

# Requirements to assemble a digital fabrication robotic unit

Andres Martin Passaro<sup>1</sup>, Gonçalo Castro Henriques<sup>1</sup>, Rodrigo García-Alvarado<sup>2</sup>, Luís Felipe González Böhme<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, LAMO-Prourb, Brasil

andrespassaro@fau.ufrj.br; gch@fau.ufrj.br

<sup>2</sup> Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile

rgarcia@ubiobio.cl

<sup>3</sup> Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

luisfelipe.gonzalez@usm.cl

**Abstract.** This article provides support for Universities dedicated to Architecture and Urbanism to implement a Robotic and Digital Fabrication Unit, based on the experience of laboratories in Chile and Brazil. Public funding agencies often promote "technological innovation" associated with "Industry 4.0" which requires a conceptual understanding of this framework. The authors address the industrial robot as a central element of research projects associated with robotic techniques, and creative processes. In summary, this article discloses a repertoire of technological alternatives and installation considerations, with a detailed review on how to set up a robotic unit for academia, for teaching, research and design development, in the context of Southern Creative Robotics.

**Keywords:** Digital fabrication, Industrial robot, Industry 4.0, Fab Lab, Maker.

## 1 Introdução

Neste artigo abordamos os fundamentos para estruturar uma proposta para solicitar apoio de agências de fomento para implementar uma unidade robótica de fabricação digital no contexto da Indústria 4.0, com integração digital, seguindo o conceito de Fab Lab e considerando a robótica de maneira criativa. Iremos também abordar as escolhas de ferramentas e acessórios, que são fundamentais para a implementar e desenvolver o projeto.

### 1.1 Robótica e Indústria 4.0

Na quarta revolução industrial a informação está omnipresente no processo de fabricação, numa integração sem precedentes (Schwab, 2017). Os

sistemas ciberfísicos fundem informação física, digital e biológica. Assim relativamente às máquinas da terceira revolução industrial operadas individualmente por humanos, os robôs passam a integrar o sistema produtivo como um todo, recolhendo informação, seja através de sensores (força, temperatura, proximidade, umidade), internet das coisas, códigos de barras, e recorrendo crescentemente à utilização de inteligência artificial e big-data, o que expande a capacidade dos robôs, de próteses mecânicas para agentes numa rede integrada de informação.

A aplicação da robótica em Arquitetura tem características próprias, que são diferentes de determinados contextos específicos e monofuncionais de engenharia com problemas pré-definidos. A arquitetura utiliza um processo exploratório aberto para descobrir e trabalhar problemas, antes de estes serem definidos. O robô é um objeto de estudo utilizado para repensar toda a cadeia de produtiva de manufatura. O pensamento de projeto suportado pelo design Thinking, utiliza processos empíricos de tentativa e erro, para explorar problemas que ainda não são conhecidos e que podem ser aplicados em diferentes domínios. No entanto, é fundamental uma visão da robótica associada com possíveis aplicações na indústria de construção, e identificando os domínios em que podem ser aplicados os processos robóticos para que se possam traduzir em inovação. Em resumo, é necessária uma visão holística de projeto aplicado na construção, nos materiais, nos processos de transformação, numa visão sustentável, com suporte de uma estrutura do tipo Fab Lab (Diez, 2012).

## 1.2 Conceito FAB LAB

Caso a universidade não tenha ainda um laboratório de fabricação digital, ou pretenda transformar a sala de maquetes ou a marcenaria em laboratório de fabricação digital é inevitável abordar a cultura maker, e o discurso “Do it Yourself” (DIY) a partir do texto de Gershenfeld (2012). O fundador do primeiro Fab Lab no MIT em 2001, explica quais os fundamentos para superar as barreiras do desconhecimento, já que provavelmente o primeiro questionamento será: “para quê será que a nossa universidade precisa de um robô industrial?”. Pacini (2019) apresenta um resumo sobre as premissas para introduzir uma unidade portátil para a inserir a cultura maker no ensino tradicional. Conceitos similares são também abordados nos textos do laboratório PRONTO Móvel (Pupo, 2020).

## 1.3 Robótica Criativa do Sul

Como descrito nos levantamentos de fab labs da América Latina no homo Faber 1 e 2 (Sperling, Scheeren e Herrera 2015 e 2018), esta região, tem características próprias diferentes, de outras regiões mais industrializados do Norte da Europa, EUA e Japão. A região tem uma relação com a 4<sup>a</sup> revolução industrial enquadrada no conceito de sul global (Santos 2014), que é abordada

na arquitetura por Celani (2020), e em dois números especiais do IJAC sobre a 4<sup>a</sup> revolução na Arquitetura (Henriques et al., 2020 e 2021). As unidades robóticas em Universidade de Arquitetura na América do Sul podem ser contadas numa mão de acordo com o site [Robots in Architecture](#). As primeiras instalações se deram no Chile em Universidades Privadas (UTFSM 2014 e Bio-Bio 2019) e numa empresa no Brasil (2018). Mais recentemente a primeira Universidade Pública nesta região a adquirir um braço robótico foi a UFRJ no Rio de Janeiro (2021). No entanto, esta lista tem crescido e há estudos que apontam novos mais unidades [Robôs na LATAM](#).

#### 1.4 Experiências percursoras.



Figura 1. UTFSM, créditos laboratório dos autores.

As experiências percursoras na UFRJ, UTFSM e U. Bio-Bio apontam para a utilização da robótica para a impressão em argamassa e o desenvolvimento de estereotomia para estruturas de madeira. A descrição destas experiências pioneiras pretende contribuir para que os novos laboratórios possam pensar as suas atividades futuras num campo grande ainda por explorar.

As primeiras experiências em Robótica Criativa no Departamento de Arquitetura da Universidade Técnica Federico Santa María, no Chile, ocorreram no verão de 2013 (<https://vimeo.com/67483828>) no Centro Integrado de Manufatura e Automação CIMA, pertencente aos Departamentos de Engenharia Mecânica, Engenharia Industrial e Engenharia Eletrônica. Testaram o software KUKA PRC + Grasshopper para controlar um robô industrial KUKA KR125/2 com sistema operacional Windows 95 em que os dados foram inseridos no controlador do robô através de disquete de 3,5". Estes testes, pretendiam testar as capacidades da máquina-ferramenta e os 6 graus de liberdade do robô industrial para fabricação subtrativa de geometrias que exigem mais do que 3 graus de liberdade. Foram cortadas treliças deformadas em chapas finas de MDF, testando a geração de percursos

da ferramenta a partir de um ambiente de projeto paramétrico (<https://vimeo.com/77546947>). Para tal, foram modelados diagramas de Voronoi no Grasshopper com uma ferramenta orientada para usinar com 4º graus de liberdade. Em 2013, foi introduzida a Robótica Criativa em sala de aula por meio de uma oficina de arquitetura conduzida pelo professor visitante Mauro Chiarella (Chiarella et al., 2013). Em 2014, o Departamento de Arquitetura adquiriu o seu próprio robô KUKA KR6 AGILUS em segunda mão, e que por falta de um laboratório próprio ficou alojado no CIMA até 2022.

González, et al. (2014) receberam US \$128.578 para pesquisar e desenvolver uma solução para a reprodução robótica de elementos estruturais e ornamentais de geometria complexa, para restaurar e reabilitar patrimônio arquitetônico chileno existente em madeira. As principais conclusões estão descritas em González, et al. (2017). Um dos avaliadores externos do projeto foi Johannes Braumann (<https://vimeo.com/201585851>), que foi o pesquisador que desenvolveu o KUKA PRC. O projeto de P&D permitiu não apenas expandir a base de conhecimento, mas também o ferramental. Por fim, o projeto levou à criação de uma nova linha de pesquisa no Departamento de Arquitetura designada “carpintaria de montagem robótica” (<https://vimeo.com/243491176>). Neste novo cenário, a aplicação na construção de estruturas de madeira sem adição de aço nos encaixes, foram expandidas para um protótipo de habitação incremental (<https://vimeo.com/284061134>) e para um protótipo de uma ponte (<https://vimeo.com/232347071>). Em 2016, a UTFSM começou a ensinar os alunos de arquitetura do 4º e 5º semestre a programar robôs industriais em aplicações de estereotomia de madeira, somando até hoje mais de 400 alunos, a uma taxa de cerca de 60 alunos por ano. A pesquisa em marcenaria com montagem robótica permite aos arquitetos aprofundar o estudo de juntas de carpintaria, ou seja, as montagens de madeira publicadas em livro (González e Maino, 2019) com uma descrição detalhada da geometria construtiva de 22 classes de montagens e 5 classes de emendas encontradas na estrutura portante de edifícios construídos entre meados do séc. XIX e início do séc. XX na cidade de Valparaíso, no Chile.

Em 2018, graças a uma colaboração com a Universidad do Bío-Bío (García-Alvarado, 2018), foram adicionados ao Departamento de Arquitetura 2 robôs colaborativos UR5/CB3. Em virtude desta nova incorporação, em 2020 foi adquirido um HUSKY A200 UGV com um kit de integração para um UR5/CB3, que devido à pandemia de COVID-19 não pôde ser integrado até 2022. Entre 2020 e 2022 González, et al. (2020) conseguiram USD 217.047 para pesquisar e desenvolver uma solução robótica de carpintaria de montagem para a pré-fabricação in loco de soluções de habitações flexíveis em madeira nos processos de reconstrução do Serviço de Habitação e Desenvolvimento Urbano da Região de Valparaíso. Os UGVs integrados HUSKY A200 e UR5/CB3 permitem usinar madeira no canteiro de obras, mas o principal

objetivo do projeto é permitir a colaboração homem-robô usando visão de máquina, adquirindo a câmara ZIVID TWO 3D. Em 2021 é fundada a área Robots in Architecture (<https://arquitectura.usm.cl/robots-arquitectura>) e em 2022 é fundado o Robots in Architecture Laboratory em Valparaíso (<https://arquitectura.usm.cl/laboratorio-de-robots-en-arquitectura/>) e o Laboratório Robotizado de Construção e Manufatura em Santiago do Chile (<https://arquitectura.usm.cl/laboratorio-construccion-robotizada-manufactura>).



Figura 2. U. Bío-Bío, créditos laboratório dos autores.

A Universidade do Bío-Bío no Chile, instalou em 2019 um robô Kuka 120 R2500 destinado a experimentar a impressão 3D para construção, ligando o robô a uma bomba, e a uma betoneira de 120 litros, com uma mangueira de 8 metros, com grampo no atuador final do robô. <https://youtu.be/m5pZdxkvUlg> Colocou também na extremidade do robô um tubo de 10 litros com pistão impressão de peças menores de argila e terra. <https://youtu.be/LkRa9LcrdeU>

Para a impressão em argamassa, desenvolveu uma mistura com o apoio de indústrias locais, desenvolvendo um repertório de mobiliário urbano (Bos et al., 2022), de amostras de recifes artificiais e protótipos de paredes residenciais (Martínez-Rocamora et al., 2020), elaborando desenhos em Revit e Rhinoceros, programando as trajetórias com Kuka PRC. Foi importante considerar a utilização do canteiro para obras úmidas, com plataformas móveis e armazenamento de peças grandes, e a participação de dois ou três operadores para controlar o trabalho do robô e a bomba/misturador. Para aumentar o escopo de trabalho, está planejado instalar o robô num trilho de 7 metros, complementado com um pórtico de impressão grande, permitindo para além deste uso a preparação de maquetes de estudo (mockups) com impressão em argila para desenvolver os detalhes e processos de projeto <https://youtu.be/Px75V8INuPE>. Estas atividades foram desenvolvidas num projeto conjunto, em colaboração com o Departamento de Arquitetura da

Universidad Técnica Federico Santa María, que iniciou no Chile o uso de robôs nesta área. Outras tarefas testadas com este Robô foram levantar blocos, tendo sido desenvolvida uma pinça de madeira CNC com design de dupla tesoura para agarrar objetos por aproximação, dispensando a utilização de um motor elétrico. Este dispositivo, foi utilizado para levantar blocos de madeira e concreto e para a montar um sistema construtivo evitando esforços humanos, com execução precisa, mas flexível (García-Alvarado et al., 2020). <https://youtu.be/m5pZdxkvUlg>



Figura 3. LAMO, créditos laboratório dos autores

No caso do LAMO, o seu o robô industrial Kuka KR 120-270r chegou com apoio da FINEP no início de 2021, e pretende aprofundar uma linha iniciada pelo laboratório em 2013, com a primeira wiki-House da América do Sul (A. Passaro & Rohde, 2016), <https://vimeo.com/130312585> pavilhões em escala real (A. M. Passaro et al., 2019) <https://vimeo.com/288016937> e experiência com confecção de maquinas para impressão pastosa aditiva (Nóbrega et al., 2021) [www.facebook.com/LAMO3D/videos/1284993251645847](http://www.facebook.com/LAMO3D/videos/1284993251645847). O LAMO tem uma parceria com Rodrigo Garcia-Alvarado do U. Bío-Bío, Chile, há alguns anos (García-Alvarado et al., 2022), e tivemos o apoio de alguns consultores entre os quais José Pedro Sousa do DFL, com o seu projeto também no Sul Global (Sousa, 2015) e Eduardo Lopes (Lopes & Fonseca de Campos, 2019) além da equipe do projeto de pesquisa, agradecemos o apoio na preparação e montagem da unidade robótica de William Barbosa (Barbosa et al., 2020).

## 2 Unidade Robótica de Fabricação

Gramazio, F; Kohler (2014) consideram as unidades robóticas de acordo com diferentes configurações de uso de acordo com a pesquisa e aplicação,

entre as quais estão: Unidade Robótica de Fabricação; Unidade Robótica Container; Unidade Robótica de Prototipagem; Unidade Robótica de Fabricação in Situ; Unidade Robótica de Modelagem; Unidade Robótica de Produção. A descrição de cada uma requer mais espaço, pelo que optamos por aprofundar a instalação de uma Unidade Robótica de Fabricação, dando subsídios para a escolher o equipamento e acessórios. Para aprofundar o assunto consultar "Towards a Robot Architecture" de Daas & Wit (2018).

#### Compra

Os vendedores de robôs industriais da América Latina não parecem preparados a 100% para atender a complexidade que implica um laboratório de pesquisa de uma universidade. Os vendedores estão familiarizados com a indústria, mas menos com o conceito indústria 4.0, desta forma há o risco de se focarem o tempo todo em dimensionar “uma” necessidade para uma unidade, por exemplo algo como soldar uma mesma peça infinitas vezes, e toda a unidade gravita em torno da solda dessa peça. Na Europa, nos Estados Unidos e em outros países as faculdades de arquitetura estão desbravando possibilidades, atualmente há 107 instituições cadastradas somente na Association for Robots in Architecture, que abordamos atrás. Claro que há algumas outras que não estão cadastradas. Mas em todo caso não há nenhuma unidade na África, e de acordo com esta associação atualmente há apenas 5 unidades na América do Sul.

#### Valores

Uma outra situação perversa na hora da compra é relativa ao entendimento do que é um robô minimamente funcional. O Robô Industrial é somente parte de uma engrenagem das “Unidades”, pelo que é necessário um check-list aprofundado com alguém que tenha conhecimento do assunto. Se faltar alguma peça vai atrasar o funcionamento da unidade.

#### Editais manutenção

Uma outra questão importante na compra, que nem sempre é tida em conta, são os editais de manutenção de equipamentos de grande porte. No Brasil saiu recentemente um da FINEP, e para entrar neste edital o valor do equipamento deveria ser de no mínimo U\$100.000,00. Então na hora de comprar Braço e mesa posicionadora ou trilho e acessórios, procurem saber qual o valor desses editais nas vossas agências estaduais/federais, e verifiquem que o valor total da nota fiscal ultrapassa com alguma folga esse valor.

### **Software**

O software embarcado além de caro geralmente é desnecessário, atualmente a Association for Robots in Architecture desenvolveu um plugin para Grasshopper específico para os robôs da Kuka chamado de PRC (Parametric Robots Control), e há mais laboratórios construindo estes plugins geralmente gratuitos, ou com anuidades acessíveis para os laboratórios. Estes plugins permitem gerar, operar e simular o G-Code a partir do próprio Grasshopper agora embarcado dentro do Rhinoceros, algo em torno a U \$200,00 em comparação com valores entre US \$7.000,00 a US \$10.000,00 que os vendedores oferecem para tarefas específicas.

### **Acessórios**

As empresas fabricantes de robôs oferecem alguns acessórios, para automatizar a produção a partir das especificidades da produção (indústria 3.0) e os labs de fabricação geralmente desenham e executam os seus acessórios, ou compram peças separadas para os montar. No caso vale a pena estudo aprofundado sobre os acessórios necessários para o robô e solicitar um valor de aproximadamente metade do valor do braço robótico para este fim: Spindle, Finger elétrico e Finger pneumático, ventosa, solda, extrusor para impressão 3D de médio e grande porte, projetora de argamassa, etc.

### **Instalação**

Vale a pena também reservar uma outra verba igual a metade do custo do braço para a instalação. A instalação de maior custo é a elétrica, mas temos água, esgoto (se for executar impressão 3D em argamassa é importante ter uma caixa de areia), instalação pneumática, extrator de pó, ar comprimido, e base apropriada, geralmente para fixar o braço é necessário cravar estacas no solo para aguentar os diferentes momentos fletores.

### **Gaiola segurança**

É necessário garantir a segurança do local, geralmente uma gaiola ou sensores que parem a operação do braço quando alguém se aproximar. Há diversas normas, e os vendedores fazem questão em indicar todas as possibilidades. Mas para quem fez qualquer workshop abordando questões responsivas, via arduino, com sensores pode a partir de um DIY reduzir estes valores. O ideal é ter espaço, em local térreo para que o robô opere solto, com giro ampliado de 370° e com folga de passagem de 1m no mínimo, espaço para movimentar diferentes mesas de trabalho, para estocar a produção imediata, e eventualmente um equipamento de troca de ferramentas. A construção do local é uma atividade complexa e deve ser projetada com ajuda de alguém experiente.

Tabela 1. Unidade Fabricação Robótica

<b>item</b>	<b>Custo em dólares</b>
robô industrial	70.000,00 a 100.000,00
software	1.000,00 a 5.000,00
acessórios	2.000,00 a 10.000,00
instalações	15.000,00 a 35.000,00
gaiola de segurança	3.000,00
inicialização do robô	5.000,00
<b>total</b>	<b>124.000,00 a 154.000,00</b>

#### Robô industrial e unidade fabricação digital

Basicamente um laboratório de fabricação digital gira em torno de várias questões, sendo que os laboratórios aqui descritos, de acordo com a pesquisa Homo Faber (2015) são labs voltados para construção de pavilhões 1/1, e partilhamos a nossa perspetiva de acordo com essa experiência.

Como referido, há preferência pela marca KUKA relativamente a outras marcas porque os plug-ins de fonte aberta e o PRC foram originariamente desenvolvidos para esta marca. Hoje é possível encontrar plug-ins para outras marcas, mas há ainda um deserto em novidades. Para as tarefas de fabricação, visando escala 1/1 de pavilhões, o ideal é adquirir um robô parrudo dentro da linha Quantec. A nomenclatura é do tipo KR 120 R2700, onde:

KR = Kuka Roboter

120 = chamado pay load ou carga de trabalho, isto significa no senso comum que pode ser colocada uma ferramenta de trabalho com 120 quilos, ainda que no cálculo há que considerar atritos, etc.

R2700 significa um raio de trabalho do equipamento de 2,7m. Como referimos, a gaiola perfaz um quadrado de 5,40m de lado colocamos uma ferramenta numa área de uso de 6m, com a área de segurança de trânsito, dá no total um quadrado de 8m x 8m.

### 3 Discussão

Este artigo expõe um repertório de alternativas tecnológicas e considerações práticas para a implementação de uma unidade robótica para o ensino e pesquisa em arquitetura, promovendo mais do que uma visão técnica estrita, uma visão abrangente que inclui diferentes critérios que abaixo resumimos.

Os principais fabricantes de robôs industriais KUKA, ABB, UR, FANUC, produzem robôs semelhantes em termos de hardware, pensados como manipuladores para tarefas industriais repetitivas, em células de trabalho e ambientes estruturados, como na indústria automóvel. De acordo com a nossa experiência e de parceiros de outros países, o principal fator de diferenciação na escolha do robô é a possibilidade de utilizar programação visual, o que é dado pelo Kuka PRC ou HAL, que o torna mais amigável para a prática de arquitetos, designers e artistas.

Os robôs industriais não foram originalmente concebidos para funcionar como máquinas-ferramentas ou para servir um modelo de fabrico digital ágil baseado em CAD-CAM como o dos Fab Labs. O aprendizado com outras máquinas como cnc, cortadoras a laser e impressoras 3D, embora vinculados à cultura maker, não prepararam diretamente para a utilização de um robô industrial, dado o aumento de complexidade e dadas as suas especificidades. A implementação de equipamentos robóticos para o ensino de arquitetura enfrenta o dilema entre instalar um robô industrial maior, e mais dispendioso, para atividades de construção na escala real, mas em menor número, e a alternativa de vários robôs colaborativos menores, que permitem desenvolver mais atividades, envolvendo mais estudantes e pesquisadores. Independentemente da escolha, a melhor preparação para o uso criativo de robôs é ensinar design paramétrico, e programação visual e textual. Aprender a programar é considerado vital em diversas áreas e pode alterar o paradigma de projeto (Henriques et al, 2022).

Para organizar um laboratório de robótica criativa, como vimos, o robô industrial requer além de espaço, infraestruturas, formação e o desenvolvimento de ferramentas próprias. No fundo, a ideia recursiva de desenvolver máquinas (e códigos), que desenvolvem novas máquinas ou ferramentas. O robô industrial terá certamente um papel central na organização de novos espaços e das tarefas a realizar, sendo que no caso da expansão de laboratórios existentes é necessário integrar, não só no aspecto físico, mas de acordo com as capacidades e demandas existentes. Definir as ferramentas implica experimentar diferentes materiais, tarefas e acessórios, que devem estar associadas com ideias de desenvolvimento de projeto. O robô além de tarefas mecânicas pode também desenvolver atividades inteligentes, que requerem conhecimentos especializados, que também necessitam estar enquadrados no contexto de projeto. Para implementar uma unidade robótica são relevantes os conceitos da indústria 4.0 e estimular capacidades computacionais, para fomentar o desenvolvimento das nossas próprias capacidades robóticas, na arquitetura do Sul.

**Agradecimentos.** O LAMO-PROURB agradece a todos os colaboradores e o apoio FAPERJ, CNPq e MCTI/FINEP/CT-INFRA-04/2018. A Universidade de Bio-Bio teve o apoio da Comissão Nacional do Chile para Pesquisa Científica e Tecnológica, Fundo de Apoio ao Desenvolvimento Científico e

Tecnológico FONDECYT 1221730. A Universidade Técnica Federico Santa María de Valparaíso teve o apoio FONDEF ID20I10262.

## Referências

- Barbosa, W. S., Gioia, M. M., Natividade, V. G., Wanderley, R. F. F., Chaves, M. R., Gouvea, F. C., & Gonçalves, F. M. (2020). Industry 4.0: examples of the use of the robotic arm for digital manufacturing processes. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(4), 1569–1575. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00714-4>
- Bos, F. P., Menna, C., Praderna, M., Kreiger, E., da Silva, W. R. L., Rehman, A. U., Weger, D., Wolfs, R. J. M., Zhang, Y., Ferrara, L., & Mechtcherine, V. (2022). The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research*, 156, 106746. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746>
- Celani, G. (2020). Shortcut to the Fourth Industrial Revolution: The case of Latin America. In G. C. Henriques, J. P. Sousa, P. Gomez, & H. Achten (Eds.), *International Journal of Architectural Computing* (Vol. 18, Issue 4, p. 1478077120942193). SAGE. <https://doi.org/10.1177/1478077120942193>
- Chiarella, M., González, L. F., & Calvo, C. (2014). Robots: Automatización en Diseño y Construcción para la Enseñanza de Arquitectura. *XVII Congress Osf the Iberoamerican Society of Digital Graphics SIGraDi 2013*, 439–443. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2013-0084>
- Diez, T. (2012). Personal Fabrication: Fab Labs as Platforms for Citizen-Based Innovation, from Microcontrollers to Cities. *Nexus Network Journal*, 14(3). <https://doi.org/10.1007/s00004-012-0131-7>
- García-Alvarado, Rodrigo Garcia, Henriques, G. C., & Chiarella, M. (2022). Co-creating together: Ibero-American emergent collaborations in architecture and digital manufacture /Cocreación: colaboraciones iberoamericanas emergentes en arquitectura y en fabricación digital. *Arquitecturas Del Sur*, 40(61), 118–133. <https://doi.org/10.22320/07196466.2022.40.061.08>
- García-Alvarado, Rodrigo, Perez, A., Pulido, J. A., Ulloa, P., & Forcael, E. (2020). Assembly of Stay-In-Place Concrete Blocks Using a Robot. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503(1), 012077. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012077>
- Gershenfeld, N. (2012). How to Make Almost Anything: The Digital Fabrication Revolution. *Foreign Affairs*, 91(6), 90.
- González, L. F., & Maino, S. (2019). *Uniones carpinteras de Valparaíso: la geometría de ensambles y empalmes*. RIL editores.
- González Böhme, L. F., Quirral Zapata, F., & Maino Ansaldi, S. (2017). Roboticus tignarius: robotic reproduction of traditional timber joints for the reconstruction of the architectural heritage of Valparaíso. *Construction Robotics*, 1(1–4), 61–68. <https://doi.org/10.1007/s41693-017-0002-6>
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2014). *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*. Park Books AG.

- Henriques, G. C., Sousa, J. P., Gomez-Zamora, P., & Achten, H. (2020). Architecture in the age of the 4th industrial revolution I. *International Journal of Architectural Computing*, 18(4), 317–319. <https://doi.org/10.1177/1478077120950939>
- Henriques, G. C., Xavier, P. M., Silva, V. de L., Bispo, L. R., & Fraga, J. V. (2022). Computation for Architecture, hybrid visual and textual language: Research developments and considerations about the implementation of structural imperative and object-oriented paradigms. *International Journal of Architectural Computing*, 20(23), 200–250. <https://doi.org/10.1177/14780771221121829>
- Lopes, E., & Fonseca de Campos, P. (2019). Robotic Digital Fabrication of Lightweight Laminar Prefabricated Structures: The Dragados case study in 1990's. *12th International Symposium on Ferrocement and Thin Cement Composites: The Technology on a Human Scale – FERRO12At*, 1–10.
- Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Casanova-Medina, E., González-Böhme, L. F., & Auat-Cheein, F. (2020). Parametric Programming of 3D Printed Curved Walls for Cost-Efficient Building Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001811](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001811)
- Pacini, G. D., Passaro, A. M., & Henriques, G. C. (2019). Pavilhão FAB!t: proposta portátil para inserção da cultura maker no ensino tradicional. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, 14(1), 76–89. <https://doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148143>
- Passaro, A. M., Henriques, G. C., Sansão, A. S., & Tebaldi, I. (2019). Tornado Pavilion-Simplicity, almost nothing, but human expanded abilities. In José Pedro; Sousa, G. C. Henriques, & J. P. Xavier (Eds.), *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference* (pp. 305–314). eCAADe SIGraDi. [https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019\\_102](https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_102)
- Passaro, A., & Rohde, C. (2016). Casa Revista: arquitetura de fonte aberta. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, 11(2), 25. <https://doi.org/10.11606/gtp.v11i2.114437>
- Pupo, R. T. (2020). PRONTO Móvel – A Way of Transporting Creativity and Technology. In K. H. (Ed.), *Lecture Notes in Computer Science: Vol. 12213 LNCS* (pp. 308–317). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50537-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50537-0_23)
- Santos, B. de S. (2014). Epistemologies of the South: Justice Against Epistemicide. In *Epistemologies of the South*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315634876>
- Scheeren, R., Sperling, D., Herrera, P., Pacheco, P., & Vasconselos, T. (2018). *Homo Faber 2.0: Politics of Digital in Latin America* (1st ed.). IAU/USP. <http://www.sigradi2018.iau.usp.br/wp-content/uploads/2018/11/HomoFaber2.pdf>
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Penguin Random House.
- Sousa, José Pedro. (2015). *RobTech - Robotic Technologies for a Non-Standard Design and Construction in Architecture* (DFL-Digital Fabrication Lab). Faculdade Arquitectura do Porto. [https://issuu.com/jpsousa76/docs/robtech\\_pre-print\\_lr/1](https://issuu.com/jpsousa76/docs/robtech_pre-print_lr/1)
- Sperling, D., & Herrera, P. (2015). *Homo Faber: Digital Fabrication in Latin America*. Instituto de Arquitetura e Urbanismo.
- Wit, A., & Daas, M. (2018). *Towards a Robotic Architecture*. ORO Editions.