com garra dupla, prensas pneumáticas e parafusadeiras automáticas. As estruturas foram montadas em escala real, utilizando equipamentos auxiliares (como grampos e apoios) e intervenção manual, quando necessário.

Apesar do conhecimento prévio da equipe, do uso de robôs industriais e do acesso ao NCCR Digital Fabrication (Centro Nacional de Competência em Pesquisa em Fabricação Digital), notou-se que diversos problemas encontrados pela equipe foram semelhantes aos da presente pesquisa. Entre estes, pode-se citar a falta de precisão dos robôs utilizados, os problemas com o encontro dos encaixes (direcionamento) e o planejamento de montagem.

Nesta pesquisa de doutorado, estes problemas foram abordados através de métodos de projeto, como citado no capítulo 5. No caso da pesquisa em ETHz, eles foram solucionados de modo mecânico, com prensas pneumáticas (Figura 150), “chacoalhando” o robô para realizar o encaixe ou, em último caso, com interferência humana. O uso de prensas requer uma série de processos de sincronização e controle, pois cada prensa funciona de modo independente. Além disso, os encaixes e pontos de fixação das prensas são determinados por visão robótica com o uso de

fiduciais. Não ficou claro se o posicionamento dos fiduciais foi realizado de modo automático ou manual.



**Figura 150 – Prensa pneumática utilizada na montagem - ETHz**

**Fonte: do autor**

Apesar das similaridades, ambas as pesquisas apresentam abordagens distintas para a solução dos problemas relacionados a esta aplicação. A pesquisa do autor se focou em soluções relacionadas à geometria e questões projetuais, enquanto a pesquisa em ETHz se focou em soluções relacionadas a hardware e software.

Obviamente, uma grande diferença entre as pesquisas está nos robôs utilizados: esta pesquisa utilizou robôs educacionais ou desenvolvido pelo autor, realizando experimentos em escala, enquanto a pesquisa em ETHz utiliza robôs industriais trabalhando de modo colaborativo, em escala real. Deste modo, a quantidade de robôs, seus tipos e equipe envolvida levaram a soluções muito diferentes nas duas pesquisas, apesar de compartilharem diversas características em comum, principalmente o princípio de montagem robótica de estruturas em madeira com o uso de encaixes.

Existem outras diferentes entre as pesquisas, como a presença de equipe de apoio na pesquisa em ETHz e o grupo Gramazio Kohler Research apresentar um histórico desde sua fundação do uso de robôs em arquitetura. A pesquisa desenvolvida pelo autor foi a primeira do grupo relacionada à montagem robótica, sendo uma das poucas no Brasil.

Além da pesquisa citada, também foi possível acompanhar processos da pesquisa relacionada à impressão 3D por impacto em ETHz (Figura 151). A estratégia busca resolver problemas de adesão entre as camadas em processos de impressão 3D com argila, se assimilando a processos tradicionais de taipa. Apesar de, no momento da visita, o atuador ter sido testado de modo independente, planejava-se colocá-lo em um braço robótico ou robô similar, para realizar a impressão em larga escala.



**Figura 151 – Impressão 3D por impacto no NCCR Digital Fabrication - ETHz**

**Fonte: do autor**

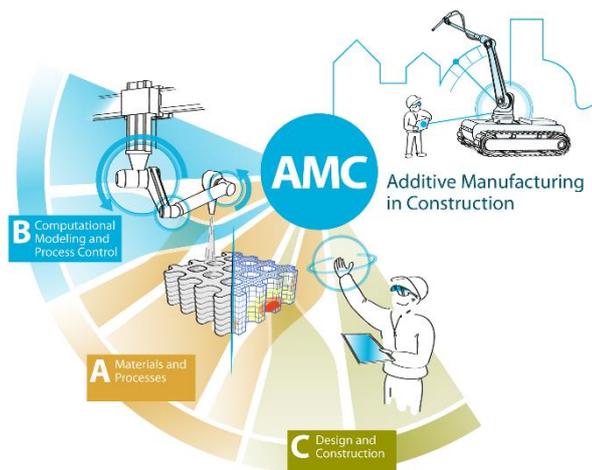
Na visita ao grupo Digital Fabrication – Mobile Additive Manufacturing foi possível acompanhar alguns processos do robô de impressão móvel aditiva (em TUM – Figura 152). Este projeto busca métodos e estratégias de realizar a impressão 3D em argila, seja para estruturas finais ou para o molde de estruturas in loco. No caso dos moldes, a argila depois é retirada e reutilizada em outros processos, como uma forma reutilizável.



**Figura 152 – Robô usado na impressão aditiva e teste de impressão – TUM**

**Fonte: do autor**

A pesquisa desenvolvida pelo laboratório se insere do programa AMC TRR 277. Este é um programa do governo alemão, mais especificamente da região da Baviera. O programa busca viabilizar e explorar o uso de fabricação e montagem robótica na construção civil, apresentando três setores: (A) materiais e processos, (B) modelagem computacional e controle de processos e (C) design e construção (Figura 153).



**Figura 153 – Diagrama do programa AMC TRR 277**

Fonte: <https://amc-trr277.de/>

O programa une centros de pesquisa e a indústria, visando o uso em larga escala de robôs na construção civil. Em alguns casos, as soluções apresentadas colocam o robô como auxiliar do trabalhador (robôs e processos colaborativos), buscando resolver problemas de falta de mão de obra na construção civil, em outros casos, visa a exploração formal, fora das habilidades tradicionais exigidas.

Em todas as visitas, os pesquisadores apontaram que não é uma questão de se vai ocorrer o uso de robôs na arquitetura, mas sim quando e como. Os robôs, principalmente relacionados a impressão 3D em concreto, já são utilizados comercialmente por algumas empresas, como citado no capítulo 4, com tendência a crescimento. Nos países com maior qualidade de vida e renda per capita, há uma redução e falta de mão de obra qualificada para realizar os processos de construção. Nestes casos, os robôs podem vir a responder a esta falta de mão de obra, substituindo-a.

Comparando com a realidade socioeconômica e cultural do Brasil, nota-se que presença de mão de obra abundante e de baixo custo. Este, provavelmente, é um dos fatores que não levaram ainda a uma exploração pelas empresas do uso de robôs na construção civil. Sem a necessidade de suprir a falta de mão de obra ou substituir uma mão de obra cujo valor excede os investimentos com robôs e processos

automatizados, o único motivo de explorar o uso de robôs em arquitetura é pela exploração formal permitida por estes.

Durante as visitas aos laboratórios foram também apontadas outras questões referentes as limitações dos robôs e interface para usuários. A primeira questão trata sobre a precisão e outras capacidades robóticas. Segundo alguns pesquisadores, apesar da precisão atualmente obtida por braços robóticos e outros robôs, estes ainda são muito imprecisos e limitados em relação a certas capacidades humanas. Estas colocações – bem como resultados obtidos nesta pesquisa – apontam que os robôs apresentam características específicas que são mais aptas a realizar determinadas tarefas, enquanto os humanos apresentam outras características, que os tornam mais aptos a outras tarefas.

Para a montagem em arquitetura, o robô mais utilizado é ainda o braço robótico. Este apresenta grande precisão em repetibilidade dos processos e movimentos, em função do seu uso industrial. Contudo, o braço robótico não apresenta a mesma precisão ao realizar novos processos, como é o caso da montagem robótica em arquitetura, colocando-se como um paradoxo o seu uso nesta aplicação.

Sobre a questão de interface, os softwares e interfaces existentes possuem um foco industrial. Em muitos casos, há uma repetibilidade do movimento do robô. A biblioteca COMPAS, citada anteriormente, auxilia neste caso, mas não soluciona os problemas de interface. Atualmente, a maior parte das pesquisas apresentam especialistas em programação, que utilizam scripts para organizar os processos de troca de dados entre o modelo digital e o robô. Em todos os grupos de pesquisa, pode-se notar a presença de equipes multidisciplinares e laboratórios com ênfase em robótica aplicada à arquitetura.

No caso da pesquisa desenvolvida pelo autor, ocorreram problemas relacionados à programação, como foi citado anteriormente. Estes ocorreram tanto por limitações relacionadas ao uso tradicional dos robôs e falta de interface adequada, quanto pela falta de compreensão por parte de grupos de computação das necessidades da pesquisa e flexibilidade (em termos da programação) necessária para o uso dos robôs.

Como se pode notar, apesar das diferenças nas pesquisas, todas as pesquisas que utilizam robôs apresentam algumas características em comum – ou necessidades. Algumas limitações ou dificuldades parecem também ser comuns a todas estas pesquisas, apesar de elas serem resolvidas de diversos modos nos diferentes centros de pesquisa.

## Apêndice II – Sombreamento e Iluminação de Precisão

Na arquitetura, existem diversos métodos de sombreamento, estratégias e objetivos. Tradicionalmente, o sombreamento está ligado ao controle luminoso e térmico, buscando filtrar o excesso de iluminação natural – consequentemente, reduzindo o ganho térmico do ambiente e ofuscamento. Além deste uso, o sombreamento pode extrapolar o controle luminoso, voltando-se para os efeitos de iluminação e projeção, estando ligados à expressão arquitetônica. Diferentes culturas e em períodos históricos distintos desenvolveram diversos métodos de sombreamento, seja para este controle ou efeitos luminosos. Na arquitetura brasileira, dois elementos importantes são o cobogó (CORDEIRO, 2018) e o brise-soleil (GUTIERREZ, 2004).

Ambos os elementos foram de grande importância na arquitetura modernista brasileira, sendo ainda amplamente utilizados na arquitetura contemporânea. Os cobogós se baseiam em elementos vazados, com espessura significativa, normalmente de cerâmica ou de concreto (Figura 154), sendo que outros materiais também são utilizados atualmente (CORDEIRO, 2018). Já os brise-soleils se baseiam em elementos verticais ou horizontais de proteção (Figura 155), normalmente em concreto (GUTIERREZ, 2004).



Figura 154 – Iluminação gerada por cobogó

Fonte: [www.archdaily.com.br](http://www.archdaily.com.br)



Figura 155 – Exemplo de uso de brise-soleil

Fonte: [www.archdaily.com.br](http://www.archdaily.com.br)

Diversas releituras contemporâneas destes elementos foram já realizadas, com pesquisas buscando otimizar seus resultados por modificações paramétricas, otimização por algoritmos genéticos e simulações computacionais (CAMPOS, 2017; CORDEIRO, 2018). Outra estratégia muito utilizada são as fachadas duplas, as quais podem proteger elementos translúcidos ou opacos, bem como paredes ou aberturas, buscando reduzir ou controlar a iluminação natural e radiação solar incidente. Pesquisas anteriores do autor demonstraram que estas estratégias apresentarem resultados significativos (CAMPOS, 2017), contudo, apresentam limitações, principalmente no que diz respeito à precisão em períodos específicos e expressão arquitetônica.

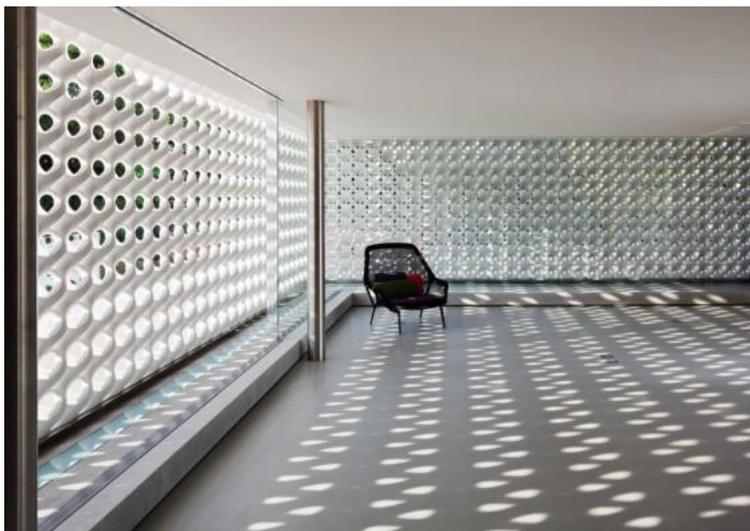
Diversos arquitetos utilizaram a luz como expressão arquitetônica. O arquiteto Charles Correa ficou famoso por criar padrões geométricos e efeitos com luz em suas obras pelo uso de pérgolas e jogo de aberturas (FRAMPTON, CORREA, 1997). Um de seus projetos icônicos é o Champalimaud Center for the Unknown (Figura 156), no qual a luz, aberturas, visuais e sombras são pensadas em conjunto com os ambientes.



**Figura 156 – Efeitos de luz do Champalimaud Center for the Unknown**

**Fonte: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)**

Mesmo os cobogós (Figuras 157 e 158) apresentam a qualidade de projetar padrões, com jogos de luz e sombra, modificando as superfícies originais da obra e dotando-as de uma nova textura, que se move e tem leves modificações de acordo com o passar do dia. Estas modificações, porém, são pequenas, dizendo respeito somente à projeção da abertura no plano, seguindo o vetor solar, não sendo projetadas para criar sombras ou efeitos de iluminação específicos para diferentes períodos do ano.



**Figura 157 – Efeito gerado por cobogó**

Fonte: [www.studiomk27.com.br](http://www.studiomk27.com.br)



**Figura 158 – Uso de cobogó**

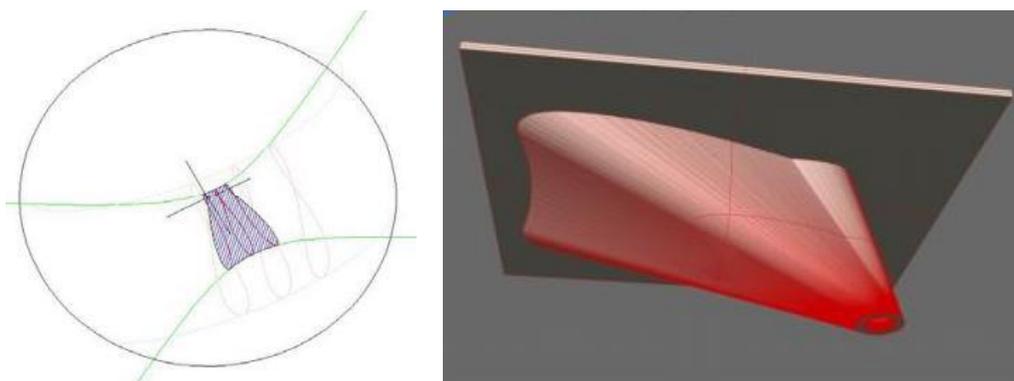
Fonte: [www.houzz.es](http://www.houzz.es)

Já o projeto do escritório SOM do Skylight para o Centro Koch para Ciência, Matemática e Tecnologia da Academia de Deerfield busca também a projeção de efeitos de iluminação, porém, para determinados períodos específicos. O objetivo do projeto é projetar na parede norte um foco de luz, criando um analema, entre as 11h e 13h. Para isso, há uma perfuração circular no teto do saguão de entrada (Figura 159), cuja abertura foi gerada a partir da posição e vetor solar do período selecionado, criando um volume (Figura 160) que foi retirado da cobertura, permitindo a passagem de luz somente no período determinado (KATZ, 2008).



**Figura 159 – Skylight do Centro Koch**

Fonte: [www.wikimapia.org](http://www.wikimapia.org)



**Figura 160 – Período selecionado e geometria resultante**

Fonte: (KATZ, 2008)

Esta precisão, de somente algumas horas, é algo que não era obtido nos brise-soleil ou cobogós tradicionais, tendo a capacidade de expandir o uso do sombreamento e iluminação natural. No projeto, foi utilizado como um fenômeno científico de demonstrar o movimento da Terra em relação ao Sol e a mudança no vetor solar, porém é possível a projeção de diferentes formas, geometrias e padrões que podem se modificar de acordo com o período do ano.

Nesta pesquisa, propõe-se o termo “sombreamento de precisão” para esta técnica, em referência a outros métodos contemporâneos que requerem alta precisão e alta tecnologia para serem obtidos, como “agricultura de precisão” e “medicina de precisão”. Pela sua complexidade de fabricação e especificidade, estas formas só poderiam ser fabricadas com o uso de máquinas de alta precisão como braços robóticos ou fresadora CNC de 5 eixos.

Tendo como princípio a estratégia de modelagem do projeto do SOM, buscaram-se outros projetos que apresentassem a mesma precisão em relação ao sombreamento e iluminação. Outro exemplo encontrado, que ficou famoso no meio Maker, foi o relógio de sol impresso em 3D lançado pelo blog Mojoptix em 2015 (Figura 161) [13]. O relógio de sol tradicional é um dos métodos mais antigos de se saber a hora do dia, tendo suas origens, possivelmente, na Grécia. Ele consiste em um mostrador plano que contém as horas do dia e uma haste inclinada, conhecida como gnomon, conseguindo ler as horas pela sombra do gnomon projetada no mostrador. O gnomon apresenta a mesma inclinação da latitude do local. O relógio de Mojoptix se baseia no mesmo conceito, onde a principal parte a ser impressa é o gnomon. Contudo, ele apresenta aberturas no gnomon (Figura 162), as quais filtram a luz do sol, selecionando em qual hora do dia elas irão passar. Este controle permite projetar no plano, em forma de “pixels” a hora do dia, na forma de numeral (Figura 161). A hora é projetada com intervalo de 20 minutos. O projeto foi concebido para funcionar em qualquer latitude, sendo necessário que o gnomon tenha a mesma inclinação da latitude, tal como no relógio de sol tradicional. Os arquivos apresentam o modelo para o hemisfério norte e sul, onde a única diferença entre eles é que são modelos espelhados.



**Figura 161 – Relógio de sol Mojoptix**

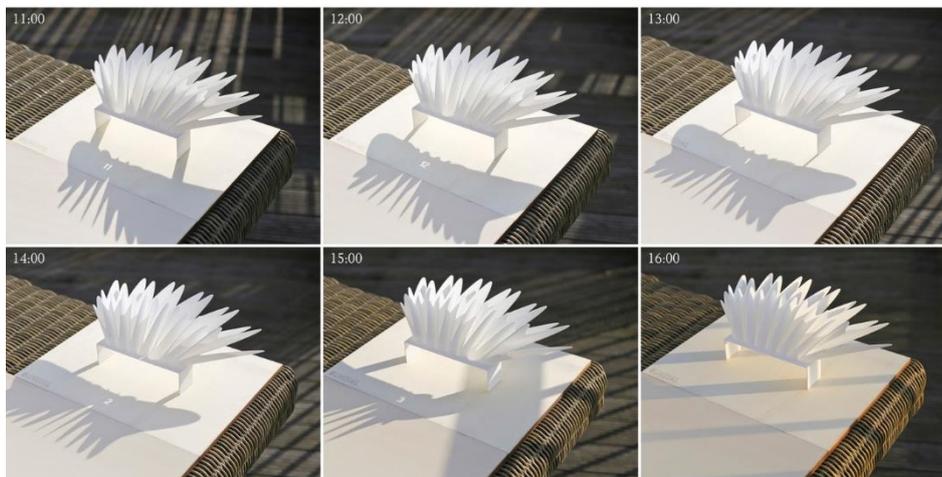
**Fonte: [www.mojoptix.com](http://www.mojoptix.com)**



**Figura 162 – Modelo 3D e corte transversal**

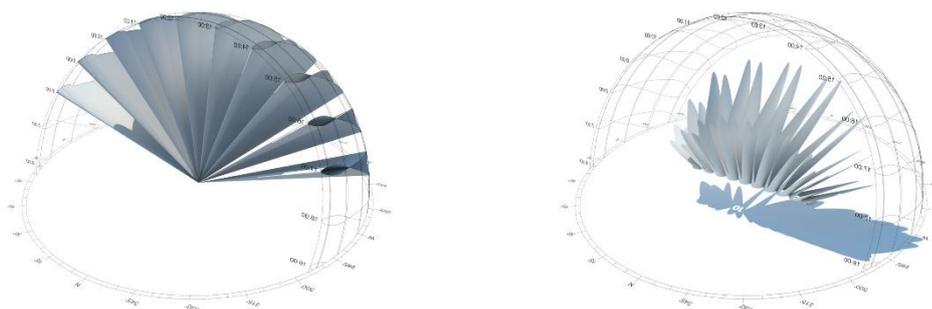
**Fonte: do autor**

De modo similar, em 2016, o escritório de arquitetura Prescription, em parceria com a Arup, propôs um relógio de sol baseado na projeção do numeral referente àquela hora (Figura 163) [14]. Ele se baseia no controle solar por criar um tubo com a forma do analema do sol em cada hora do dia, buscando também criar uma forma similar a uma flor através de recortes nesses tubos (Figura 164). Este projeto, porém, não é universal, devendo ser gerada uma geometria nova para cada latitude.



**Figura 163 – Relógio de sol e suas projeções**

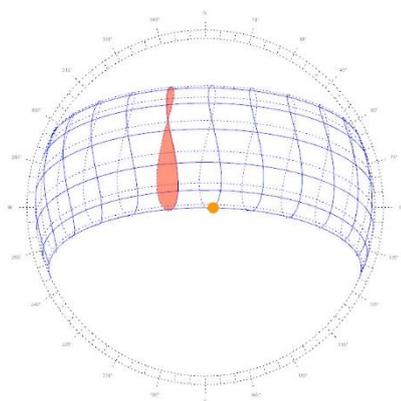
Fonte: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)



**Figura 164 – Seleção dos períodos e modelagem do relógio de sol**

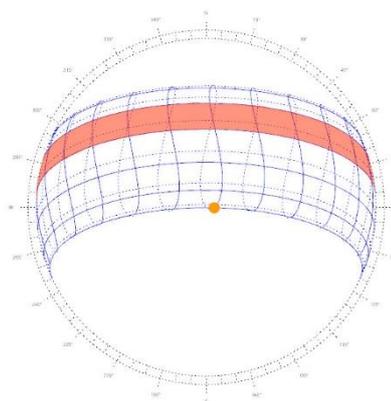
Fonte: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)

Ambos os relógios de sol apresentados trabalham com a projeção por hora, para todos os períodos do ano. Já o projeto do escritório SOM trabalha com somente algumas horas, mas novamente, para todos os meses do ano. Contudo, seguindo o mesmo princípio, é possível se trabalhar com períodos específicos, e não só horas, selecionando os vetores solares a serem utilizados, ao invés do analema de determinada hora. Sendo possível, além de selecionar horas (Figura 165), selecionar dias (Figura 166), épocas do ano, dias e horas específicos (Figura 167) ou ainda vários períodos distintos (Figura 168).



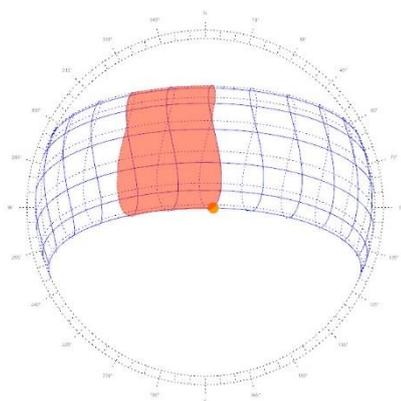
**Figura 168 – Seleção de uma hora**

**Fonte: do autor**



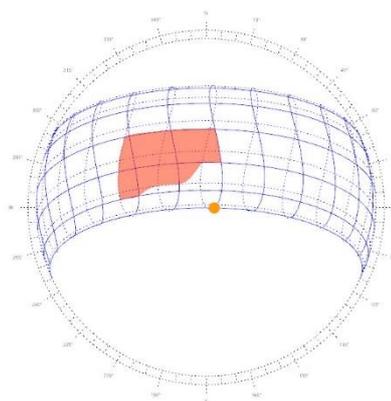
**Figura 166 – Seleção de período de dias**

**Fonte: do autor**



**Figura 167 – Seleção de períodos específicos**

**Fonte: do autor**

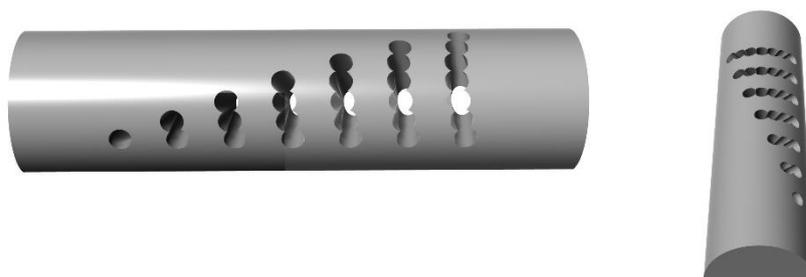


**Figura 168 – Seleção de períodos distintos**

**Fonte: do autor**

O primeiro teste realizado foi criar uma peça similar ao relógio de sol do Mojoptix, que permitiu, de modo simplificado, demonstrar a passagem das horas durante o dia escolhido. Levou-se em conta o período das 9h às 16h, sendo que às 9h somente um círculo deveria ser projetado, às 10h seriam dois e assim por diante, até os sete círculos projetados às 16h. Para isso criou-se um meio cilindro, com sete buracos na face inferior. Para o primeiro buraco fez-se extrusão no sentido dos vetores solares das 9h às 16h para o dia 10 de novembro (devido ao dia de teste), para o buraco

seguinte a extrusão foi feita para o período das 10h às 16h, chegando ao último buraco com extrusão somente seguindo o vetor solar das 16h. O modelo foi impresso em 3D (Figura 169) e testado para o dia escolhido (Figura 170), com orientação norte-sul, projetando corretamente os círculos. Como foram utilizados os vetores solares para Campinas-SP, não foi necessário inclinar a peça como no relógio de sol do Mojoptix, deixando-a paralela ao plano.



**Figura 169 – Modelo 3D do teste cilíndrico para impressão**

**Fonte: do autor**



**Figura 170 – Teste do modelo impresso para o dia 10 de Novembro**

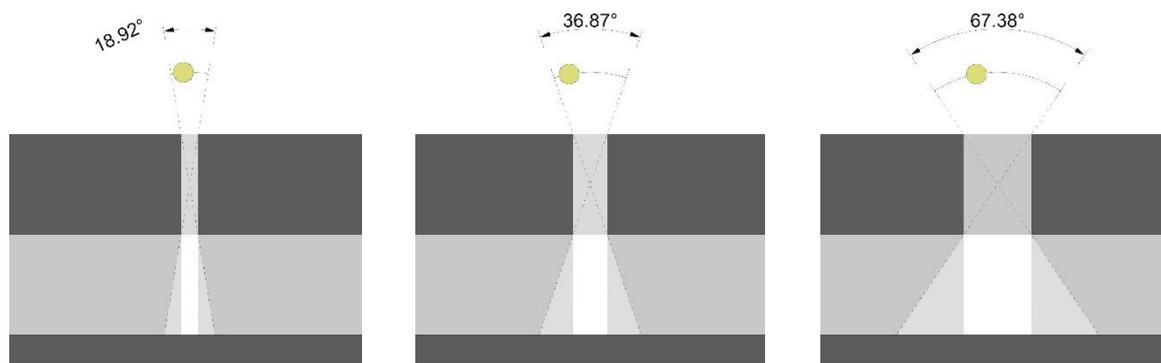
**Fonte: do autor**

Somente a extrusão no sentido do vetor solar não garante a precisão e definição da sombra, devido ao ângulo de abertura gerado no processo, o qual tem relação com a espessura da placa e diâmetro da perfuração. Em uma placa de espessura desprezível em relação ao diâmetro da perfuração, a luz será projetada durante todo o período de incidência e não somente no período desejado. De modo inverso, quanto

maior a espessura em relação ao diâmetro de perfuração, menor será o ângulo de incidência, e maior a precisão de definição da sombra. Contudo, menor será também a área de luz. Para a latitude de Campinas-SP, a diferença em graus entre as horas consecutivas do dia varia entre  $13,9^\circ$  e  $15^\circ$ . Deste modo, se o ângulo de abertura for maior que  $27,8^\circ$ , resquícios da iluminação de uma hora devem aparecer na anterior e posterior. Em termos da diferença em graus entre meses consecutivos, para uma mesma hora, pode variar de  $2^\circ$  até  $12,3^\circ$ . Além disso, deve-se levar em conta que, para toda latitude, existem dois dias por ano com o mesmo vetor solar, o que se pode notar no próprio analema, o qual se auto intersecciona, tendo uma geometria similar a um "8". Mesmo para dois dias consecutivos, a diferença no vetor é insignificante, sendo menos que  $0,5^\circ$ . Para uma diferença de 15 dias é de, aproximadamente,  $5,5^\circ$ .

Estes valores são fundamentais para definir a precisão do sombreamento e ângulo de abertura. É importante também destacar que, para todo ângulo de abertura, existem áreas de iluminação total, áreas de penumbra e áreas de sombra. Estas áreas de penumbra são onde existem "resquícios" da iluminação de precisão, onde a forma original projetada iria diminuindo até sumir. Quanto maior o ângulo de abertura e a área de penumbra, estes resquícios da iluminação durarão mais tempo, levando a um sombreamento de menor precisão e definição. Deste modo, é importante definir qual a relação entre espessura da placa e diâmetro da abertura mais adequada.

Considerando uma placa de espessura de 20mm, calculou-se o ângulo de abertura para aberturas de diâmetro de 3mm, 6mm e 12mm (Figura 171). Como se pode notar, o ângulo de abertura tem um aumento significativo, bem como a área de penumbra. Comparando-se com os valores de ângulo solar, somente a primeira opção (furação de 3mm em placa de 20mm) estaria adequada ao uso para sombreamento de períodos de horas, por ser menor de  $27,8^\circ$ , sendo que os demais teriam resquícios de iluminação em demais horas do dia.



**Figura 171 – Ângulo de abertura para perfurações de 3, 6 e 12mm**

**Fonte: do autor**

Outro fator que deve ser levado em conta é a altura solar. Com a alteração da altura solar ao longo do dia, o ângulo de incidência do sol em relação ao plano se altera, criando uma inclinação na perfuração de entrada. Esta inclinação gera uma mudança no ângulo de abertura, considerando o mesmo diâmetro da perfuração e mesma espessura da placa. As imagens abaixo trazem a perfuração perpendicular ao plano,  $15^\circ$  em relação ao vetor normal ao plano e  $30^\circ$  em relação ao vetor normal ao plano (Figura 172). Para estas, considerou-se a placa de 20mm e perfuração de 6mm. Como se pode notar, quanto menor for a altura solar e, conseqüentemente, maior a inclinação, menor é o ângulo de incidência. Apesar da diferença ser pequena, este estudo demonstra que o caso mais crítico é perpendicular ao plano, em termos de ângulo de abertura, sendo que vetores solares para períodos de maior altura solar terão um sombreamento com precisão menor do que para períodos com menor altura solar. Pela diferença ser muito baixa, os efeitos só seriam notados em períodos entre dias consecutivos ou na mesma hora entre meses consecutivos.

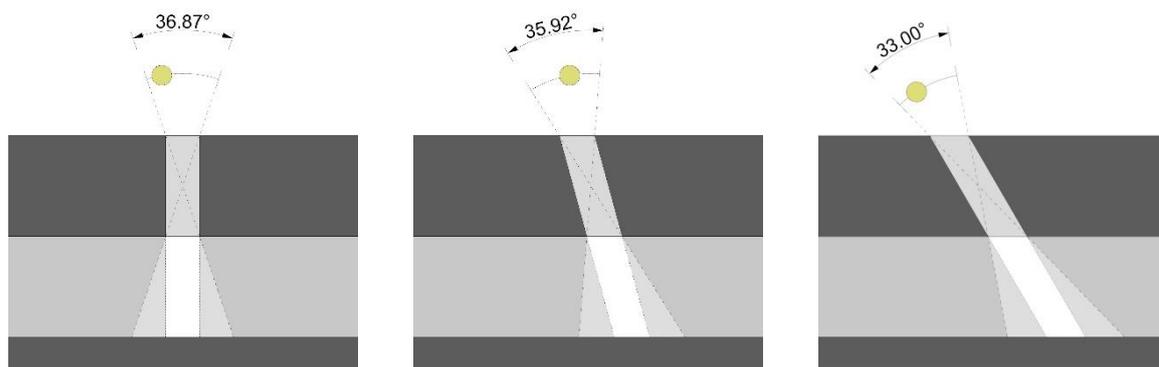


Figura 172 – Ângulo de abertura para inclinações de 0°, 15° e 30°

Fonte: do autor

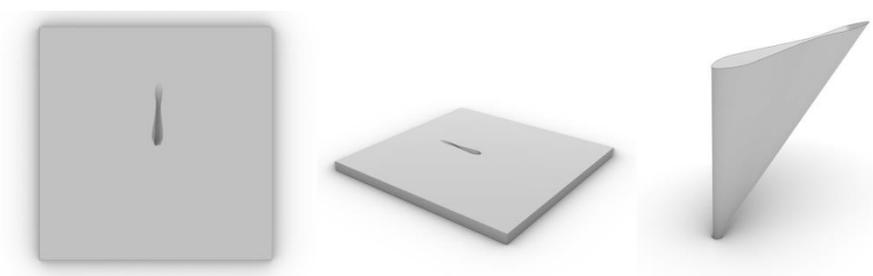
Estes exemplos buscavam analisar o ângulo de abertura, usando como base a perfuração simples com um vetor solar único. O relógio de sol do Mojoptix tenha como base aberturas retangulares, com interrupções entre os vetores solar, buscando filtrá-los. Já o projeto do escritório SOM apresenta uma abertura circular pequena, porém com uma interpolação das áreas de entrada de luz, criando uma geometria superior que afunilava na abertura circular. O relógio de sol da Prescription e Arup também tinha uma interpolação do analema para criar uma área de entrada de luz.

Tendo estes exemplos como base, buscou-se testar se é mais adequado utilizar como base um pequeno círculo (ponto) ou um retângulo (linear) e se é mais adequado manter separados cada vetor solar (conjunto de furos) ou realizar a interpolação destes, criando uma área de entrada (abertura contínua). Para isso, realizaram-se quatro estudos, cruzando as aberturas de base (ponto e linear) e abertura de entrada (conjunto de furos e abertura contínua). As geometrias foram geradas para permitir a iluminação para o período das 12h de todos os meses do ano e testadas para o dia 21 de Dezembro, das 9h às 15h (teste de período perpendicular), buscando verificar sua precisão. No caso da abertura da base linear, foram utilizadas quatro retas, orientadas no sentido norte-sul, leste-oeste e pontos colaterais. As geometrias de teste podem ser observadas abaixo (Figuras 173, 174, 175 e 176), bem como o resultado das simulações realizadas (Figura 177).



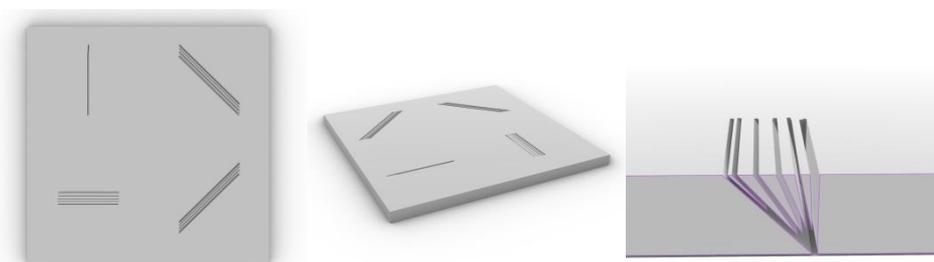
**Figura 173 – Abertura da base por ponto e com conjunto de furos (vista superior, perspectiva e geometria subtraída)**

**Fonte: do autor**



**Figura 174 – Abertura da base por ponto e com abertura contínua (vista superior, perspectiva e geometria subtraída)**

**Fonte: do autor**



**Figura 175 – Abertura da base linear e com conjunto de furos (vista superior, perspectiva e corte)**

**Fonte: do autor**

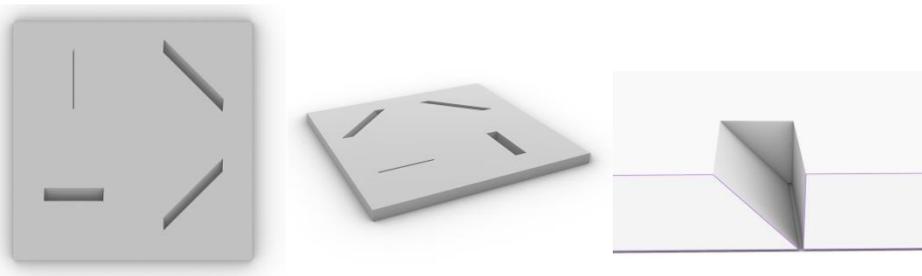


Figura 176 – Abertura da base linear e com abertura contínua (vista superior, perspectiva e corte)

Fonte: do autor

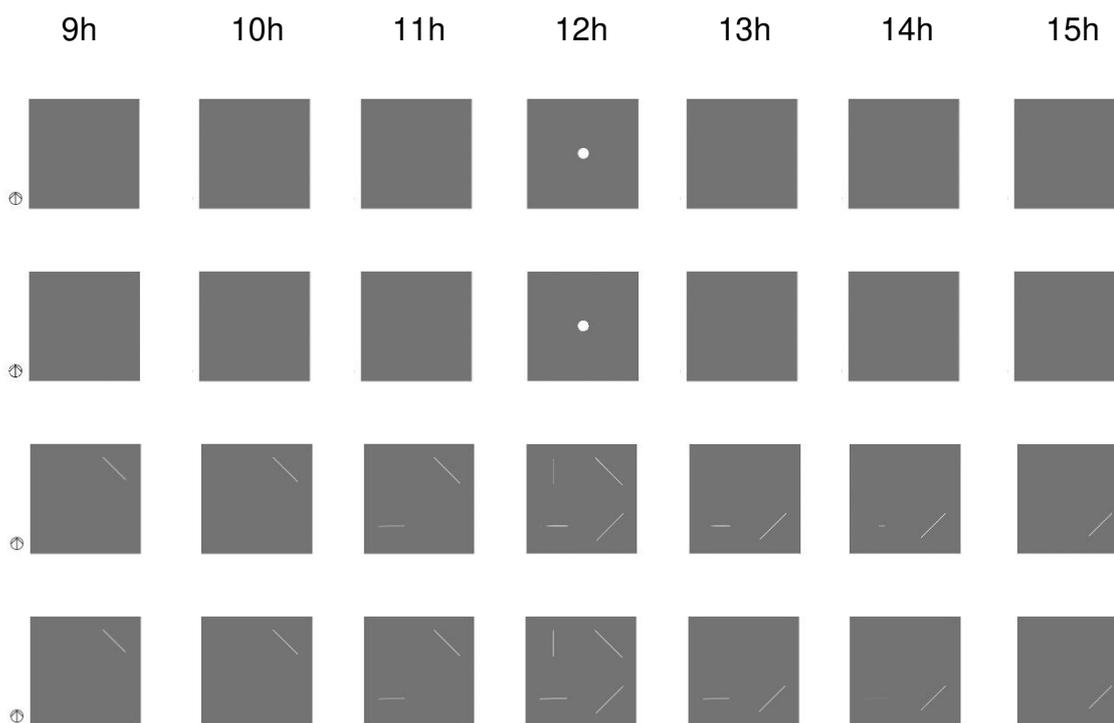


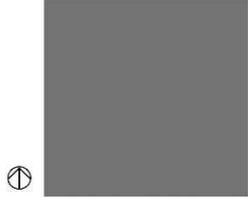
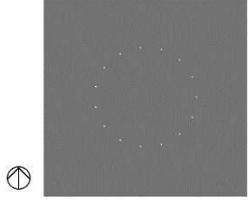
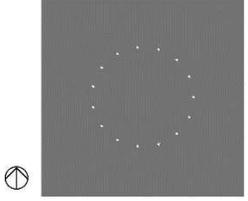
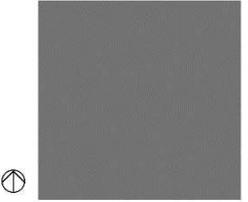
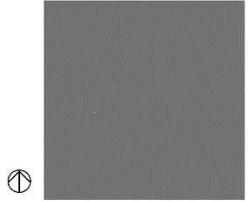
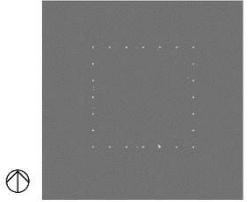
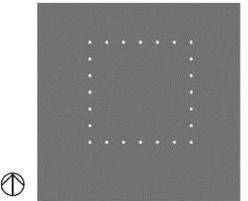
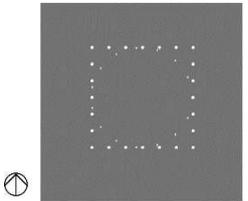
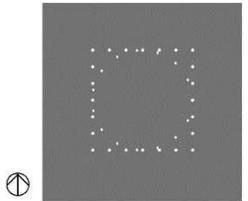
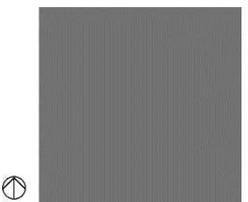
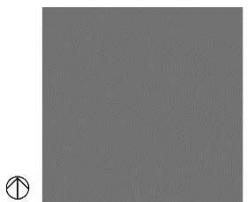
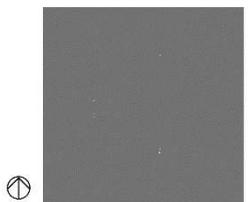
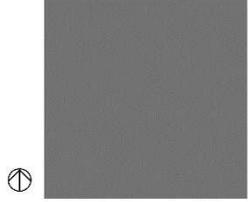
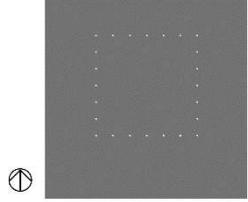
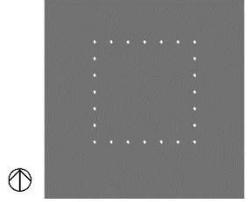
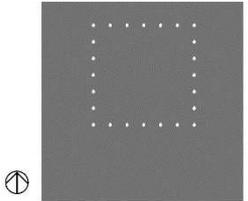
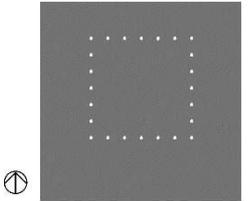
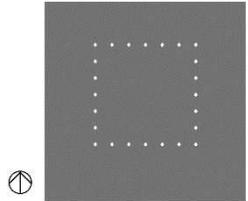
Figura 177 – Teste de sombreamento das geometrias das 9h às 15h de 21 de Dezembro

Fonte: do autor

Como se pode notar, em relação à abertura de saída, a abertura linear teve uma precisão muito menor do que a por ponto, com resquícios durante todo o período, dependendo da orientação da reta. Esse fato se dá pela criação de um ângulo de abertura longitudinal, o qual é muito maior do que o ângulo de abertura transversal, funcionando como uma perfuração mais larga no sentido de sua orientação. Ao passo que, na saída por ponto, há sempre uma precisão igual, pois o ângulo de abertura é igual em todos os sentidos, por sua simetria radial.

Em relação à abertura de entrada, não se notou diferenças entre o conjunto de furos e abertura contínua. Claro que a interpolação, nestes casos, criou áreas que englobavam somente os pontos referentes aos vetores do período escolhido. Dependendo dos períodos escolhidos, é possível que a interpolação possa englobar período que não são desejados.

As análises anteriores se basearam em um único período e uma geometria de base a ser projetada. Tendo como base os pontos com conjunto de furos, buscou-se analisar qual seria a influência de ter-se mais de um período, em conjunto com mais de uma geometria de base a ser projetada. Para isso, gerou-se uma geometria de sombreamento que iria projetar os pontos de um quadrado às 12h do equinócio de outono e solstício de inverno e os pontos de um círculo às 12h do equinócio de primavera e solstício de verão. Todas as perfurações apresentam 6mm de diâmetro, tendo a espessura da placa de 20cm, 10cm e 5cm. As geometrias foram testadas para o período de todos os meses do ano, no dia 21 às 12h. Abaixo temos o resultado da projeção em cada um dos meses para cada espessura de placa (Tabela 14).

	20cm	10cm	5cm
Janeiro			
Fevereiro			
Março			
Abril			
Maior			
Junho			

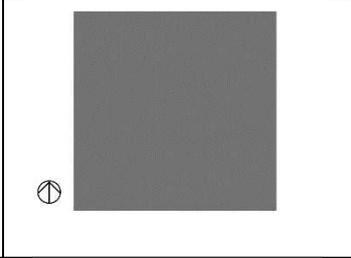
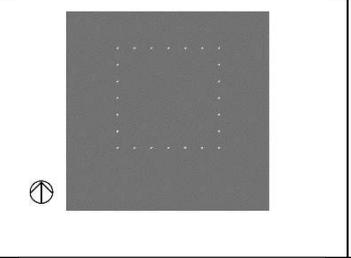
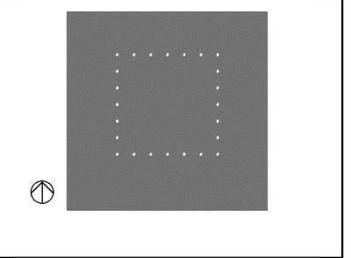
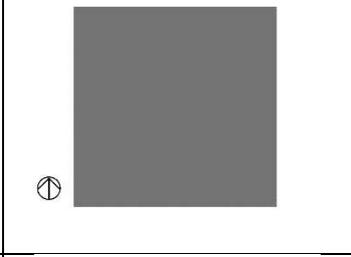
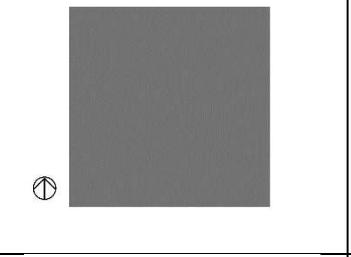
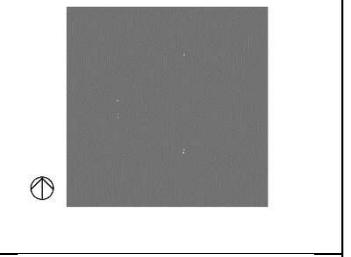
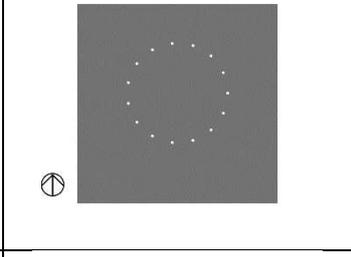
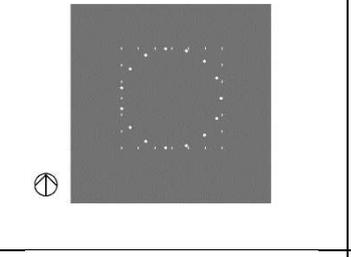
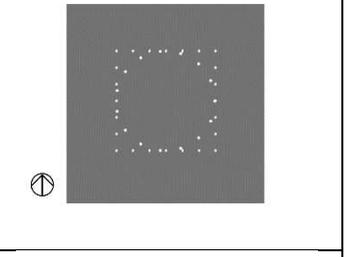
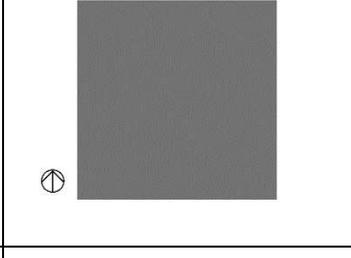
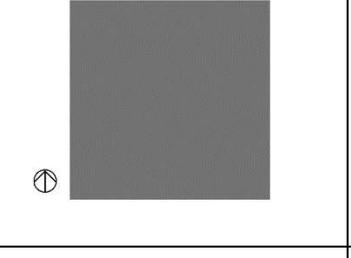
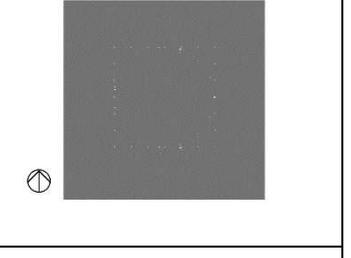
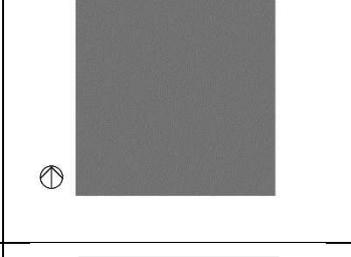
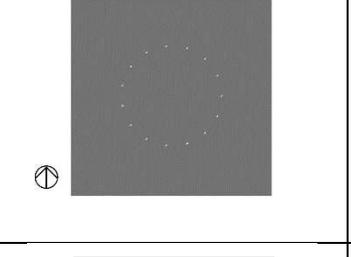
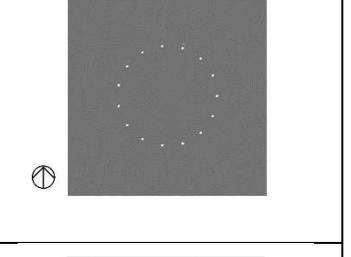
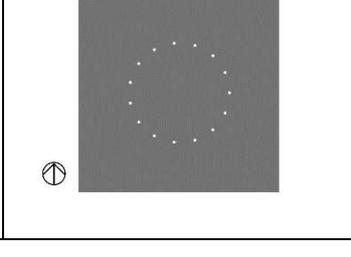
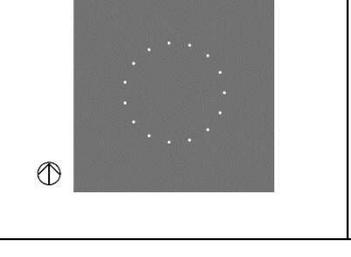
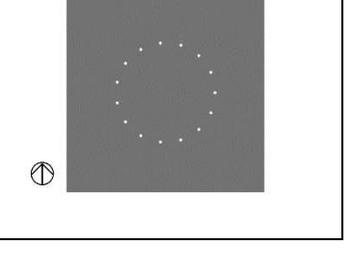
Julho			
Agosto			
Setembro			
Outubro			
Novembro			
Dezembro			

Tabela 14 – Teste da projeção do sombreamento para placas de, respectivamente, 20, 10 e 5cm

Fonte: do autor

Tal como já havia sido demonstrado, quanto maior a relação entre a espessura da placa e o diâmetro de perfuração, menor o ângulo de abertura e maior a precisão do sombreamento. Para a placa de 20cm, as imagens aparecem somente nos meses desejados, sem resquícios nos demais. Já nas placas de 10 e 5cm, pode-se observar que existem resquícios nos demais meses. Além disso, pelo vetor dos equinócios serem muito similares, podem-se ver resquícios do círculo no equinócio de outono e resquícios do quadrado no equinócio de primavera.

Nos estudos realizados, a relação entre espessura da placa e diâmetro da perfuração variou de 1,6:1 até 33:1, sendo que a precisão e definição variou de acordo com o período e comparação por teste de período perpendicular. Para períodos da mesma hora todos os meses, 5:1 foi uma relação que apresentou bons resultados, ao passo que para dias específicos dentro do ano, foi necessário, pelo menos, 18:1 para terem-se poucos ou nenhum resquício em outras datas, no período de um mês. Obviamente que, quando maior a relação, maior a definição, porém existem limitações ferramentas, espessura padrão de brocas, fresas e placas, que restringem esta relação a valores padrões.

Nestes estudos, demonstrou-se que é possível realizar perfurações em uma placa com o intuito de criar um sombreamento de precisão, sendo que sua precisão depende do período desejado, espessura da placa e diâmetro da perfuração. Com estas definições, é possível aplicar este princípio não só para a projeção de imagens em períodos específicos, mas também controle de iluminação natural em diferentes períodos do ano, visando fornecer a quantidade precisa de luz, ou controle de radiação solar, visando regular a temperatura do ambiente e trazer maior conforto térmico aos usuários.

É importante destacar que nos exemplos os relógios de sol ou o Skylight do Centro Koch foram todos impressos em 3D. Ao se trabalhar com peças pequenas, como os relógios de sol, ou até um único elemento, como o skylight, é possível trabalhar com a impressão 3D devido à sua precisão, contudo, ao se trabalhar com elementos maiores ou diversos elementos, torna-se impraticável pelo tempo de impressão e materiais, sendo a produção por braço robótico muito mais eficiente e de menor custo.

De modo similar às perfurações, buscou-se aplicar o conceito de sombreamento de precisão em paredes de blocos, tendo como base os estudos realizados pelo grupo

Gramazio Kohler, como é o caso da parede oscilante. Os exemplos levantados de paredes de blocos construídas com braços robóticos têm como base formas complexas diversas, porém sem base em desempenho térmico ou luminoso.

Entrando na área de formas complexas, porém sem construção por braços robóticos ou outros tipos de robôs, temos o exemplo brasileiro do CoBLogó (Figura 178), pelo escritório SUBdV, o qual tem como um dos princípios geradores o desempenho luminoso do ambiente interno (Figura 179). Neste caso, os blocos foram posicionados manualmente com o auxílio de gabaritos de papelão, cortados a laser. Apesar do método permitir a construção de formas complexas pelo empilhamento de blocos, existem problemas de precisão que dependem de quem está assentando os blocos, além da geração de lixo, pois cada fileira requer um gabarito diferente, o qual será usado somente uma vez. A parede não apresenta função estrutural, funcionando como uma fachada dupla, onde a entrada de luz se dá pela rotação de blocos na fachada.



Figura 178 – Fachada do CoBLogó

Fonte: [www.archdaily.com.br](http://www.archdaily.com.br)

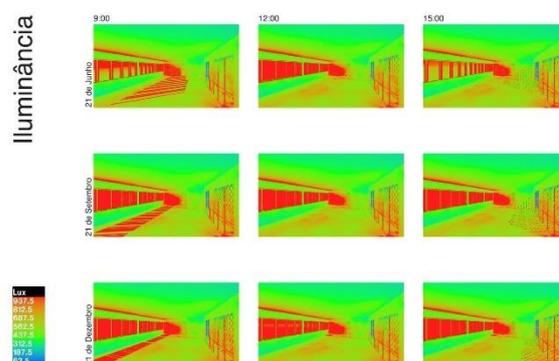


Figura 179 – Análise de desempenho do CoBLogó

Fonte: [www.archdaily.com.br](http://www.archdaily.com.br)

Além da rotação dos blocos, é possível também alterar o espaçamento entre eles e a inclinação da parede, havendo uma sobreposição dos blocos, com uma pequena parte em balanço, gerando a inclinação (ABDELWAHAB; ELGHAZI, 2016). Apesar do potencial demonstrado para redução de ofuscamento e certo controle da iluminação natural excessiva e, conseqüentemente, controle térmico, os processos se baseiam em otimizações paramétricas aliadas às simulações computacionais, tal como o autor já realizou durante as pesquisas de mestrado e iniciação científica, com foco em

valores gerais. Contudo, não apresenta a mesma precisão do sombreamento de precisão.

A própria forma e disposição dos blocos não permite a mesma flexibilidade de vetores e formas que na perfuração de placas, restringindo-se pela própria forma do bloco. Além disso, a posição, orientação e deslocamento de um bloco influencia diretamente o próximo, sendo necessário o uso de um sistema recursivo para ajustar estes fatores corretamente para todo o conjunto. Outras estratégias se baseariam novamente em uma aproximação por otimização e uso de algoritmos genéticos, não sendo diretamente relacionado ao princípio de sombreamento de precisão apresentado.

Por outro lado, mudança na geometria das paredes, com base no princípio de auto-sombreamento, permite a redução de ganho térmico da parede, como já foi demonstrado em pesquisas anteriores (CAMPOS, 2017). Diversos projetos se utilizam deste mesmo princípio, como é o caso do Instituto Katana (ABDELWAHAB; ELGHAZI, 2016). Durante a pesquisa de mestrado, demonstrou-se por métodos de otimização que o auto-sombreamento era capaz de reduzir o ganho térmico, conseqüentemente, a necessidade de condicionamento de ar nos ambientes (CAMPOS, 2017). Nesta pesquisa, ao invés de se utilizar os princípios da otimização por testes por algoritmos genéticos, buscou-se utilizar o princípio dos vetores solares e períodos nos quais se busca a redução do ganho térmico.

A geometria utilizada para teste foi um cilindro, por apresentar faces para todas as orientações. Uma análise inicial de radiação incidente permite identificar as faces com menor e maior radiação incidente (Figura 180). Para cada face foi determinado um vetor com base na radiação incidente e projeção do vetor solar no plano perpendicular à face (Figura 181), o qual levou a uma deformação da forma inicial (Figura 182) pela inclinação dos trechos da parede. À nova geometria, adequaram-se os blocos (Figura 183). A média de radiação incidente nas faces do modelo original era de 251,8 kWh/m<sup>2</sup>, considerando-se a presença de picos em algumas faces. Após a deformação da geometria, esta média passou para 199 kWh/m<sup>2</sup>, com uniformização dos valores pelas faces. Para as simulações, foi considerado o período do verão para os testes iniciais.

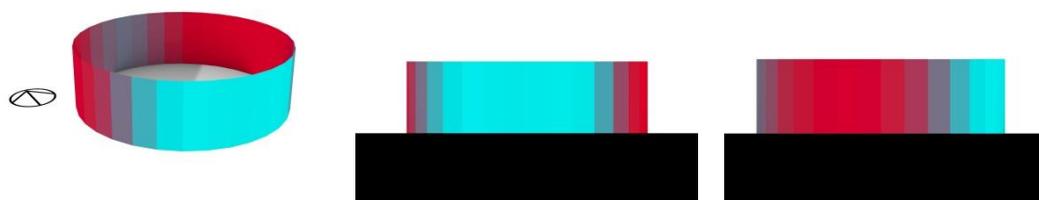


Figura 180 – Análise de radiação incidente (perspectiva, vista frontal e lateral)

Fonte: do autor

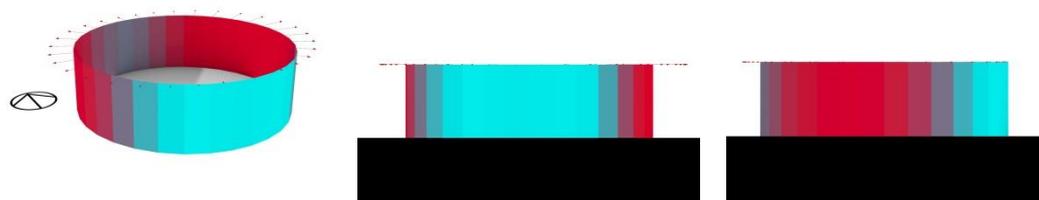


Figura 181 – Vetor de modificação das faces (perspectiva, vista frontal e lateral)

Fonte: do autor



Figura 182 – Análise de radiação incidente do modelo modificado de acordo (perspectiva, vista frontal e lateral)

Fonte: do autor

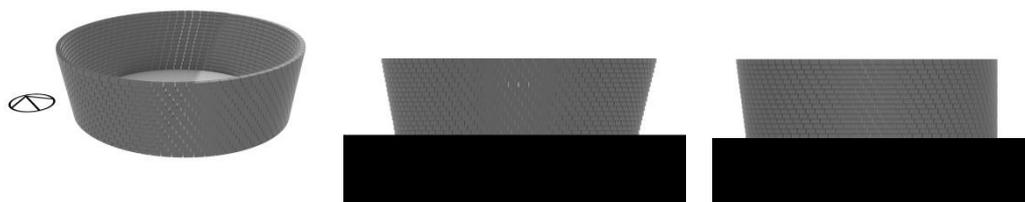
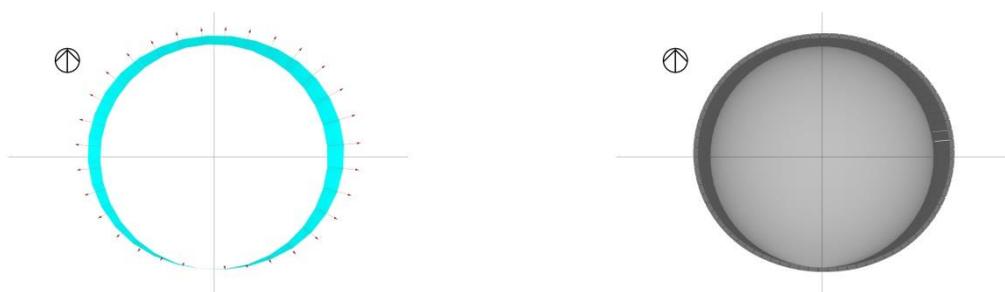


Figura 183 – Geometria com blocos (perspectiva, vista frontal e lateral)

Fonte: do autor

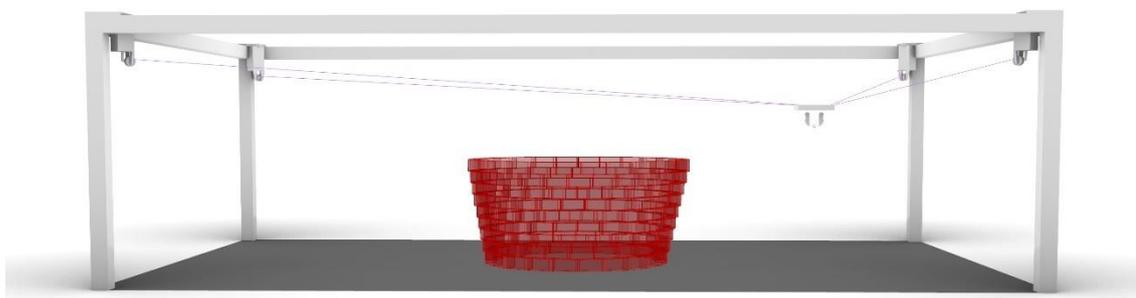
Pelas faces terem valores de radiação incidente e orientações diferentes, bem como influência de diferentes vetores solares, a deformação não se dá de forma regular, como se pode observar nas vistas superiores do modelo (Figura 184). Deste modo, realiza-se a deformação somente nas faces necessárias.



**Figura 184 – Geometria final, vista superior com vetores de modificação e blocos**

**Fonte: do autor**

As simulações utilizadas demonstram a redução da radiação incidente nas faces da geometria. Até o presente momento, trabalhou-se com somente um período (verão) e considerando as faces inteiras, porém é possível dividir a face em secções, para que cada uma seja utilizada com vetores diferentes, buscando equilibrar o ganho térmico durante diferentes períodos. Outra opção é selecionar áreas da geometria para reagir a diferentes períodos, tendo como base sempre a radiação das faces e influência destas modificações no decorrer do ano, não só para o período estabelecido. O estudo de montagem com cablebot poderia ser feito com base no empilhamento de blocos, seguindo o modelo de auto-sombreamento (Figura 185).



**Figura 185 – Modelo de empilhamento de blocos e uso de cablebot**

**Fonte: do autor**

## Apêndice III – Relação de artigos das bases do estudo bibliométrico

### 1. CumInCAD

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2010	A New Parametric Design Tool for Robot Milling	BRELL-COKCAN, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2010	Material Information: Integrating Material Characteristics and Behavior in Computational Design for Performative Wood Construction	MENGES, A.	ROBOTIC
2010	ROBO studio: towards architectronics	MEYBOOM, A.	ROBOTICS
2010	Urban Infrastructure & Architectronics	MEYBOOM, A.	ROBOTICS
2010	Limited Embodied Programming: Teaching programming languages to architects	NEMBRINI, J.	ROBOTIC
2010	Anticipatory Architecture   Extrapolative Design	PERRY, C.	ROBOTICS
2010	Graphical Simulator for a Robotic Environment	PIAZENTIN, O.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2011	Parametric Robot Control: Integrated CAD/CAM for Architectural Design	BRAUMANN, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2011	Using Robotic Technologies to Integrate External Influences in Design	D'ESTREE, S.	ROBOTIC
2011	Computational Design Synthesis: Embedding Material Behaviour in Generative Computational Processes	FLEISCHMANN, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2011	Architecture = Computer, from Computational to Computing Environments	HAEUSLER, M.	ROBOT, ROBOTS
2011	Integrating Difference	JOHNSON, J.	ROBOTS
2011	Robotically Fabricated Thin-shell Vaulting: A method for the integration of multi-axis fabrication processes with algorithmic form-finding techniques	KACZYNSKI, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2011	Motion and Modular Architecture	KIM, S.	ROBOT, ROBOTS
2011	Performative Architectural Morphology: Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures	KRIEG, O.	ROBOTIC
2011	Automated Folding of Sheet Metal Components with a Six-axis Industrial Robot	LAVALLEE, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2011	Robotic Rod-bending: Digital Drawing in Physical Space	MACDOWELL, P.	ROBOTIC
2011	Integrative Design Computation: Integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational	MENGES, A.	ROBOTIC

	design for performative wood constructions		
2011	A Five-axis Robotic Motion Controller for Designers	PAYNE, A.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2011	Formation Embedded Design: A methodology for the integration of fabrication constraints into architectural design	PIGRAM, D.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2011	Cultura aumentada ou substituída? Distinções entre o arquiteto-ferramenta e o arquiteto-aparelho eletrônico	VELOSO, P.	ROBOT, ROBOTS

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2012	Progress Towards Multi-Criteria Design Optimisation Using Designdscript With Smart Form, Robot Structural Analysis and Ecotect Building Performance Analysis"	AISH, R.	ROBOT, ROBOTS
2012	Low Fidelity	BESLER, E.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	Digital and Physical Tools for Industrial Robots in Architecture: Robotic Interaction and Interfaces	BRAUMANN, J.	ROBOTIC
2012	Real-Time Robot Simulation and Control for Architectural Design	BRAUMANN, J.	ROBOT, ROBOTS
2012	Material and Machine Computation of Designed Granular Matter: Rigid-Body Dynamics Simulations as a Design Tool for	DIERICHS, K.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC

	Robotically-Poured Aggregate Structures Consisting of Polygonal Concave Particles		
2012	An Integral Approach to Structural Optimization and Fabrication	FERINGA, J.	ROBOTIC, ROBOTICS
2012	Implicit Fabrication, Fabrication Beyond Craft: The Potential of Turing Completeness in Construction"	FERINGA, J.	ROBOTICS
2012	Design and Fabrication of Topologically Optimized Structures; An Integral Approach - A Close Coupling Form Generation and Fabrication	FERINGA, J.	ROBOTIC, ROBOTICS
2012	In-Situ Robotic Construction: Extending the Digital Fabrication Chain in Architecture	HELM, V.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	Tectonic Tessellations: A Digital Approach to Ceramic Structural Surfaces	IMBERN, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	Synthetic Digital Ecologies	JOHNSON, J.	ROBOTICS
2012	ACADIA 12: Synthetic Digital Ecologies	JOHNSON, J.	ROBOTICS
2012	Computational Design of Robotically Manufactured Plate Structures Based on Biomimetic Design Principles Derived from Clypeasteroidea	KRIEG, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	Robotic Construction by Contour Crafting: The Case of Lunar Construction	LEACH, N.	ROBOTIC
2012	Morphfaux: Probing the Proto-Synthetic Nature of Plaster Through Robotic Tooling	MANKOUCHE, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	An Exploration Into Computational Optimization for Motive Architecture	MEHANN, R.	ROBOTICS
2012	Glass Cast: A Reconfigurable Tooling System for Free-Form Glass Manufacturing	MCGEE, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2012	Robotic reticulations: A method for the integration of multi-axis fabrication processes with algorithmic form-finding techniques	MCGEE, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	Cellular Robotic Architecture	PAN, C.	ROBOTIC
2012	Robotic Prototypes Optimization: Incorporation of Optimization Procedures in the Design Process	PASTERNAK, A.	ROBOTIC
2012	Reactive Light Design in the "Laboratory of the Street" Esben Skouboe Poulsen, Hans Jørgen Andersen"	POULSEN, E.	ROBOT, ROBOTS
2012	Adaptive Distributed Robotics for Environmental Performance, Occupant Comfort and Architectural Expression	ROSSI, D.	ROBOTICS
2012	Machinic Morphospaces: Biomimetic Design Strategies for the Computational Exploration of Robot Constraint Spaces for Wood Fabrication	SCHWINN, T.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2012	Robotic Fabrication of Modular Formwork for Non-Standard Concrete Structures	STAVRIC, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2012	Tangible Pixels: Interactive Architectural Modules for Discovering Adaptive Human Swarm Interaction	TANG, W.	ROBOTIC
2012	The Agency of Responsive Envelopes: Interaction, Politics and Interconnected Systems	THUN, G.	ROBOTIC
2012	Uso de sistemas robóticos en la producción de componentes constructivos con complejidad geométrica	VERGARA, M.	ROBOTIC

2012	The Preliminary Process of Synthetic Digital Fabrication: In Terms of Sheet Metal Facade	WANG, C.	ROBOT, ROBOTS
2012	Aerial Robotic Construction Towards a New Field of Architectural Research	WILMANN, J.	ROBOTIC, ROBOTICS

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2013	ALOPS Constructive Systems – Towards the Design and Fabrication of Unsupervised Learning Construction Systems	ARENAS, U.	ROBOTICS
2013	Hacia la Adaptabilidad en Sistemas Robóticos de Construcción	ARENAS, U.	ROBOTIC
2013	Adaptable Communication Protocols for Robotic Building Systems	ARENAS, U.	ROBOTIC
2013	Generative Agent-Based Design Computation	BAHARLOU, E.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Magnetic architecture. A new order in design	BELLO, G.	ROBOTS
2013	Industrial Robots for Design Education: Robots as Open Interfaces beyond Fabrication	BRELL-COKCAN, S.	ROBOTIC, ROBOTICS
2013	The evolution of representation in architecture	CARREIRO, M.	ROBOTIC
2013	Robots: Automatización en Diseño y Construcción para la Enseñanza de Arquitectura	CHIARELLA, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	HygroSkin: A prototype project for the development of a constructional and climate responsive architectural system based on the elastic and hygroscopic properties of wood	CORREA, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2013	An Automated Robotic Manufacturing Process: For the Thermoplastic Panel Building Technology	DRITSAS, S.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2013	Métodos Computacionales en Arquitectura: La Formación de Arquitectos con Competencia en CyT [Computational Methods in Architecture: The Education of Architects with Competence in S&T]	GONZALEZ, L.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2013	Field condition and the robotic urban landscapes	GOYAL, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2013	Overcoming Repetition: Robotic fabrication processes at a large scale	HACK, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Robotic Fabrication of Modular Form-Work – An Innovative Approach to Formwork Fabrication for Non-Standard Concrete Structures	KAFTAN, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	HygroSkin: A climate-responsive prototype project based on the elastic and hygroscopic properties of wood	KRIEG, O.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	A Software Environment for Designing Through Robotic Fabrication – Developing a Graphical Programming Toolkit for the Digital Design and Scaled Robotic Fabrication of High Rises	LIM, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Introducing a Workshop to build an Affordable 3D-Scanner: Presenting a Variety of Computational Concepts to Novice Students of Architecture	LONSING, W.	ROBOTICS

2013	The Novel Stones of Venice: The Marching Cube Algorithm as a Strategy for Managing Mass-customisation	MAXWELL, I.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Fabricate It, Paint It – And Don't Wait up: Separating Fact from Fiction in Digitally Sponsored Fabrication	MCMEEL, D.	ROBOTS
2013	Robot Cowboy: Reviving Tundra Grassland through Robotic Herding	MILLER, I.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2013	A Generative Approach to Robotic Fabrication	NARAHARA, T.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Adaptive Growth Using Robotic Fabrication	NARAHARA, T.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Biological Computation for Digital Design and Fabrication	OXMAN, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Real-Time Assessment for Architectural CAD/CAM: Knowledge-Based-Methodology Approach	PORTUGAL, V.	ROBOTICS
2013	Knowledge-based methodology for architectural robotics fabrication. Real time impact assessment through a process flow analysis software	PORTUGAL, V.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2013	Fisac Variations: An Integrated Design and Fabrication Strategy for Adaptable Building Systems	RASPALL, F.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2013	Involute: A method for the integration of multi-axis fabrication with a helical system of variable wood bending	SCORCIA, B.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	PerFORM/The Scan: Experimental studies in 3D Scanning and Theatrical Performance	SHEIL, B.	ROBOTICS
2013	Identificação de Danos em Fachadas de Edificações: Geração de Mosaicos Fotográficos Obtidos por Plataforma Robótica	SILVANO, M.	ROBOTIC, ROBOTICS
2013	Off-Road City	SILVER, M.	ROBOTS
2013	Designing the Negative	SYMEONIDOU, I.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2013	Topology optimization and digital assembly of advanced space-frame structures	SONDERGAARD, A.	ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2013	Fibrous Morphologies	WEIGELE, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2013	Eco-Machine: A Green Robotic Ecosystem for Sustainable Environments	WENG, Y.	ROBOTIC

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2014	From rapid prototyping to automated manufacturing	AANT, B.	ROBOTICS
2014	Seeing is Doing: Synthetic Tools for Robotically Augmented Fabrication in High-Skill Domains	BARD, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2014	Performative Wood	BARIS, J.	ROBOTS, ROBOTIC,

			ROBOTIC FABRICATION
2014	ViscoPlasty	BENNANI, S.	ROBOTIC
2014	Desarrollo de competencias avanzadas en computación en la formación de los arquitectos latinoamericanos del siglo XXI	BOHME, L.	ROBOTICS
2014	Robotic Production Immanent Design: Creative toolpath Design in Micro and Macro Scale	BRELL-COKCAN, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Robofoam	CHRISTOU, E.	ROBOTICS
2014	Toward a taxonomy of architectural robotics	DAAS, M.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION, ROBOTICS
2014	From Surface to Volume: An Approach to Poche` with Composites	EKMEKJIAN, N.	ROBOTICS
2014	Robotic Bead Rolling	FRIEDMAN, J.	ROBOTIC, ROBOTICS
2014	Woven Clay	FRIEDMAN, J.	ROBOTIC, ROBOTICS
2014	Robotic Infiltrations	GHEORGHE, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Mesh Mould: Differentiation for Enhanced Performance	HACK, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	CentriPETAL	IBANEZ, M.	ROBOTICS
2014	Enhanced 3D-Space-Scanning System by Robotic Technology	IWATA, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC

2014	Digitally-Assisted Stone Carving on Canada's Parliament Hill	JAMES, H.	ROBOTIC
2014	Designing with Discrete Geometry	JONAS, K.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Robotic Incremental Sheet Metal Fabrication	KALO, A.	ROBOTIC
2014	ROBOTHERMODON: An Artificial Sun Study Lab with a Robot Arm and Advanced Model Platform -A Thermal Heliodon(STEVE: Solar Thermal Evaluation Experiment)	KHORASGANI, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2014	Bio-inspired and fabrication-informed design strategies for modular fibrous structures in architecture	LEYLA, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Robotic Metal Aggregations	LIM, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Geoweaver	MAESHIRO, J.	ROBOTICS
2014	CrystalCloud	MIRMOTAHARI, A.	ROBOTICS
2014	Integrative computational design methodologies for modular architectural fiber composite morphologies	MORITZ, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Physical input-driven offline robotic simulation through a feedback loop process	ODYSSEAS, K.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2014	Case For an Architectural Singularity: Synchronization of Robotically Actuated Motion, Sense-Based Interaction and Computational Interface	OZEL, G.	ROBOTICS
2014	Isoprototyping - Rapid Robotic Aided Fabrication for Double Curvature Surfaces	PAVLOS, F.	ROBOTS, ROBOTIC
2014	Digital Fabrication Technology in Concrete Architecture	PEDRO, M.	ROBOTICS

2014	Additive Formwork: 3D Printed Flexible Formwork	PETERS, B.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Vertigouous Interiors	PIASECZYNSKA, M.	ROBOTICS
2014	Calibrating Agencies in a Territoy of Instrumentality	ROBINSON, A.	ROBOTICS
2014	Robotic Lattice Smock	SAUNDERS, A.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2014	Behavioral Strategies: Synthesizing design computation and robotic fabrication of lightweight timber plate structures	SCHWINN, T.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Stoicheia: Tesla's Apotheosis, Architecture and Sound	SCIOTTO, M.	ROBOTIC
2014	Context-Aware Multi-Agent Systems: Negotiating Intensive Fields	SHIORDIA, R.	ROBOTIC, ROBOTICS
2014	Design to fabrication integration and material craftsmanship - A performance driven stone architecture design system based on material, structural and fabrication constraints and criteria	SINA, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2014	Embodied Design Cognition: Action-Based Formalizations in Architectural Design	SMITHWICK, D.	ROBOTIC
2014	The House That Roomba Built	SOSA, R.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2014	Rheological Translations	TROUFANOV, N.	ROBOTICS
2014	Robotic Fabrication of Acoustic Brick Walls	VOMHOF, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION, ROBOTICS

2014	Towards an Intelligent Architecture “Creating Adaptive Building Systems for Inhabitation”	WIT, A.	ROBOTICS
------	--	---------	----------

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2015	Digital-Material Feedback in Architectural Design	AMTSBERG, F.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	DMR: A Semantic Robotic Control Language	ANDRAOS, S.	ROBOT, ROBOTIC
2015	Graded Light in Aggregate Structures - Modulating the daylight in designed granular systems using online controlled robotic processes	ANGELOVA, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	On-site Robotic Assembly of Double-curved Self-supporting Structures	ARIZA, I.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2015	Decorative Robotic Plastering - A Case Study of Real-Time Human Machine-Collaboration in High-Skill Domains	BARD, J.	ROBOTIC
2015	Live: Synchronous Computing in Robot Driven Design	BATLINER, C.	ROBOT, ROBOTIC
2015	Towards A Motion Grammar for Robotic Stereotomy	BIDGOLI, A.	ROBOTS, ROBOTIC
2015	Adaptive Robot Control - New Parametric Workflows Directly from Design to KUKA Robots	BRAUMANN, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION

2015	Toward Adaptive Robot Control Strategies	BRELL-COKCAN, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2015	Pedagogy of Architectural Robotics	DASS, M.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2015	Soft Robotics and Emergent Materials in Architecture	DECKER, M.	ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2015	Digital Stereotomy: The Rejuvenation of Stone Masonry	FERNANDO, S.	ROBOTICS
2015	Pneuma-Technics // Methods for Soft Adaptive Environments	FOUGERE, D.	ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2015	Design Methods for Large Scale Printing	GARCIA, M.	ROBOTIC
2015	Design Agency: Prototyping Multi-Agent Systems in Architecture	GERBER, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Interaction of analogic and digital workflows for architectural design and production	GAMEZ, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Responsive systems, relevance, state of the art and developments	HENRIQUES, G.	ROBOTICS
2015	Robotic Woodcraft: Creating Tools for Digital Design and Fabrication	HORNUNG, P.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Sandworks / Sand Tectonic Prototype	HUSSEIN, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Educational kit for teaching robotics	KATO, L.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS

2015	Soft Robotics Applied to Architecture	KIM, S.	ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2015	Autonomous Botanist: the Poetic Potentials of a New Robotic Species	KOLTICK, N.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2015	Robotic Fabrication of Tensile Mesh Structures and Real Time Response - The Development and Simulation of a Custom- Made End Effector Tool	KONTOVOURKIS, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Expanding the Material Possibilities of Lightweight Prefabrication in Concrete Through Robotic Hot-Wire Cutting - Form, Texture and Composition	MARTINS, P.	ROBOTIC
2015	Analysis and validation of the digital chain relating to architectural design process: Achievement of a folded structure composed of wood panels	MEYER, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Computer Design and Digital Manufacturing of Folded Architectural Structures Composed of Wood Panels	MEYER, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Form Follows Flow: A Material-Driven Computational Workflow for Digital Fabrication of Large-Scale Hierarchically Structured Objects	MOGAS, L.	ROBOTIC
2015	Informed Design to Robotic Production Systems - Developing Robotic 3D Printing System for Informed Material Deposition	MOSTAFAVI, S.	ROBOTIC, ROBOTICS
2015	A Collaborative Approach to Digital Fabrication:A Case Study for the Design and Production of Concrete 'Pop-up' Structures	NAHMAD, A.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION

2015	A New Machinecraft. Architectural Robots	NAN, C.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2015	A New Machinecraft: A Critical Evaluation of Architectural Robots	NAN, C.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2015	Architecture meets gaming and robotics: Creating interactive prototypes and digital simulations for architects	NARAHARA, T.	ROBOTICS
2015	Robotic Fabrication with Cork: Emerging Opportunities in Architecture and Building Construction	PEDRO, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Smart Architecture-Bots & Industry 4.0 Principles for Architecture	ROSENBERG, E.	ROBOTS, ROBOTICS
2015	From Bob the Builder to Baxter the Builder	ROSENBERG, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2015	Sketching with Robots	ROUDAVSKI, S.	ROBOTS, ROBOTICS
2015	(Un) Building Codes: Architecture and the Limits of Artificial Intelligence	SILVER, M.	ROBOTICS
2015	Between Manual and Robotic Approaches to Brick Construction in Architecture	SOUSA, J.	ROBOT, ROBOTIC
2015	Robotic Fabrication in Architectural Education: An Experience on the Design and Construction of Brick Structures	SOUSA, J.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION

2015	Robotic Workflow	SWEET, K.	ROBOTS, ROBOTIC
2015	Behavioral Design and Adaptive Robotic Fabrication of a Fiber Composite Compression Shell with Pneumatic Formwork	VASEI, L.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2015	Robotic Design-Fabrication - Exploring Robotic Fabrication as a Dynamic Design Process	WEISSENBOCK, R.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2015	Investigations in Robotic Urbanism. "Rediscovering Urban Space through Interactive, Data Driven Installations"	WIT, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2015	Memos from an Inconvenient Studio - Unsolicited Projects for Responsive Architectures	WIT, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2015	The One Day House - Intelligent Systems for Adaptive Buildings	WIT, A.	ROBOTICS

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2016	Living Architecture Systems Group White Papers 2016	(EMPTY)	ROBOTICS
2016	An environmental perspective on digital fabrication in architecture and construction	AGUSTI, I.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Generative Robotics	AHLQUIST, S.	ROBOTICS
2016	Design Considerations Due to Scale Effects in 3D Concrete Printing	AHMED, Z.	ROBOT
2016	Commentary Regarding Living Architecture Systems	ALAN, M.	ROBOTICS

2016	Accepting the Robotic Other: Why Real Dolls and Spambots Suggest a Near-Future Shift in Architecture's Architecture	ALEXANDER, W.	ROBOTIC, ROBOTICS
2016	Evaluation and Analysis of Experience in Responsive Atmospheric Environments	ANDREAS, S.	ROBOTICS
2016	Emergent Structures Assembled by Large Swarms of Simple Robots	ANDREEN, D.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2016	The Intersection of Art and Technology	ANTONIO, C.	ROBOTICS
2016	Coupling Distinct Paradigms of Deposition-Based Construction for the Production of Co-occupied Boundaries	ASYA, L.	ROBOTICS
2016	Reality is interface: Two motion capture case studies of human-machine collaboration in high-skill domains	BARD, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Towards New Robotic Design Tools: Using Collaborative Robots within the Creative Industry	BRAUMANN, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2016	Robotic Softness: An Adaptive Robotic Fabrication Process for Woven Structures	BRUGNARO, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Design & Living Systems: Selected Works	CAROLE, C.	ROBOTICS
2016	Biomimetic Robotic Construction Process - An approach for adapting mass irregular-shaped natural materials	CHENG, C.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Cultura Maker. Dispositivos, Prótesis Robóticas y Programación Visual en Arquitectura y Diseño para eficiencia energética	CHIARELLA, M.	ROBOTICS
2016	Robotic Production of Individualised Wood Joints	COCKAN, B.	ROBOTIC
2016	Human Experience	COLIN, E.	ROBOTICS

2016	Synthetic Cognition: From Reaction to Interaction	DANA, K.	ROBOTICS
2016	Aesthetic Animism: Digital Poetry's Ontological Implications	DAVID, J.	ROBOTICS
2016	Robotic Fabrication of Non-Standard Material	DEVADASS, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Virtual Design and Curriculum Development	DOUGLAS, M.	ROBOTICS
2016	Calculated Matter - Algorithmic Form-Finding and Robotic Mold-Making	ERDINE, E.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Infrastructure Space and Platforms as Living Architectures: The Importance of Regenerative Design and Innovation for Bioregional Economic Development	ERIC, M.	ROBOTICS
2016	Aesthetics of Decision - Unfolding the design process within a framework of complexity and self-organization	ERIOLO, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Caress of the Gaze: A Gaze Actuated 3D Printed Body Architecture	FARAHI, B.	ROBOTICS
2016	A Multi-Agent System for Facade Design: A design methodology for Design Exploration, Analysis and Simulated Robotic Fabrication	GERBER, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Recent Realizations of Artificial Nature	HARU, J.	ROBOTICS
2016	Using the Phase Space to Design Complexity - Design Methodology for Distributed Control of Architectural Robotic Elements	HEINRICH, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2016	For Time-Continuous Optimisation: Replacing Automation with Interactive Visualisation in Multi-Objective Behavioural Design	HEINRICH, M.	ROBOT

2016	Responsive Systems: Foundations and Application - The importance of defining meta-systems and their methods	HENRIQUES, G.	ROBOTICS
2016	ColorFolds: eSkin + Kirigami - From Cell Contractility to Sensing Materials to Adaptive Foldable Architecture	JENNY, S.	ROBOTICS
2016	Generating an Anamorphic Image on a Curved Surface Utilizing Robotic Fabrication Process	JOVANOVIC, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Visualizing Living Architecture: Augmented Reality, Visualizations of Sensors, Actuators, and Signal Flows	KATY, B.	ROBOTICS
2016	Virtual Landscape Assessment and Robotic Allocation Within Extreme Environments	KHESROH, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2016	Fabricating Semi Predictable Surfaces - A workshop series on digitally fabricating freeform surfaces with aggregates	KIEFERLE, J.	ROBOTS, ROBOTIC
2016	Design optimization and robotic fabrication of tensile mesh structures: The development and simulation of a custom-made end-effector tool	KONTOVOURKIS, O.	ROBOTIC
2016	Optimization Process Towards Robotic Manufacturing in Actual Scale - The Implementation of Genetic Algorithms in the Robotic Construction of Modular Formwork Systems	KONTOVOURKIS, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Human Touch in Digital Fabrication	LOPEZ, D.	ROBOTS
2016	Robotic Forming: Rapidly Generating 3D Forms and Structures through Incremental Forming	LUBLASSER, E.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2016	Promoting Creative and Innovative Thinking in the Classroom: The Role of Living Architecture Systems	LUCINDA, P.	ROBOTICS
2016	Approaching a Smart Materials Literacy	MANUEL, K.	ROBOTICS
2016	Lab in the Building/Building in the Lab?: Pluripotent Matter & Bioinspiration	MARIA, G.	ROBOTICS
2016	Performance, Art, and Cyber-Interoceptive Systems	MARK, H.	ROBOTICS
2016	Building Science: Synthetic Biology and Emerging Technologies in Architectural Research	MARTYN, D.	ROBOTICS
2016	Toolbox Dialogue Initiative	MICHAEL, O.	ROBOTICS
2016	Bees are Sentinels of the Earth	MICHAEL, S.	ROBOTICS
2016	Homeorhetic Assemblies - Turning beehive formation dynamics into high-res tectonics	MONESI, R.	ROBOTICS
2016	RoboSense: Context-Dependent Robotic Design Protocols and Tools	MOONRMAN, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2016	Digital Materialization: Additive and Robotical Manufacturing with Clay and Silicone	NAN, C.	ROBOTS, ROBOTICS
2016	The Media Lab as Space for “Play and Process”: An Interview with TML’s Navid Navab	NAVID, N.	ROBOTICS
2016	Concepts and Methodologies for Multiscale Modeling: A Mesh-Based Approach for Bi-Directional Information Flows	NICHOLAS, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Real-time Responsive Spatial Systems	NIMISH, B.	ROBOTICS
2016	Building Traditions with Digital Research - Reviewing the Brick Architecture of Raúl	OLIVEIRA, R.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION,

	Hestnes Ferreira through Robotic Fabrication		ROBOTIC ASSEMBLY
2016	4DSOUND: A New Approach to Spatial Sound Reproduction and Synthesis	PAUL, O.	ROBOTICS
2016	Dissipative Models: Notes toward Design Method	PHILIP, B.	ROBOTICS
2016	Adaptive Pneumatic Shell Structures - Feedback-driven robotic stiffening of inflated extensible membranes and further rigidification for architectural applications	POINET, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Metabolic Systems	RACHEL, Q.	ROBOTICS
2016	Estruturas Complexas Adaptativas: Modelagem Analógica integrada ? Parametrizaç?o e Comutaç?o Física	REIAL, C.	ROBOTICS
2016	AMA - Additive Merged Appliance	REJEPAVA, A.	ROBOTICS
2016	Discrete Assembly and Digital Materials in Architecture	RETSIN, G.	ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2016	Discrete Computational Methods for Robotic Additive Manufacturing: Combinatorial Toolpaths	RETSIN, G.	ROBOTIC
2016	Field Work in the Thing Site	ROBERT, B.	ROBOTICS
2016	The Environmental Half of Machine Life	RUAIRI, G.	ROBOTICS
2016	Spatial Wire Cutting: Cooperative robotic cutting of non-ruled surface geometries for bespoke building components	RUST, R.	ROBOT, ROBOTIC
2016	"Where I Stand"	SARAH, B.	ROBOTICS
2016	The Value and Use of Laban Movement Analysis in Observation and Generation of Affective Movement	SARAH, J.	ROBOTICS
2016	20,000 Blocks: Can gameplay be used to guide non-expert groups in creating architecture?	SAVOV, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2016	Use of a Low-Cost Humanoid for Tiling as a Study in On-Site Fabrication: Techniques and Methods	SCHWARTZ, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2016	Robotic Sewing: A Textile Approach Towards the Computational Design and Fabrication of Lightweight Timber Shells	SCHWINN, T.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Theater Without Organs: Co-Articulating Gesture and Substrate in Responsive Environments	SHA, W.	ROBOTICS
2016	A Survey of Cable-Suspended Parallel Robots and their Applications in Architecture and Construction	SHAHMIRI, F.	ROBOTS
2016	Becoming Citizen Building	SIDNEY, F.	ROBOTICS
2016	Biomanufacturing	SIMON, P.	ROBOTICS
2016	The CorkCrete Arch Project: The digital design and robotic fabrication of a novel building system made out of cork and glass-fibre reinforced concrete	SOUSA, J.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2016	The Robotic Production of the GRC Panels in the CorkCrete Arch Project - A stratified strategy for the fabrication of customized molds	SOUSA, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Clay Robotics: Tool making and sculpting of clay with a six-axis robot	TAN, R.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2016	The Mission Business	TREVOR, H.	ROBOTICS
2016	Towards Responsiveness in Architecture	VERA, P.	ROBOTICS
2016	Collaborative Construction: Human and Robotic Collaboration Enabling the Fabrication and Assembly of a Filament-Wound Structure	VASEY, L.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC,

			ROBOTIC FABRICATION
2016	Accepting the robotic other: Why real dolls and spambots suggest a near-future shift in architecture's architecture	WEBB, A.	ROBOTS, ROBOTIC
2016	Developing the Termite Plug-In: Abstracting operations to link 5-axis CNC routers with para-metric CAAD tools	WILLIAMS, N.	ROBOT, ROBOTS
2016	rolyPOLY - A Hybrid Prototype for Digital Techniques and Analog Craft in Architecture	WIT, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2016	Composite Systems for Lightweight Architectures: Case studies in large-scale CFRP winding	WIT, A.	ROBOTIC
2016	Highly Informed Robotic 3D Printed Polygon Mesh: A Nobel Strategy of 3D Spatial Printing	YU, L.	ROBOT, ROBOTIC
2016	Robotic Fabrication of Structural Performance-based Timber Gridshell in Large-Scale Building Scenario	YUAN, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2017	Magnetic Morphing	ABDEL, A.	ROBOTICS
2017	ROAMNITURE - Multi-Stable Soft Robotic Structures	ABRAMOVIC, V.	ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2017	PneumaKnit: Actuated Architectures Through Wale- and Course-Wise Tubular Knit-Constrained Pneumatic Systems	AHLQUIST, S.	ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2017	Tradition and Innovation in Digital Architecture - Reviewing the Serpentine Gallery Pavilion 2005	ALMEIDA, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2017	Igneous Tectonics: Turning disaster into resource through digital fabrication	ARAYA, S.	ROBOTIC
2017	Adaptive Robotic Training Methods for Subtractive Manufacturing	BRUGNARO, G.	ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Assisted automation: Three learning experiences in architectural robotics	CARDOSO, D.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2017	By Any Means Necessary: Digitally Fabricating Architecture at Scale	COLEMAN, J.	ROBOTICS
2017	Fabricating Stereotomy - Variable moulds for cast voussoirs	DE, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Soft Human Computer Interfaces - Towards Soft Robotics in Architecture	DECKER, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2017	Ontological Instrumentation in Architecture - A Collection of Prototypes Engaging Bodies and Machines from the Inside Out	DICKEY, R.	ROBOTS
2017	Soft Computing in Design: Developing Automation Strategies from Material Indeterminacies	DICKEY, R.	ROBOTICS
2017	Soft Systems - Rethinking Indeterminacy in Architecture as Opportunity Driven Research	DICKEY, R.	ROBOTICS
2017	Robot-Aided Fabrication of Interwoven Reinforced Concrete Structures	ERDINE, E.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2017	Multi-Machine Fabrication: An Integrative Design Process Utilising an Autonomous UAV and Industrial Robots for the	FELBRICH, B.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS

	Fabrication of Long-Span Composite Structures		
2017	Freezing the Field: Robotic Extrusion Techniques Using Magnetic Fields	GOLDMAN, M.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2017	Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno en madera	GONZALEZ, L.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Fabricating Without CAD Models - Experiments with G-code and KUKA KRL	HUA, H.	ROBOTS
2017	Robotic Landscapes: Developing Computational Design Tools Towards Autonomous Terrain Modeling	HURKXKENS, I.	ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Robotic Spatial Printing	JIMENEZ, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Case Specific Robotic Fabrication of Foam Shell Structures	JOVANOVIC, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Computation As Design Logic Indicator - The Expo Project Experiment	KEPCZYNSKA, A.	ROBOTICS
2017	Multi-objective design optimization and robotic fabrication towards sustainable construction - The example of a timber structure in actual scale	KONTOVOURKIS, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Elements   robotic interventions II	LANGE, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2017	Robotic Simulation of Textile as Concrete Reinforcement and Formwork	LU, X.	ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Plato's Columns: Platonic Geometries vs. Vague Gestures in Robotic Construction	MANNINGER, S.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Towards Force-aware Robot Collectives for On-site Construction	MELENBRIK, N.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC ASSEMBLY
2017	Non-Linear Matters: Auxetic Surfaces	MESA, O.	ROBOTIC
2017	Investigations in robotic-assisted design: Strategies for symbiotic agencies in material-directed generative design processes	NAHMAD, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	A Robotic Fabrication Methodology for Dovetail and Finger Jointing: An Accessible & Bespoke Digital Fabrication Process for Robotically-Milled Dovetail & Finger Joints	PAGE, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2017	Emergent order through swarm fluctuations - A framework for exploring self-organizing structures using swarm robotics	PANTAZIS, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Performative Materiality - A DrawBot for Materializing Kinetic Human-Machine Interaction in Architectural Space	PERALTA, M.	ROBOTIC
2017	MoleMOD - On Design specification and applications of a self-reconfigurable constructional robotic system	PETRS, J.	ROBOT, ROBOTIC
2017	Fibrous Aerial Robotics - Study of spiderweb strategies for the design of	PIETRI, S.	ROBOTICS

	architectural envelopes using swarms of drones and inflatable formworks		
2017	Tangible Computing - Manufacturing of Intertwined Logics	QUARTARA, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Randomness in Robotically Fabricated Micro-Acoustic Patterns	REINHARDT, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	A Mathematical Model Linking Form and Material for Sound Scattering: Design, Robotic Fabrication and Evaluation of Sound Scattering Discs: Relating Surface Form to Acoustic Performance	REINHARDT, D.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2017	Clay Non-Wovens: Robotic Fabrication and Digital Ceramics	ROSENWASSER, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Collaborative Assembly of Digital Materials	ROSSI, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Geometry as Assembly - Integrating design and fabrication with discrete modular units	ROSSI, A.	ROBOT, ROBOTIC FABRICATION, ROBOTIC ASSEMBLY
2017	Robotic Formwork in the MARS Pavilion: Towards The Creation Of Programmable Matter	SARAFIAN, J.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2017	Efficacy of Localization Through Magnets Embedded in Infrastructure	SCHWARTZ, M.	ROBOTICS
2017	The Effect of Building Materials on LIDAR Measurements	SCHWARTZ, M.	ROBOTICS
2017	Adaptive Industrial Robot Control for Designers	SHARIF, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC,

			ROBOTIC FABRICATION
2017	A Generalized Approach to Non-Layered Fused Filament Fabrication	SOLER, V.	ROBOT, ROBOTICS
2017	Machinic Agency - Implementing aerial robotics and machine learning to map public space	SOLLAZZO, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Developing Composite Wood for 3D-Printing	TAN, R.	ROBOTICS
2017	ROBOTRACK - Linking manual and robotic design processes by motion-tracking	WEISSENBOCK, R.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2017	Form-finding with Robotics - Fusing Physical Simulation and Digital Fabrication	XIA, T.	ROBOTIC, ROBOTICS
2017	Robotic Variable Fabric Formwork	YANG, X.	ROBOTIC
2017	Open Source Factory: Democratizing Large-Scale Fabrication Systems	ZIVKOVIC, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2018	Design of Robotically Fabricated Timber Frame Structures	ADEL, A.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2018	Catoptric Surface	AHRENS, C.	ROBOTICS
2018	Ceramic Components - Computational Design for Bespoke Robotic 3D Printing on Curved Support	ANTON, A.	ROBOTIC

2018	ACADIA 2018: Re/Calibration: On Imprecision and Infidelity	ANZALONE, P.	ROBOTICS
2018	Fabrication-Aware Design of Concrete Façade Panels. A Computational Method For Evaluating the Fabrication of Large-Scale Molds in Complex Geometries	AUSTERN, G.	ROBOTICS
2018	Re-flex: Responsive Flexible Mold for Computer Aided Intuitive Design and Materialization	AUT, S.	ROBOTICS
2018	In Place Detailing. Combining 3D printing and robotic assembly	ARIZA, I.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC ASSEMBLY
2018	Robosense 2.0. Robotic sensing and architectural ceramic fabrication	BILOTTI, J.	ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Towards a Digitally Fabricated Disassemble-able Building System - A CNC fabricated T-Slot Joint	BRANDAO, F.	ROBOTIC
2018	FOAM - Custom Single Task Construction Robot	CHEANG, J.	ROBOT
2018	Locally Differentiated Concrete by Digitally Controlled Injection	CHEE, R.	ROBOTIC, ROBOTICS
2018	The fabrication and application of parametric inflatable structure	CHIA, H.	ROBOTIC
2018	Cyclopean Cannibalism. A method for recycling rubble	CLIFFORD, B.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	Inflatable Architecture Production with Cable-Driven Robots	CROLLA, K.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2018	Artificial Intelligence Aided Architectural Design	CUDZIK, J.	ROBOTICS

2018	Reinforced, Reusable, Reconfigurable Molds for Cast Voussoirs	DE, P.	ROBOTIC
2018	Digital provenance and material metadata: Attribution and co-authorship in the age of artificial intelligence	DOYLE, S.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Cyborg Sessions - A Case Study for Gender Equity in Technology	DOYLE, S.	ROBOTICS
2018	Design and Automation for Seniors - Robot aided design of an environment for the elderly and disabled.	D'BROWSKA, K.	ROBOT, ROBOTIC
2018	Lucid Foam - Multi-Axis Robotic Hot-Wire Cutting for Translucency	FEREOS, P.	ROBOTS, ROBOTIC
2018	Thermal Compositions Through Robot Based Thermal Mass Distribution	FOGED, I.	ROBOT
2018	Full Integration: Closing the Gap on Technology Readiness	FOX, M.	ROBOTIC
2018	Architecture Challenge 16 - Robotic Contouring - Researching Robotic Bending of Straight Profile Plastic Beams for Full Scale Production	GHEORGHE, A.	ROBOTIC,ROBOTIC FABRICATION
2018	Robotic Connections: Customisable Joints for Timber Construction	HEESTERMANN, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Structural Optimisation for 3D Printing Bespoke Geometries	HOUDA, M.	ROBOTIC
2018	Interfaces for Adaptive Assembly	JOHNS, R.	ROBOTIC
2018	Designing for Digital Assembly with a Construction Team of Mobile Robots	KALANTARI, S.	ROBOT, ROBOTS
2018	Mathematical Design and Challenges in the Materialisation of a Free-From Shell	KHABAZI, Z.	ROBOTIC
2018	Prototyping a Human-Building Interface with Multiple Mobile Robots	KHOO, C.	ROBOTS, ROBOTIC
2018	Pneumatically Actuated Material. Exploration of the morphospace of an adaptable system of soft actuators	KIEFFER, L.	ROBOTIC

2018	The Flexing Room Architectural Robot. An Actuated Active-Bending Robotic Structure using Human Feedback	KILIAN, A.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Metaphor - A tool for designing the next generation of human-building interaction	KIM, J.	ROBOT
2018	Engineering Design Tropisms. Utilization of a bamboo-resin joint for voxelized network geometries	KLEMMET, C.	ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Design-static analysis and environmental assessment investigation based on a kinetic formwork-driven by digital fabrication principles	KONTOVOURKIS, O.	ROBOTIC
2018	An integrated robotically-driven workflow for the development of elastic tensile structures in various scales	KONTOVOURKIS, O.	ROBOTIC
2018	Integrative Fabrication of Sandwich Shells. An integrative approach to design of robotically fabricated wood- based sandwich segmented shells	LARA, P.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2018	Body-Borne Assistive Robots for Human-Dependent Precision Construction - The Compensation of Human Imprecision in Navigating 3-Dimensional Space with a Stand-Alone, Adaptive Robotic System	LEE, A.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Applied Automatic Machine Learning Process for Material Computation	LUO, D.	ROBOTIC
2018	Robotic Automatic Generation of Performance Model for Non-Uniform Linear Material via Deep Learning	LUO, D.	ROBOTIC
2018	Buoyant Ecologies Float Lab. Optimized upside-down benthos for sea level rise adaptation	MARCUS, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2018	Robotic Materialization of Architectural Hybridity - Modelling, Computation and Robotic Production of Multi-materiality	MOSTAFAVI, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	Subtractive digital fabrication with actual robot and virtual material using a MARI platform	POUSTINCH, E.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Onsite Robotic Fabrication for Flexible Workspaces - Towards Design and Robotic Fabrication of an Integrated Responsive Ceiling System for A Workspace Environment	REINHARDT, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	On-Site Fabrication and Assembly for Arid Region Settlements	RON, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION, ROBOTIC ASSEMBLY
2018	Modelling A Complex Fabrication System - New design tools for doubly curved metal surfaces fabricated using the English Wheel	ROSSI, G.	ROBOT,
2018	Re/Learning the Wheel. Methods to Utilize Neural Networks as Design Tools for Doubly Curved Metal Surfaces	ROSSI, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	Adaptive Control System for Smart Dynamic Casting - Defining Fabrication-Informed Design Tools and Process Parameters in Digital Fabrication Processes	SCOTTO, F.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	Ceramic Morphologies. Precision and control in paste-based additive manufacturing	SEIBOLD, Z.	ROBOTICS
2018	A Robotically Fabricated Connection System as a Possible Solution for a Free-form "ROBO-WEB" Gridshell which Takes	SHAH, A.	ROBOTICS

	Inspirations from English Fan Vaulted Cathedrals		
2018	Research pavilions: contributions to the advancement of digital technologies, tectonics and materials in architecture	SILVA, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	Machine learning for architectural design: Practices and infrastructure	TAMKE, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2018	Robotic Fabrication of Lightweight Surface Assemblies - By Parametric Delamination of Polyurethane-Fabric Components	TEH, P.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2018	Topologically Optimized and Functionally Graded Cable Nets. New approaches through robotic additive manufacturing	TISH, D.	ROBOTIC
2018	Bring in the Noise - A robotic-aided framework for the indirect shape translation and molding of inexact geometries.	VAZQUEZ, E.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Computing Craft - Early stage development of a robotically-supported 3D printing system for cob structures	VELIZ, A.	ROBOTICS
2018	Robotic Methods in Acoustics - Analysis and Fabrication Processes of Sound Scattering Acoustic Panels	WALKER, J.	ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Artificial intelligence and robotics in architecture: Autonomy, agency, and indeterminacy	WIT, A.	ROBOTICS
2018	Robotic Equilibrium: Scaffold Free Arch Assemblies	WU, K.	ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Digital Form-Finding and Fabrication of Strained Gridshells with Complex Geometries	YUAN, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2018	Multi-dimensional Medium-printing - Prototyping Robotic Thermal Devices for Sculpting Airflow	ZHANG, C.	ROBOTIC, ROBOTICS
2018	Rough Pass Extrusion Tooling. CNC post-processing of 3D-printed sub-additive concrete lattice structures	ZIVKOVIC, S.	ROBOTICS

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2019	Controlling Daylight Reflectance with Cyber-physical Systems	AHRENS, C.	ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Automated Brick Pattern Generator for Robotic Assembly using Machine Learning and Images	ANDRADE, B.	ROBOTS, ROBOTIC
2019	Living Architecture Systems Group Symposium 2019 Proceedings	BEESELEY, P.	ROBOTICS
2019	Informing Grounds	BAR-SINAI, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Pop Up Factory : Collaborative Design in Mixed Reality - Interactive live installation for the makeCity festival, 2018 Berlin	BETTI, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Simplifying Doubly Curved Concrete - Post-Digital Expansion of Concrete's Construction Solution Space	CHAN, Z.	ROBOTIC
2019	Innovative Design Approach to Optimized Performance on Large-Scale Robotic 3D-Printed Spatial Structure	CHEN, Z.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Robotic Glass Crafting by Dip Forming	CHENG, C.	ROBOTIC
2019	User-centered Responsive Sunlight Reorientation System based on Multiagent Decision-making, UDaMaS	COCHO, A.	ROBOTS
2019	Design Method Aided by MABS and Cloud Computing - Framework	DA, T.	ROBOTIC,ROBOTIC FABRICATION

	integrating: construction techniques, materials, and fabrication		
2019	Cyber-physical UAV Navigation and Operation	DACKIW, J.	ROBOT, ROBOTICS
2019	Robot Assisted Assembly of Steel Structures - Optimization and Automation of Plasma Cutting and Assembly	DAI, R.	ROBOT, ROBOTIC
2019	Collaborative Robotic Masonry and Early Stage Fatigue Prediction	DAS, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Robotic Constraints Informed Design Process	DEVADASS, P.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2019	Soft Additive Fabrication Processes: Material Indeterminacy in 3D Printing	DICKEY, R.	ROBOTICS
2019	Tailored Flexibility - Reinforcing concrete fabric formwork with 3D printed plastics	ENGHOLT, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Robot-Aided Fabrication of Materially Efficient Complex Concrete Assemblies	ERDINE, E.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Robot-Aided Fabrication of Light-Weight Structures with Sheet Metal Expansion	ERDINE, E.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Collaborative Crafting of Interlocking Structures in Stereotomic Practice	FERNANDO, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Automation Complexity - Brick By Brick	FINGRUT, A.	ROBOT, ROBOTIC
2019	Triangulated Shell Foam Structures based on Robotic Hot-Wire-Cutting - A design, geometry rationalisation and fabrication workflow	FISCHER, T.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Robot Ex Machina	GARCIA, J.	ROBOT, ROBOTIC

2019	Cyber-Physical Emotive Spaces: Human Cyborg, Data, and Biofeedback Emotive Interaction with Compassionate Spaces	GHANDI, M.	ROBOTIC
2019	Hybrid Environmental-Media Facade - Full-Scale Prototype Panel Fabrication	GLOBA, A.	ROBOTICS
2019	A Framework for a Five-Axis Stylus for Design Fabrication	GOZEN, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2019	Starting hypothesis - A proposed biological-artificial mutualism	GRANERO, A.	ROBOT, ROBOTICS
2019	Adaptive Modular Spatial Structures for Shotcrete 3D Printing	HACK, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Augmented Craftsmanship	HAHM, S.	ROBOTICS
2019	Deep Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Tensegrity (ART)	HOSMER, T.	ROBOTIC
2019	[BENT]	JAHN, G.	ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Design Guidelines for Zero Waste Manufacturing of Freeform EPS Facades	JOVANOVIC, M.	ROBOTIC
2019	PixelGreen - A hybrid green media wall for existing high-rise buildings	KHOO, C.	ROBOTICS
2019	Adaptable and Programmable Formwork for Doubly Curved Concrete Surfaces	KIEFFER, L.	ROBOTS, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2019	The design and implementation of a large-scale 3D Printing system with tensegrity and cable-suspended parallel robotic system	KIM, H.	ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Thermochromic Articulations	KOERNER, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Robotic Free-Oriented Additive Manufacturing Technique for Thermoplastic Lattice and Cellular Structures	LADRON, M.	ROBOTIC
2019	Exploring Natural Wood	LARSEN, N.	ROBOTIC

2019	Do Robots Dream of Digital Sleep?	LEACH, N.	TOBOTS
2019	Distributed Robotic Timber Construction	LEDER, S.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2019	Robotic Fabrication of Doubly Curved Façade System - Constructing intelligence in the digital fabrication workflow	LOH, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Self-Choreographing Network	MAIERHOFER, M.	ROBOT, ROBOTIC
2019	RETHINKING THE PHILIPS PAVILION THROUGH ROBOTIC HOT WIRE CUTTING. - An experimental prototype	MARTINS, P.	ROBOTIC
2019	CREASE - Synchronized Gait Through Folded Geometry.	MESA, O.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2019	Stressed Skin Wood Surface Structure	MEYBOOM, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Soil 3D Printing	MITTERBERGER, D.	ROBOTIC
2019	A computational framework for the design and robotic manufacturing of complex wood structures	NABONI, R.	ROBOTS, ROBOTIC
2019	Fabrication of Ultra-Lightweight Parametric Glass Fiber Reinforced Shell Assemblies	NG, H.	ROBOTIC
2019	Soft Kinetics; Integrating Soft Robotics into Architectural Assemblies	PARLAC, V.	ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2019	Tornado Pavilion - Simplicity, almost nothing, but human expanded abilities	PASSARO, A.	ROBOTS
2019	From MoleMOD to MoleSTRING - Design of self-assembly structures actuated by shareable soft robots	PETRS, J.	ROBOTS, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2019	Oriole Beta - A Parametric Solution for Robotic Motion Design Using Animation	POUSTINCHI, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS

2019	Oriole A Parametric Solution for Animation-Based Robotic Motion Design	POUSTINCHI, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Oriole - A Parametric Solution for Robotic Videography	POUSTINCHI, E.	ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Robotically Augmented Imaging (RAI Alpha)	POUSTINCHI, E.	ROBOTIC
2019	Complex Modelling; Questioning the Infrastructures of Information Modelling	RAMSGAARD, M.	ROBOTICS
2019	CoBuilt - Towards a novel methodology for workflow capture and analysis of carpentry tasks for human-robot collaboration	REINHARDT, D.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Design Robotics - Towards human-robot timber module assembly	REINHARDT, D.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Haptic Learning - Towards Neural-Network-based adaptive Cobot Path-Planning for unstructured spaces	ROSSI, G.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Foam Making Sense - behavioral additive deposition and stigmergic agency for integrated surface tectonics	SALSI, M.	ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Airforming - Adaptive Robotic Molding of Freeform Surfaces through Incremental Heat and Variable Pressure	SCHUMANN, K.	ROBOTIC
2019	Spatial Glass Bonds - Computation and fabrication system of complex glass structure	SHENG, Y.	ROBOTIC,ROBOTIC FABRICATION
2019	Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution, Volume 1	SOUSA, J.	ROBOTICS
2019	Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution, Volume 2	SOUSA, J.	ROBOTICS
2019	Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution, Volume 3	SOUSA, J.	ROBOTICS

2019	Revisiting Folded Forms with Digital Fabrication	SZABO, A.	ROBOTIC
2019	Robotic AeroCrete - A novel robotic spraying and surface treatment technology for the production of slender reinforced concrete elements	TAHA, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Additive Casting of Mass-Customizable Bricks	TESSMER, L.	ROBOTIC
2019	Meeting in the middle: Hybrid clay three-dimensional fabrication processes for bio-reef structures	TRILSBECK, M.	ROBOTIC
2019	InFoamed Matter - Robotic production and assembly of foam-injected structures	TSIKOLIYA, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Surrealist Aesthetics in Second-Order, Cybernetic Architecture	VIVALDI, J.	ROBOTICS
2019	Autonomous Architectural Operations	VRCRUYSE, E.	ROBOTIC
2019	Optimization of Clay Mould for Concrete Casting Using Design of Experiments	WANG, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Design, Analysis and Robotic Fabrication of a Bending-Active Shell Structure with Thin Sheets Based on Curved-Crease-Folding Technique	WANG, X.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	RAF: Robot Aware Fabrication - Hand-motion Augmented Robotic Fabrication Workflow and Case Study	WEI, L.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2019	Interactive Structure - Robotic Repositioning of Vertical Elements in Man-Machine Collaborative Assembly through Vision-Based Tactile Sensing	WIBRANEK, B.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Interactive Assemblies: Man-Machine Collaborations for a Material-Based Modeling Environment	WIBRANEK, B.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS

2019	Automatic Brick Masonry System and Its Application in On-site Construction	XU, W.	ROBOT, ROBOTIC
2019	Artistic computational design featuring imprecision - A method supporting digital and physical explorations of esthetic features in robotic single-point incremental forming of polymer sheets	ZBOINSKA, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2019	Exploration of Computational Design and Robotic Fabrication with Wire-Arc Additive Manufacturing Techniques	ZHOU, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2020	Developing a fabrication workflow for irregular sawlogs	AAGAARD, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Methodology of Implementing Transformative Bioactive Hybrids in Built Environment to Achieve Sustainability	ABDALLAH, Y.	ROBOTIC
2020	On-Site BIM-Enabled Augmented Reality for Construction	ADAM, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Additive Thermoplastic Formwork for Freeform Concrete Columns	AGHAEI, M.	ROBOTIC
2020	Collection to Creation: Playfully Interpreting the Classics with Contemporary Tools	ANA, H.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Embodied Learning through Fabrication Aware Design	ANDRADE, B.	ROBOTIC
2020	Machinic Phylum and Architecture	ANDREJ, R.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	What About Humans? Artificial Intelligence in Architecture	ANTOINE, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	BIM-modeling and programming of curved concrete walls for 3D-printed construction	ARBOLEDA, J.	ROBOTIC
2020	Prototype As Artefact	ATANASOVA, L.	ROBOT
2020	Sensibility at Large - A Post-Anthropocene Vision for Architectural Landscape Editing	BAR-SINAI, K.	ROBOTICS, ROBOTICS
2020	DE:Stress Pavilion	BATTAGLIA, C.	ROBOTICS
2020	Interlocking Shell	BORHANI, A.	ROBOT, ROBOTIC
2020	Advancing Reed-Based Architecture through Circular Digital Fabrication	BOUZA, H.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC ASSEMBLY
2020	A framework for interactive human-robot design exploration	BRATH, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2020	FORM{less}	BRUCE, M.	ROBOTIC, ROBOTICS
2020	Recycling Construction Waste Material with the Use of AR	CAITLYN, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	CAM as a Tool for Creative Expression - Informing Digital Fabrication through Human Interaction	CAPUNAMAN, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Robotic Apprentices: Leveraging Augmented Reality for Robot Training in Manufacturing Automation	COSTA, E.	ROBOT, ROBOTS
2020	Space Filling Curves for Optimising Single Point Incremental Sheet Forming using Supervised Learning Algorithms	CHADHA, K.	ROBOTIC
2020	Connecting Timber Sheet Materials to Create a Self-Supporting Structure using Robotic Fabrication and Computational Tools	CHENG, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Developing a Digital Interactive Fabrication Process in Co-existing Environment	CHUAN, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	Pipes of AI – Machine Learning Assisted 3D Modeling Design	CHUAN, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Robotic Apprentices: Leveraging Augmented Reality for Robot Training in Manufacturing Automation	COSTA, E.	ROBOTIC
2020	Automating Concrete Construction: Sustainable social housing in Colombia	COSTA, E.	ROBOTIC
2020	Engrained Performance	CRANEY, R.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Robotown	DA, K.	ROBOTICS
2020	CoBuilt 4.0: Investigating the potential of collaborative robotics for subject matter experts	DAGMAR, R.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	A Generative Material System of Clay Components-The Porosity Language	DAN, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Real-Time Defect Recognition and Optimized Decision Making for Structural Timber Jointing	DAN, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Designing with a Robot - Interactive methods for brick wall design using computer vision	DAS, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Artificial Intuitions of Generative Design: An Approach Based on Reinforcement Learning	DASONG, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Bioinspired Generative Architectural Design Form-Finding and Advanced Robotic Fabrication Based on Structural Performance	DING, X.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Melting 2.0	DOYLE, S.	ROBOTIC
2020	A Case for Lace	ELBERFLED, N.	ROBOTIC
2020	Towards a Distributed, Robotically Assisted Construction Framework	FANG, Z.	ROBOTS, ROBOTICS

2020	Impact of Robotic 3D Printing Process Parameters on Bond Strength	FARAHBAKHS, M.	ROBOTIC
2020	Can the subaltern speak?	FARAH, B.	ROBOTIC, ROBOTICS
2020	Robotic Sketching: A Study on Robotic Clay 3D Printing	FARROKHSIAR, P.	ROBOTIC
2020	Integrating Design Studio Teaching with Computation and Robotics in Hong Kong	FINGRUT, A.	ROBOTICS
2020	Design Process for a Soft Flexible Palm - Improving grasp strength in an anthropomorphic end effector for collaborative robots in construction	FIRTH, C.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2020	Development of an Anthropomorphic End-effector for Collaborative use on Construction Sites	FIRTH, C.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2020	Methods for the Prediction and Specification of Functionally Graded Multi-Grain Responsive Timber Composites	FRAGKIA, V.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	SISCOM: Cooperative Multi-Robot Systems in Construction	GONZALEZ, L.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2020	Cyborgian Approach of Eco-interaction Design Based on Machine Intelligence and Embodied Experience	GUYI, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Super Composite: Carbon Fibre Infused 3D Printed Tectonics	H, MOHAMED.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Machine Learning Aided 2D-3D Architectural Form Finding at High Resolution	HANG, Z.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Form Finding and Evaluating Through Machine Learning: The Prediction of Personal Design Preference in Polyhedral Structures	HAO, Z.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	Advanced Timber Construction Platform Multi-Robot System for Timber Structure Design and Prefabrication	HUA, L.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	Technologies and Techniques for Collaborative Robotics in Architecture - - establishing a framework for human-robotic design exploration	JENSEN, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	A Large-Scale Measurement and Quantitative Analysis Method of Façade Color in the Urban Street Using Deep Learning	JIAXIN, Z.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Research on Architectural Form Optimization Method Based on Environmental Performance-Driven Design	JINGHUA, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Optimization and Prediction of Design Variables Driven by Building Energy Performance—A Case Study of Office Building in Wuhan	JINGYI, L.	ROBOTIC
2020	Robotic Connections for CLT Panels	JOYCE, G.	ROBOTIC, ROBOTICS
2020	Robotic Sand Carving - Machining Techniques Derived from a Traditional Balinese Craft	KALO, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	The Bio-inspired Design of a Self-propelling Robot Driven by Changes in Humidity	KAY, R.	ROBOT, ROBOTIC
2020	The Flexing Room	KILLIAN, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2020	Parametric Photo V-Carve for Variable Surfaces	KIM, N.	ROBOTIC
2020	Robotic Fabrication with Bioplastic Materials - Digital design and robotic production of biodegradable objects	KRETZER, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	Multi-resolution in architecture as a design driver for additive manufacturing applications	LADRON, M.	ROBOTIC
2020	Reformative Coral Habitats - Rethinking Artificial Reef structures through a robotic 3D clay printing method.	LANGE, C.	ROBOTIC
2020	Reformative Coral Habitats	LANGE, C.	ROBOTIC
2020	Digital Workflows for Natural Wood in Constructions	LARSEN, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Voxelcrete - Distributed voxelized adaptive formwork	LEDER, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	De gradus - Programming heterogeneous performance of functionally graded bio-polymers for degradable agricultural shading structures.	LESNA, J.	ROBOTIC
2020	Formica Forma	LING, A.	ROBOT
2020	Ashen Cabin	LOK, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	A New Algorithm to Get Optimized Target Plane on 6-Axis Robot For Fabrication	LU, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Transient Materialization “ Robotic Metal Curving	LU, Y.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Sensing the Environmental Neighborhoods Mobile Urban Sensing Technologies (MUST) for High Spatial Resolution Urban Environmental Mapping	MAIDER, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Material Disruption	MARY, S.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION

2020	CREASE: Synchronous gait by minimizing actuation through folded geometry	MESA, O.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2020	Towards machine learning for architectural fabrication in the age of industry 4.0	METTE, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Toward a Collaborative Robotic Platform: FUROBOT	MING, W.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Digital soil: Robotically 3D-printed granular bio-composites	MITTERBERGER, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Design Computation to Robotic Production Methods for Reciprocal Tessellation of Free-from Timber Structures - Design, production, and assembly of 100 years Bauhaus wood Pavilion	MOSTAFAVI, S.	ROBOTIC
2020	Understanding and Analyzing the Characteristics of the Third Place in Urban Design: A Methodology for Discrete and Continuous Data in Environmental Design	NAMJU, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Completions	NORELL, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Robotic Swarms in Architectural Design - A communication platform bridging design analysis and robotic construction	NTZOUFRAS, S.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	The Emoting City - Designing feeling and artificial empathy in mediated environments	PATEL, S.	ROBOTICS
2020	An Architecture for Cyborg Super-Society	PATRICK, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	Freeform Volumetric Fabrication Using Actuated Robotic Hot Wire Cutter	PAUL, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Integrating real-time multi-resolution scanning and machine learning for Conformal Robotic 3D Printing in Architecture	PAUL, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Augmented drawn construction symbols: A method for ad hoc robotic fabrication	PEDERSEN, J.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	Sustainable Sonic Environments - The Robotic Fabrication of Mass Timber Acoustic Surfaces	PETERS, B.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Growing Shapes with a Generalised Model from Neural Correlates of Visual Discrimination	PIERRE, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Ro-Puzzle - A robotic proposal for moving architecture	POUSTINCHI, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2020	Physical Interface for Robotic Marionette Camera (RMC): Hardware Controlling Platform for Robotic Videography Motion Design	POUSTINCHI, E.	ROBOTIC, ROBOTICS
2020	Computational Design of Fiber Composite Tower Structures	PRADO, M.	ROBOTIC
2020	Pulse V2	PUCKETT, N.	ROBOTS
2020	Adaptable Tool-Path Planning Method for 3D Concrete Printing Based on the Mapping Method	QIAN, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Workflow for a Timber Joinery Robotics	QUINTRAL, F.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	Casa Covida	RAEL, R.	ROBOTIC
2020	Silica - A circular material paradigm by 3D printing recycled glass	RAMSGAARD, M.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	SoRo Responsive Wall - Soft robotics for human-oriented architecture	REZAEICHERATI, A.	ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2020	Design-to-Manufacture Workflows of Sound-Scattering Acoustic Brick Walls	ROSSI, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Suggestive Site Planning with Conditional GAN and Urban GIS Data	RUNJIA, T.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Bio-mimetic design for architecture built by 3D robotic printing	SALINAS, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2020	Traditional Knowledge on Modern Milling Robots - How CNC-joinery machines promote a renaissance to lost techniques in the profession of a carpenter.	SCHWARZMANN, W.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Autonomous in Craft - Embedding Human Sensibility in Architectural Robotic Fabrication	SHAKED, T.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2020	Large Format FDM Printing of Recycled Plastic Pellets: Closing Consumer Cycles in the fabrication of meso scale objects	SHIORDIA, R.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	ACADIA 2020: Distributed Proximities	SLOCUM, B.	ROBOTICS
2020	ELAbot	SOANA, V.	ROBOTIC
2020	ArchiGAN: Artificial Intelligence x Architecture	STANISLAS, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Topological and Material Formation	STUART, R.	ROBOT
2020	PICA - A Designer Oriented Low-Cost Personal Robotic Fabrication Platform for Sketch Level Prototyping	TENG, T.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Robotic Adaptations for Building Works; assembly of concrete blocks "stay-in-place" with robots	ULLOA, P.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2020	Stereoform Slab	VANSICE, K.	ROBOTIC, ROBOTICS

2020	Digital Architextiles - Nonwoven textile thermoforming in robotic fabrication	WANG, J.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Digital Planting - Fabrication of Integrated Concrete Green Wall via Additive Manufacturing	WANG, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Detailing the Configuration to Perform Better Clay Printing	WANG, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Sequential Modular Assembly - Robotic Assembly of Cantilevering Structures through Differentiated Load Modules	WIBRANEK, B.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC ASSEMBLY
2020	From Concept to Construction	XI, I.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Spatial Timber Assembly - Robotically Fabricated Reciprocal Frame Wall	XIAN, Z.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	3d-Printed Bending-Active Formwork for Shell Structures	XIANG, K.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Robotic Fabrication of Sustainable Hybrid Formwork with Clay and Foam for Concrete Casting	XU, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	The Development of 'Agent-Based Parametric Semiology' as Design Research Program	XUEXIN, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Designing [with] Machines	YABLONINA, M.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION, ROBOTIC ASSEMBLY
2020	Exploration of Campus Layout Based on Generative Adversarial Network Discussing the Significance of Small Amount Sample Learning for Architecture	YUBO, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2020	Working with Uncertainties: An Adaptive Fabrication Workflow for Bamboo Structures	YUE, R.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Machine Learning for Fabrication of Graded Knitted Membranes	YULIYA, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	A Preliminary Study on the Formation of the General Layouts on the Northern Neighborhood Community Based on GauGAN Diversity Output Generator	YUZHE, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Source Material Oriented Computational Design and Robotic Construction	ZHANG, Y.	ROBOT, ROBOTIC
2020	Application of Robotic Technologies for the Fabrication Of Traditional Chinese Timber Joints	ZHAO, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	A Performance-Based Urban Block Generative Design Using Deep Reinforcement Learning and Computer Vision	ZHEN, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	embedGAN: A Method to Embed Images in GAN Latent Space	ZHIJIA, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2020	Log Knot	ZIVKOVIC, S.	ROBOTIC

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2021	ASCAAD 2021: Architecture in the Age of Disruptive Technologies - Transformation and Challenges	ABDELMOHSEN, S.	ROBOTICS
2021	Robotic Timber Construction	ADEL, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2021	Assessing the Effectivity of Additive Manufacturing Techniques for the Production of Building Components: Implementing Innovation for Housing Construction in Saudi Arabia	ALABBASI, M,	ROBOTIC
2021	Developing a Design Framework for the 3D Printing Production of Concrete Building Components: A Case Study on Column Optimization for Efficient Housing Solutions in Saudi Arabia	ALABBASI, M,	ROBOTIC
2021	Bio-Design Intelligence	ANA, Z.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Measuring Human Perception of Biophilically-Driven Design with Facial Micro-expressions Analysis and EEG Biosensor	ANDREA, E.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Performance-Driven Design of a Reciprocal Frame Canopy - Timber structure of the FutureTree	APOLINARSKA, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Parametric design and multirobotic fabrication of wood facades	AUGUSTYNOWICZ, E.	ROBOT, ROBOTIC
2021	Joint Descriptive Modeling (JDM) for Assembly-Aware Timber Structure Design	AYOUB, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Drawing-to-Factory Process - Using freehand drawing to drive robotic assembly of brick walls	AZAMBUJA, P.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2021	Process and Evaluation of Automated Robotic Fabrication System for In-Situ Structure Confinement	BALA, K.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2021	Robotic 3D Printing of Mineral Foam for a Lightweight Composite Facade Shading Panel	BEDARF, P.	ROBOTIC
2021	Toolpath Simulation, Design and Manipulation in Robotic 3D Concrete Printing	BRESEGHELLO, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Cocoon: 3D Printed Clay Formwork for Concrete Casting	BRUCE, M.	ROBOTIC
2021	Material-informed Formwork Geometry - The effects of cross-sectional variation and patterns on the strength of 3D printed eggshell formworks	BURGER, J.	ROBOTIC
2021	Object Recognition and User Interface Design for Vision-based Autonomous Robotic Grasping Point Determination	CHENG, F.	ROBOT, ROBOTIC
2021	Object Recognition and User Interface Design for Vision-based Autonomous Robotic Grasping Point Determination	CHENGYU, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	From Visual Behavior to Signage Design: A Wayfinding Experiment with Eye-Tracking in Satellite Terminal of PVG Airport	DAMBROSIO, N.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Towards Hallucinating Machines - Designing with Computational Vision	DEL, M.	ROBOT
2021	Towards Self-shaping Metamaterial Shells: A Computational Design Workflow for Hybrid Additive Manufacturing of Architectural Scale Double-Curved Structures	E, O.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Reuse of Ceramic Roof Tiles: Enhancing New Functional Design Possibilities Through the Integration of Digital Tools for Simulation, Manufacture and Assembly	ESCALEIRA, C.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION

2021	Di-terial – Matching Digital Fabrication and Natural Grown Resources for the Development of Resource Efficient Structures	FELIX, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Custom-Fit and Lightweight Optimization Design of Exoskeletons Using Parametric Conformal Lattice	FUYUAN, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	A Study of Bio-Computational Design in Terms of Enhancing Water Absorption by Method of Bionics Within the Architectural Fields	GANG, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	4D Soft Material Systems	GIULIA, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	ClayKnit - A composite structure of clay and knitted meshes	GOSCH, L.	ROBOTIC
2021	Optimization of Daylight and Thermal Performance of Building Façade: A Case Study of Office Buildings in Nanjing	HAINAN, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	A Generative Approach to Social Ecologies in Project [Symbios]City	HAO, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Application of 6-Dof Robot Motion Planning in Fabrication	HAO, M.	ROBOT, ROBOTIC
2021	Towards Swarm Construction	HOU, Y.	ROBOTIC, ROBOTICS
2021	A Distributed Agents Approach for Design and Fabricating Process Management among Prototyping Practice Environment	HSIAO, C.	ROBOT, ROBOTIC
2021	Reinforcement Learning for Architectural Design-Build - Opportunity of Machine Learning in a Material-informed Circular Design Strategy	HUANG, C.	ROBOTIC

2021	Serlio and Artificial Intelligence: Problematizing the Image-to-Object Workflow	JEAN, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Mass Customization: The Implication on Development of Aluminum Joint	JIABEI, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Discrete Quasicrystal Assembly	KANG, D.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2021	Soft actuated material: Exploration of a programmable composite	KIEFFER, H.	ROBOTS
2021	Process / Product	KING, C.	ROBOTIC
2021	A Hybrid Robotic Construction Approach in Large Scale - The example of a tree-like timber branching structure development	KONTOVOURKIS, O.	ROBOT, ROBOTIC
2021	Rob-LCA - An assessment method to support environmental sensitive material selection in robotic fabrication	KRELIK, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Cyber-Physical Robotic Process for Re- Configurable Wood Architecture - Closing the circular loop in wood architecture	KUNI, A.	ROBOTS, ROBOTIC
2021	Automatic Assembly of Jointed Timber Structure using Distributed Robotic Clamps	LEUNG, V.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2021	Multi-Material Fabrication for Biodegradable Structures - Enabling the printing of porous mycelium composite structures	LIM, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Timber De-Standardized	LOK, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2021	Research on Realtime Communication and Control Workflow with Vision Feedback Integrated in Robotic Fabrication	LU, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	An optimization method for large-scale 3D printing - Generate external axis motion using Fourier series	LU, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2021	Design Methods for Variable Density, Multi-Directional Composite Timber Slab Systems for Multi-Storey Construction	LUIS, O.	ROBOTIC
2021	Material Response: Technology, Material Systems and Responsive Design	MARCUS, F.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Robotic Pellet Extrusion: 3D Printing and Integral Computational Design	MEIBODI, M.	ROBOTIC
2021	Imprimer La Lumiere – 3D Printing Bioluminescence for Architectural Materiality	METTE, R.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Robotic Color Grading for Glass - Additive Manufacturing of Heterogeneous Color and Transparency	MICHOPOULOU, S.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Research on Epidemic Prevention and Management Measures in University Based on GIS and ABM – Taking South China University of Technology (Wushan Campus) as an Example	MINGXI, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Integration of Algorithm-Based Optimization into the Design Process of Industrial Buildings: A Case Study	MIRJAM, K.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2021	Reinventing Staircases for Thermoplastic Additive Manufacturing	MIRKO, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Bio Scaffolds	N, A.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Wedged Kerfing. Design and Fabrication Experiments in Programmed Wood Bending	NABONI, R.	ROBOTIC
2021	Design and Fabrication Methodologies for Repurposing End of Life Metal via Robotic Incremental Sheet Metal Forming	NICHOLAS, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Prvok - An experiment with 3D printing large doublecurved concrete structure	NOVAKOVA, K.	ROBOT
2021	Designing a Living Material Through Bio-Digital-Fabrication - Guiding the growth of fungi through a robotic system	OZKAN, D.	ROBOTIC
2021	Environmentally Driven Aggregate Façade Systems	PABLO, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	PX01-Switch: A Hardware Extension for KUKA Robot Controller Enabling Realtime Safe Operation	POUSTINCHI, E.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS
2021	Imaginary Vessels	QUINTEROS	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	A Framework for Cypher-Physical Human-robot Collaborative Immersive MR Interaction – Beaux Arts Ball 4.0	RISU, N.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Bio-Tile: An Intelligent Hybrid-Infrastructure	SARA, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2021	Branching Inventory - Democratized Fabrication of Available Stock	SASLAWSKY, K.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Designing Printers that Print onto Spherical Geometries: A Lo-Fi Prototyping Case	SENCAN, I.	ROBOT
2021	Shepherd	SHAKED, T.	ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2021	Exploring in the Latent Space of Design: A Method of Plausible Building Facades Images Generation, Properties Control and Model Explanation Base on StyleGAN2	SHENGYU, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	A POI-Based Machine Learning Method for Predicting Residents' Health Status	SHICONG, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Diversifying Emotional Experience by Layered Interfaces in Affective Interactive Installations	SIJIA, Y	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
	Ice stereotomy - A Case Study of Free-Form Ice Shell	SONG, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	[AR]OBOT: the AR-Assisted Robotic Fabrication System for Parametric Architectural Structures	SONG, Y.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2021	AR Digi-Component - AR-assisted,real-time,immersive design and robotic fabrication workflow for parametric architectural structures	SONG, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Personalized Knit Masks	TESSMER, L.	ROBOTIC

2021	Contribution of Maker Education to Teaching and Society: Report of Two Experiments	TURAZZI, P.	ROBOTIC, ROBOTICS
2021	Punch Card Patterns Designed with GAN	VIRGINIA, M.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Robotic Weaving Manufacturing of Optimized Glass Fibres Panels	VIVANCO, T.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Small Robots and Big Projects	YABLONINA, M.	ROBOTS
2021	Subjectively Measured Streetscape Qualities for Shanghai with Large-Scale Application of Computer Vision and Machine Learning	WAISHAN, Q.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Intuitive Behavior - The Operation of Reinforcement Learning in Generative Design Processes	WANG, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Command2Vec: Feature Learning of 3D Modeling Behavior Sequence—A Case Study on “Spiral-stair”	WEN, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Small Robots and Big Projects	YABLONINA, M.	ROBOTIC, ROBOTICS
2021	Additive Manufacture of Cellulose Based Bio-Material on Architectural Scale	YIMENG, W.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Exploration on Machine Learning Layout Generation of Chinese Private Garden in Southern Yangtze	YUBO, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	From Separation to Incorporation - A Full-Circle Application of Computational Approaches to Performance-Based Architectural Design	YUHAN, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION

2021	Using CycleGAN to Achieve the Sketch Recognition Process of Sketch-Based Modeling	YUQIAN, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Environmental Data-Driven Performance-Based Topological Optimisation for Morphology Evolution of Artificial Taihu Stone	Z, F.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	3D Concrete Printing with Variable Width Filament	ZHAN, Q.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Digital Design and Fabrication of a 3D Concrete Printed Prestressed Bridge	ZHAN, Q.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Computational Design and Robotic Fabrication Based on 3D Graphic Statics	ZHANG, X.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Design and Fabrication of Formwork for Shell Structures Based on 3D-printing Technology	ZHANG, X.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Reinterpretation of the Dougong Joint by the use of Parametric Tools and Robotic Fabrication Techniques	ZHAO, J.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Robotic weaving of customizable FRP formworks for large-scale optimized structure	ZHU, G.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2021	Robo-Sheets - Double-Layered Structure Based on Robot-Aided Plastic Sheet Thermoforming	ZHU, L	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2021	Co-Designing Material-Robot Construction Behaviors	ŁOCHNICKI, G.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC

Ano	Título	Primeiro Autor	Palavras-chave
2022	Soft Architecture: Application of Soft Robotics in the Design of Responsive-Interactive Architecture	AROCA, V.	ROBOTIC, ROBOTICS, SOFT ROBOTICS
2022	Democratizing Stereotomic Construction through AR Technologies - A reusable mold methodology to the production of customized voussoirs using HoloLens	AZAMBUJA, P.	ROBOT
2022	Zone-sensitive RIZOBots in Action: Examining the Behavior of Mobile Robots In a Heterogeneous Environment	BALCI, O.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2022	Planning & Design Platform of Buildings By Robotic Additive Manufacturing for Construction.	BANDA, P.	ROBOTIC
2022	Robotic 3D Printing of Mineral Foam for a Lightweight Composite Concrete Slab	BEDARF, P.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Visual Programming for Interactive Robotic Fabrication Processes - Process flow definition in robotic fabrication	BRUMANN, J.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2022	Hybrid Digital Crafts With Collaborative Robotics	BURDEN, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2022	Kit-of-Parts Fabrication and Construction Strategy of Timber Roof Structure - Digital design-to-production workflow for self-builders	BUS, P.	ROBOTIC
2022	In-Situ Robotic Fabrication of Spatial Glulam Structures	CHAI, H.	ROBOT, ROBOTIC,

			ROBOTIC FABRICATION
2022	Robotic Fabrication Process of Glued Laminated Bamboo for Material Efficient Construction	CHENG, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION, ROBOTIC ASSEMBLY
2022	Digital Intervention Methodologies and Robotic Manufacturing for the Conservation and the Restoration of 20th-Century Concrete Architecture Damaged by Material Loss	COLONNEAU, T.	ROBOTS, ROBOTIC
2022	Forming Strategies for Robotic Incremental Sheet Forming	CUI, Q.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Topology Optimization for 3D-Printable Large-Scale Metallic Hollow Structures With Self-Supporting	CUI, Q.	ROBOTIC
2022	Towards to the Hyperautomation - An integrated framework for Construction 4.0: a case of Hookbot as a distributed reconfigurable robotic assembly system	DELIKANLI, B.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC ASSEMBLY
2022	Light Transmittance Ceramic Design-Computation with Robotics	DONG, S.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2022	Sustainable Rapid Prototyping with Fungus-Like Adhesive Materials	DRITSAS, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Rapid Assembly of Masonry Structures with Ad-Hoc Material Attributes, Computer Vision and SCARA Robots.	FINGRUT, A.	ROBOT, ROBOTS

2022	Modulo Continuo - 5-axis ceramic additive manufacturing applications for evaporative cooling facades modules	GAN, A.	ROBOTIC, ROBOTICS
2022	The Digital Touch - Towards novel modeling frameworks for robotically-enhanced marble sculpting	GARCIA, C.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Architectural Diversity of Residential Buildings through Digital Design and Robotic Construction	GARCIA, R.	ROBOTIC, ROBOTICS
2022	Extrusion-Based 3d Printing for Recyclable Gypsum	GONG, L.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Experimental Study of Prototyping of Autonomous Responsive Cell Panels for Pavilion Design in the Midwest Region of Brazil	GUILLEN, S.	ROBOTICS
2022	Robotic Fabrication of Topology Optimized Concrete Components With Reusable Formwork	GUO, Y.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Robotic Carving Craft, Research on the Application of Robotic Carving Technology in the Inheritance of Tradition-AI Carving Craft	GUO, Z.	ROBOT, ROBOTIC
2022	Robotic Assembly of Modular Multi-Storey Timber-Only Frame Structures Using Traditional Wood Joinery	HELMREICH, M.	ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2022	Training a Vision-Based Autonomous Robot From Material Bending Analysis to Deformation Variables Predictions With an XR Approach	HSIAO, C.	ROBOT
2022	Autonomous Collective Housing Platform: Digitization, Fluidization and Materialization of Ownership	JIANG, W.	ROBOTS

2022	Large-scale Robotic 3D Printing of Plant Fibre and Bioplastic Composites	KLEMMT, C.	ROBOT, ROBOTIC
2022	Felt and Fold - Design and manufacturing of customized nonwovens through robotic needle felting	KYCIA, A.	ROBOTIC
2022	Robotic Additive Manufacturing of Glass Structures	LIN, H.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Autonomous Transhumance	MONDAL, T.	ROBOTICS
2022	Environment-Aware 3D Concrete Printing through Robot-Vision	NABONI, R.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTIC
2022	Dynamic Projection	NANASCA, J.	ROBOT
2022	Robotically Printed Seaweed as a Biomaterial within Architecture and Design	NAPIER, I.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	eCAADe 2022 Co-creating the Future: Inclusion in and through Design - Volume 1	PAK, B.	ROBOTS
2022	eCAADe 2022 Co-creating the Future: Inclusion in and through Design- Volume 2	PAK, B.	ROBOTS
2022	Programming Twist - Exploring the geometric affordances of aluminum through flexible robotic workflows	PAPANDREOU, M.	ROBOT, ROBOTIC
2022	Requirements to assemble a digital fabrication robotic unit	PASSARO, A.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTICS
2022	Droop , An Iterative Design Tool for Material Draping	PERRY, G.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Tactile Oceans - Enabling Inclusive Access to Ocean Pools for Blind and Low Vision Communities	REINHARDT, D.	ROBOTIC

2022	A Collaborative Workflow to Automate the Design, Analysis, and Construction of Integrally-Attached Timber Plate Structures	ROGEAU, N.	ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2022	Rule-Based Design for the Integration of Humanoid Assistance Robotics into the Living Environment of Senior Citizens	SARTORIUS, M.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS
2022	Cockroach: an Open-source Tool for Point Cloud Processing in CAD	SETTIMI, A.	ROBOTIC
2022	Towards robotic fabrication in landscape architecture	SHAKERI, S.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Self-Surveying Multi-Robot System for Remote Deposition Modelling	SIEDER, J.	ROBOT, ROBOTS
2022	Augmented Bricklayer: an augmented human-robot collaboration method for the robotic assembly of masonry structures	SONG, Y.	ROBOT, ROBOTIC, ROBOTIC ASSEMBLY
2022	Smart Hand for Digital Twin Timber Work - The interactive procedural scanning by industrial arm robot	SUKEGAWAM, C.	ROBOT, ROBOTIC
2022	Digital Construction of Bamboo Architecture Based on Multi-Technology Cooperation: Constructing a New Parameterized Digital Construction Workflow of Bamboo Architecture From Traditional Bamboo Construction Technology	SUN, K.	ROBOT
2022	Multimateriality as a Driver of Additive Robotic Fabrication - Agent system used for toolpath generator	SVITAK, D.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	(e)mulate AEC: A Gestural Pedagogy and Cloud-based Collaborative Management Paradigm for On-site Robotics in Construction	VAIDHYNATHAN, V.	ROBOT, ROBOTS, ROBOTICS

2022	Digital Design and Fabrication of a 3D Concrete Printed Funicular Spatial Structure	WU, H.	ROBOTIC, ROBOTIC FABRICATION
2022	Adaptive Robotic Fiber Winding System for Multiple Types of Optimized Structural Components	XIN, Z.	ROBOTIC
2022	Vizor, Facilitating Cyber-physical Workflows in Prefabrication through Augmented Reality	YANG, X.	ROBOT, ROBOTIC
2022	Non-Standard Robotic 3D Printing for Architects - A comprehensive digital fabrication lab pedagogy integrating non-programmable material effects	ZBOINSKA, M.	ROBOTIC
2022	Reinterpreting the Dougong Joint by Using Parametric Design Methods and Robotic Fabrication Technologies: a Critical Review	ZHAO, J.	ROBOT, ROBOTIC FABRICATION
2022	See - Sense - Respond: An adaptive robotic fabrication framework for post-processing of glass fiber-reinforced plastic architectural panels	ÇAPUNAMAN, O.	ROBOTIC, ROBOTICS, ROBOTIC FABRICATION
2022	Precision Factors in Modelling of Relief Patterns on Thin Aluminum Plates - Learning from making process	ÇAVU, O.	ROBOTIC

## 2. Anais da conferência “Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design” (Rob|Arch)

Ano	Título	Primeiro Autor
2012	Robotically Fabricated Wood Plate Morphologies	Tobias Schwinn
2012	Processes for an Architecture of Volume: Robotic Wire Cutting	Wes McGee
2012	Augmented Fabrications	Brandon Krusma
2012	Interlacing	Kathrin Dörfler

2012	HAL	Thibault Schwart
2012	BrickDesign	Tobias Bonwetsch
2012	Mill to Fit	Andreas Trumme
2012	Design Robotics	Martin Bechthold
2012	Fabricating the Steel Bull of Spielberg	Clemens Neugebauer
2012	Morphfaux	Joshua Bard
2012	Protocols, Pathways, and Production	David Pigram
2012	From Digital Design to Automated Production	Jens Cortsen
2012	Robot Assisted Asymmetric Incremental Sheet Forming	Jan Brüninghaus
2012	CNSILK	Elizabeth Tsai
2012	Rhino2krl	Tom Pawlofsky
2012	Robotic Fabrication for Düzce Teknopark	Baris Çokcan
2012	Free Molding Technology	Yaron Elyasi
2012	Outside Itself	Federico Díaz
2012	Geometry Optimization	Lukáš Kurilla
2012	Robotic Pouring of Aggregate Structures	Karola Dierichs
2012	Magnetic Architecture	Alexandre Dubor
2012	Automating Eclipsis	Nathan King
2012	Irregular Substrate Tiling	Ryan Luke Johns
2012	RoboSculpt	Mathew Schwartz
2012	The Framed Pavilion	Richard Dank
2012	Robotic Immaterial Fabrication	Steven Keating
2012	splineTEX	Valentine Tro
2012	Industrial Robots in Architecture	David Kittl
2012	Revolution in Steel Beam Fabrication	Andreas Hofer
2012	21st Century Art: The Marriage of Inspiration and Innovation	Manfred Hübschmann
2012	Modular Robotics	Christian Binder
2012	A Custom Robotic Trimmer for Modern Timber Constructions	Michael Bauer
2012	Rapid On-site Fabrication of customized Freeform Metal cladding Panels	Peter Mehrtens

2014	Variable Carving Volume Casting	Brandon Clifford
2014	Bandsawn Bands	Randon Clifford
2014	An Investigation of Robotic Incremental Sheet Metal Forming as a Method for Prototyping Parametric Architectural Skins	Ammar Kalo
2014	An Approach to Automated Construction Using Adaptive Programing	Khaled Elashry
2014	Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT	Christopher Robeller
2014	Robotic Bead Rolling	Jared Friedman
2014	A Compound Arm Approach to Digital Construction	Steven Keating
2014	Design of Robotic Fabricated High Rises	Michael Budig
2014	FreeFab	James B. Gardine
2014	Additive Manufacturing of Metallic Alloys	James Warton
2014	TriVoc	Dagmar Reinhardt
2014	Performative Tectonics	Philip F. Yuan
2014	Integrated Design and Robotized Prototyping of Abeille's Vaults	Thibault Schwartz
2014	Mediating Volumetric Thresholds	Gabriel Fries-Briggs
2014	Instruction and Instinct	Emmanuel Vercruyse
2014	Objects of Rotation	Rachel Dickey
2014	D-FORM	Renate Weissenböck
2014	Experiments in Additive Clay Depositions	Jared Friedman
2014	Core-Less Filament Winding	Marshall Prado
2014	Adaptive Part Variation	Lauren Vasey
2014	All Bent Out...	Thibault Schwartz
2014	Design Approaches Through Augmented Materiality and Embodied Computation	Ryan Luke Johns
2014	Material Feedback in Robotic Production	Felix Raspall
2014	Phase Change: Approaching Research Methodologies Through Design Robotics	Nathan King
2014	Sense-It	Ellie Abrons

2014	KUKA Robots On-Site	Stuart Shepherd
2014	Special Solutions for Special Applications	Joe Gemm
2014	Sensitive Robotic Processes	Christian Binder
2016	Building a Bridge with Flying Robots	Ammar Mirjan
2016	Autonomous Robotic Assembly with Variable Material Properties	Michael Jeffers
2016	An Integrated Modelling and Toolpathing Approach for a Frameless Stressed Skin Structure, Fabricated Using Robotic Incremental Sheet Forming	Paul Nicholas
2016	Robotic Lattice Smock	Andrew Saunders
2016	Robotic Multi-dimensional Printing Based on Structural Performance	Philip F. Yuan
2016	Fabric Forms: The Robotic Positioning of Fabric Formwork	Ron Culver
2016	Path Planning for Robotic Artistic Stone Surface Production	Gregor Steinhagen
2016	Towards a Micro Design of Acoustic Surfaces	Dagmar Reinhardt
2016	Robotic Hot-Blade Cutting	Asbjørn Søndergaard
2016	Fabrication-Aware Design of Timber Folded Plate Shells with Double Through Tenon Joints	Christopher Robeller
2016	RBDM_Robodome: Complex Curved Geometries with Robotically Fabricated Joints	Alexander Jung
2016	Topology Optimization and Robotic Fabrication of Advanced Timber Space-Frame Structures	Asbjørn Søndergaard
2016	Mobile Robotic Brickwork	Kathrin Dörfler
2016	Closeness: On the Relationship of Multi-agent Algorithms and Robotic Fabrication	Roland Snooks
2016	The SPIDERobot: A Cable-Robot System for On-site Construction in Architecture	José Pedro Sousa
2016	Developing Architectural Geometry Through Robotic Assembly and Material Sensing	Kaicong Wu
2016	BotBar: A Platform for Multi-disciplinary Design Education	Marjo Niemelä
2016	RECONstruction	Joshua Bard
2016	Robotics-Based Prefabrication in Architecture	Xun Li
2016	Stereotomy of Wave Jointed Blocks	Simon Weir

2016	Crafting Robustness: Rapidly Fabricating Ruled Surface Acoustic Panels	Nicholas Williams
2016	From Analysis to Production and Back Attempts and Results of Reusable Adaptive Freeform Production Strategies for Double Curved Concrete Construction Elements	Felix Amtsberg
2016	Free Form Clay Deposition in Custom Generated Molds	Kate Dunn
2016	Solar Bytes Pavilion	Brian Peters
2016	Materially Informed Design to Robotic Production: A Robotic 3D Printing System for Informed Material Deposition	Sina Mostafavi
2016	Robotics-Enabled Stress Line Additive Manufacturing	Kam-Ming Mark Tam
2016	BUILD-ing the MASS Lo-Fab Pavilion	Nathan King
2016	Towards On-site Collaborative Robotics	Thibault Schwartz
2016	Stigmergic Accretion	Roland Snooks
2016	Sensors and Workflow Evolutions: Developing a Framework for Instant Robotic Toolpath Revision	Alexandre Dubor
2016	Towards Real-Time Adaptive Fabrication-Aware Form Finding in Architecture	Dave Pigram
2016	Collaborative Robotics	Frank-Peter Kirgis
2016	Flexible Gripper Design Through Additive Manufacturing	Marcel Nagel
2016	PowerMILL Robot: Simplifying the Complex Issue of Robotic Programming	Robert Simunic
2018	Image Classification for Robotic Plastering with Convolutional Neural Network	Joshua Bard
2018	Designing Natural Wood Log Structures with Stochastic Assembly and Deep Learning	Kaicong Wu
2018	Mockup Method: Heuristic Architectural Fragments as Central Models in Architectural Design	Kevin Pazik
2018	Haptic Programming	Sven Stumm
2018	Towards Automatic Path Planning for Robotically Assembled Spatial Structures	Augusto Gandia
2018	Communication Landscapes	Giovanni Betti

2018	Towards Visual Feedback Loops for Robot-Controlled Additive Manufacturing	Sheila Sutjipto
2018	Thermally Informed Robotic Topologies: Profile-3D-Printing for the Robotic Construction of Concrete Panels, Thermally Tuned Through High Resolution Surface Geometry	Joshua Bard
2018	Hold Up: Machine Delay in Architectural Design	Zach Cohen
2018	Concrete Fabrication by Digitally Controlled Injection	Ryan Wei Shen Chee
2018	Towards the Development of Fabrication Machine Species for Filament Materials	Maria Yablonina
2018	Spatial Print Trajectory	Sulaiman AlOthman
2018	An Additive and Subtractive Process for Manufacturing with Natural Composites	Stylianios Dritsas
2018	Hard + Soft: Robotic Needle Felting for Nonwoven Textiles	Wes McGee
2018	SCRIM – Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks	Phil Ayres
2018	Versatile Robotic Wood Processing Based on Analysis of Parts Processing of Japanese Traditional Wooden Buildings	Hiroki Takabayashi
2018	Form Finding of Nexorades Using the Translations Method	Tristan Gobin
2018	Sub-Additive 3D Printing of Optimized Double Curved Concrete Lattice Structures	Christopher A. Battaglia
2018	Investigations on Potentials of Robotic Band-Saw Cutting in Complex Wood Structures	Hua Chai
2018	Direct Deposition of Jammed Architectural Structures	Petrus Aejmelaeus- Lindströ
2018	FIBERBOTS: Design and Digital Fabrication of Tubular Structures Using Robot Swarms	Markus Kayser
2018	InFormed Ceramics: Multi-axis Clay 3D Printing on Freeform Molds	Minjae Ko
2018	Altered Behaviour: The Performative Nature of Manufacture Chainsaw Choreographies + Bandsaw Manoeuvres	Emmanuel Vercruyse
2018	Cyber Physical Macro Material as a UAV [re]Configurable Architectural System	Dylan Wood

2018	Adaptive Robotic Carving	Giulio Brugnaro
2018	Multimode Robotic Materialization	Sina Mostafavi
2018	Digital Composites: Robotic 3D Printing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Plastics for Functionally-Graded Building Components	Hyunchul Kwon
2018	Robotic Extrusion of Architectural Structures with Nonstandard Topology	Yijiang Huang
2018	On-Site Robotics for Sustainable Construction	Alexandre Dubor
2018	Tailored Structures, Robotic Sewing of Wooden Shells	Martin E. Alvarez
2018	Dynamic Robotic Slip-Form Casting and Eco-Friendly Building Façade Design	Lei Yu
2018	Ceramic Constellation   Robotically Printed Brick Specials	Christian J. Lange
2018	Robotic Fabrication of Bespoke Timber Frame Modules	Andreas Thoma
2018	Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars	Nadja Gaudillière
2018	Realization of Topology Optimized Concrete Structures Using Robotic Abrasive Wire-Cutting of Expanded Polystyrene Formwork	Asbjørn Søndergaard
2018	The Brick Labyrinth	Luka Piškorec

### 3. Anais da conferência “FABRICATE”

Ano	Título	Primeiro Autor
2011	RESEARCH PAVILION ICD/ITKE	MENDES, A.
2011	(FAB)BOTS CUSTOMISED ROBOTIC DEVICES FOR DESIGN & FABRICATION	MALÊ-ALEMANY, M.
2011	CNCATENARY TOWARDS A DIGITAL FABRICATION METHOD FOR CATENARY SYSTEMS	ADAMANTIDIS, E.
2011	UNIKABETON PROTOTYPE	SONDERGAARD, A.
2011	MATTER & MAKING	FABLAB
2011	MATERIAL ANIMATION A NEW INTERFACE TO CUSTOM FABRICATION	PUCKETT, N.

2011	INVESTIGATIONS IN DESIGN & FABRICATION AT HYPERBODY	VERDE, M.
2011	C-STONE & C-BENCH	DONDERS, P.
2011	RADIOLARIA PAVILION	MORGANTE, A.
2011	DESIGN POTENTIAL FOR LARGE-SCALE ADDITIVE FABRICATION FREE-FORM CONSTRUCTION	KESTELIER, X.
2017	COOPERATIVE FABRICATION OF SPATIAL METAL STRUCTURES	PARASCHO, S.
2017	INFINITE VARIATIONS, RADICAL STRATEGIES	SELF, M.
2017	ROBOTIC WOOD TECTONICS	YUAN, P.
2017	RAPID ASSEMBLY WITH BENDING-STABILISED STRUCTURES	GATTAS, J.
2017	INFUNDIBULIFORMS KINETIC SYSTEMS, ADDITIVE MANUFACTURING FOR CABLE NETS AND TENSILE SURFACE CONTROL	MCGEE, W.
2017	ROBOTIC INTEGRAL ATTACHMENT	ROBELLER, C.
2017	ROBOTIC FABRICATION OF STONE ASSEMBLY DETAILS	ARIZA, I.
2017	ADAPTIVE ROBOTIC FABRICATION FOR CONDITIONS OF MATERIAL INCONSISTENCY INCREASING THE GEOMETRIC ACCURACY OF INCREMENTALLY FORMED METAL PANELS	NICHOLAS, P.
2017	DIGITAL FABRICATION OF NON-STANDARD SOUND-DIFFUSING PANELS IN THE LARGE HALL OF THE ELBPHILHARMONIE	KOREN, B.
2017	QUALIFYING FRP COMPOSITES FOR HIGH-RISE BUILDING FACADES	KREYSLER, W.
2017	DISCRETE COMPUTATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING	RETSIN, G.
2017	MOBILE ROBOTIC FABRICATION SYSTEM FOR FILAMENT STRUCTURES	YABLONINA, M.
2017	THE SMART TAKES FROM THE STRONG 3D PRINTING STAY-IN-PLACE FORMWORK FOR CONCRETE SLAB CONSTRUCTION	MEIBODI, M.

2017	ELYTRA FILAMENT PAVILION ROBOTIC FILAMENT WINDING FOR STRUCTURAL COMPOSITE BUILDING SYSTEMS	PRADO, M.
2020	MUD FRONTIERS	FRATELLO, V.
2020	THE DESIGN AND FABRICATION OF CONFLUENCE PARK	KUDLESS, A.
2020	THE ROLE OF ROBOTIC MILLING IN THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE CORK CONSTRUCTION KIT	WILTON, O.
2020	PULP FACTION 3D PRINTED MATERIAL ASSEMBLIES THROUGH MICROBIAL BIOTRANSFORMATION	GOIDEA, A.
2020	FROM MACHINE CONTROL TO MATERIAL PROGRAMMING SELF-SHAPING WOOD MANUFACTURING OF A HIGH PERFORMANCE CURVED CLT STRUCTURE – URBACH TOWER	WOOD, D.
2020	BENDING THE LINE ZIPPERED WOOD CREATING NON-ORTHOGONAL ARCHITECTURAL ASSEMBLIES USING THE MOST COMMON LINEAR BUILDING COMPONENT (THE 2X4)	SATTERFIELD, B.
2020	BIOCOMPOSITES FROM ANNUALLY RENEWABLE RESOURCES DISPLAYING VISION OF FUTURE SUSTAINABLE ARCHITECTURE DESIGN AND FABRICATION OF TWO 1:1 DEMONSTRATORS	DAHY, H.
2020	CELLULOSIC BIOCOMPOSITES FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING	DRITSAS, S.
2020	A FACTORY ON THE FLY EXPLORING THE STRUCTURAL POTENTIAL OF CYBER-PHYSICAL CONSTRUCTION	SONDERGAARD, A.
2020	DIRECT-TO-DRAWING AUTOMATION IN EXTRUDED TERRACOTTA FABRICATION	OVERALL, S.
2020	MAKING FORM WORK EXPERIMENTS ALONG THE GRAIN OF CONCRETE AND TIMBER	ZIVKOVIC, S.
2020	ADDITIVE FABRICATION OF CONCRETE ELEMENTS BY ROBOTS LIGHTWEIGHT CONCRETE CEILING	HANSEMANN, G.
2020	DFAB HOUSE A COMPREHENSIVE DEMONSTRATOR OF DIGITAL FABRICATION IN ARCHITECTURE	GRASER, K.

2020	FABRICATION AND APPLICATION OF 3D-PRINTED CONCRETE STRUCTURAL COMPONENTS IN THE BAOSHAN PEDESTRIAN BRIDGE PROJECT	XU, W.
2020	PRINTED ASSEMBLAGES A CO-EVOLUTION OF COMPOSITE TECTONICS AND ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES	SNOOKS, R.
2020	OPTIMISATION OF ROBOTIC PRINTING PATHS FOR STRUCTURAL STIFFNESS USING MACHINE LEARNING	AKSOZ, Z.
2020	THE ANATOMY OF A SKELETON HYBRID PROCESSES FOR LARGE-SCALE ROBOTIC FABRICATION	VERCRUYSSSE, E.
2020	BUGA FIBRE PAVILION TOWARDS ROBOTICALLY-FABRICATED COMPOSITE BUILDING STRUCTURES	BODEA, S.
2020	HOUSE #05 INCREMENTAL CONSTRUCTION IN DIGITAL PRACTICE	LOH, P.
2020	CONCRETE CHOREOGRAPHY PREFABRICATION OF 3D-PRINTED COLUMNS	ANTON, A.

#### 4. Constructions Robotics

Ano	Título	Primeiro Autor
2017	Mobile robotic fabrication at 1:1 scale: the In situ Fabricator	GIFTHALER, M.
2017	An agile robotic system mounted on scaffold structures for on-site construction work	DHARMAWAN, A.
2017	Bots2ReC: introducing mobile robotic units on construction sites for asbestos rehabilitation	DETERT, T.
2017	Robot assisted deconstruction of multi-layered façade constructions on the example of external thermal insulation composite systems	LUBLASSER, E.
2017	Robotic prefabrication of timber structures: towards automated large-scale spatial assembly	EVERSMANN, P.

2017	Roboticus tignarius: robotic reproduction of traditional timber joints for the reconstruction of the architectural heritage of Valparaíso	BOHME, L.
2017	Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots	IZAR, J.
2017	Developing robotic formwork: enhancing formwork mobility and variability through mechanization	SHAFFER, M.
2018	Haptic programming in construction	STUMM, S.
2018	Digital fabrication with natural composites	DRITSAS, S.
2018	Robotic concrete surface finishing: a moldless approach to creating thermally tuned surface geometry for architectural building components using Profile-3D-Printing	BAR, J.
2018	FIBERBOTS: an autonomous swarm-based robotic system for digital fabrication of fiber-based composites	KAYSER, M.
2018	Robotic abrasive wire cutting of polymerized styrene formwork systems for cost-effective realization of topology-optimized concrete structures	SONDERGAARD, A.
2019	Building robotics design for construction	DRITSAS, S.
2019	Radical cross-disciplinarity: laying the foundations for new material practices	THOMSEN, M.
2019	Towards onsite, modular robotic carbon-fibre winding for an integrated ceiling structure	REINHARDT, D.
2019	Construction robotics for designed granular materials: in situ construction with designed granular materials at full architectural scale using a cable-driven parallel robot	DIERICHS, K.
2019	Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: case study Mesh Mould wall of the DFAB HOUSE	DORFLER, K.
2019	BIM-assisted object recognition for the on-site autonomous robotic assembly of discrete structures	DAWOD, M.
2020	Physically distributed multi-robot coordination and collaboration in construction	VASEY, L.
2020	Highly accessible platform technologies for vision-guided, closed-loop robotic assembly of unitized enclosure systems	TISH, D.

2020	Additive manufacturing by means of parametric robot programming	FEUCHT, T.
2020	Towards robotic steel construction through adaptive incremental point welding	HEIMIG, T.
2020	Piling and pressing: towards a method of 3D printing reinforced concrete columns	COHEN, Z.
2020	Robotic processing of crooked sawlogs for use in architectural construction	LARSEN, N.
2020	Precise imprecision: flexible construction with robotics	KO, L.
2020	Rock print Pavilion: robotically fabricating architecture from rock and string	AEJMELAEUS-LINDSTROM, P.
2020	Robotic vault: a cooperative robotic assembly method for brick vault construction	PARASCHO, S.
2020	Autonomous dry stone	JOHNS, R.
2020	Craft to site	SHAKED, T.
2020	Augmented bricklaying	MITTERBERGER, D.
2020	Interactive design to fabrication, immersive visualization and automation in construction	MORSE, C.
2020	Robotic timber assembly	RAWI, J.
2020	Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion	WAGNER, H.
2020	Spatial winding: cooperative heterogeneous multi-robot system for fibrous structures	ESTRADA, R.
2020	Skeletal composites: robotic fabrication processes for lightweight multi-nodal structural components	PRADO, M.
2020	Crafting plaster through continuous mobile robotic fabrication on-site	JENNY, S.
2021	Cartesian coordinate control for teleoperated construction machines	LEE, H.
2021	Design, simulation and robotic assembly of reversible timber structures	NABONI, R.

2021	Soft Office: a human–robot collaborative system for adaptive spatial configuration	YABLONINA, M.
2021	Fabrication grammars: bridging design and robotics to control emergent material expressions	TOKAC, I.
2021	The geometry of air: large-scale multi-colour robotic additive fabrication for air-diffusion systems	SCHORK, T.
2021	Oscillating wire cutting and robotic assembly of bespoke acoustic tile systems	ROSSI, G.
2021	Material characterization of workability and process imaging for robotic concrete finishing	LIU, J.
2021	Robotic embankment	JUD, D.
2021	Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures	HUGHES, R.
2021	Hand-drawn digital fabrication: calibrating a visual communication method for robotic on-site fabrication	PEDERSEN, J.
2021	A novel approach of geopolymers formulation based on clay for additive manufacturing	YOUSSEF, N.
2021	Depth-camera-based rebar detection and digital reconstruction for robotic concrete spraying	FRANGEZ, V.
2021	Building rethought – 3D concrete printing in building practice	WEGER, D.
2022	Dynamic 3D print head for spatial strand extrusion of fiber-reinforced concrete: requirements, development and application	ADAMS, T.
2022	Autonomous robotic additive manufacturing through distributed model-free deep reinforcement learning in computational design environments	FELBRICH, B.
2022	3DWoodWind: robotic winding processes for material-efficient lightweight veneer components	GOBERT, A.
2022	Fabrication information modeling: interfacing building information modeling with digital fabrication	SLEPICKA, M.
2022	Workspace analysis of an underconstrained cable-driven parallel robot with four cables	JOB, J.

2022	Beyond transparency: architectural application of robotically fabricated polychromatic float glass	GIESECKE, R.
2022	Robotic drawing communication protocol: a framework for building a semantic drawn language for robotic fabrication	PEDERSEN, J.
2022	Computer Vision and Human–Robot Collaboration Supported Design-to-Robotic-Assembly	BIER, H.
2022	Tie a knot: human–robot cooperative workflow for assembling wooden structures using rope joints	MITTERBERGER, D.
2022	Design considerations for robotically assembled through-tenon timber joints	ROGEAU, N.
2022	Cable Robotic 3D-printing: additive manufacturing on the construction site	HAHLBROCK, D.

## 5. Edição Made by Robots, da Architectural Design

Ano	Título	Primeiro Autor
2014	Mesh-Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Framework	HACK, N.
2014	Odico Formwork Robotics	SONDERGAARD, A.
2014	RoboFold and Robots.IO	EPPS, G.
2014	Machineous	FROECH, A.
2014	ROB Technologies	BONWETSCH, T.
2014	In-Situ Fabrication: Mobile Robotic Units on Construction Sites	HELM, V.
2014	Towards Robotic Swarm Printing	OXMAN, N.