

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE PROJETO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

EDUARDO IGNACIO LOPES

O Concreto Digital e as novas materialidades da arquitetura contemporânea

São Paulo
2020

EDUARDO IGNACIO LOPES

O Concreto Digital e as novas materialidades da arquitetura contemporânea

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura do Departamento de Projeto da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Arquitetura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo E. Fonseca de Campos
Coorientador: Prof. Dr. José Pedro O. de Sousa

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM
RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DO(A) AUTOR(A) E
ANUÊNCIA DO(A) ORIENTADOR(A).

A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.

São Paulo, 09 de Julho de 2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Lopes, Eduardo Ignacio

O concreto digital e as novas materialidades da
arquitetura contemporânea / Eduardo Ignacio Lopes;
orientador Paulo Eduardo Fonseca de Campos. coorientador
Jose Pedro Sousa - São Paulo, 2020.
201.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Design e
Arquitetura.

1. Arquitetura. 2. Robôs Industriais. 3. Design. 4.
Computação Gráfica. I. Fonseca de Campos, Paulo Eduardo,
orient. II. Sousa, Jose Pedro, coorient. III. Título.

LOPES, Eduardo Ignacio. O Concreto Digital e as novas materialidades da arquitetura contemporânea. Tese (Doutorado) apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Arquitetura.

Aprovado em: 08 de Junho de 2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Paulo Eduardo Fonseca de Campos (orientador)
Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU USP

Assinatura_____

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

Assinatura_____

Prof. Dr. Jorge Roberto Lopes dos Santos
Instituição: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC RJ

Assinatura_____

Prof. Dr. Dorival Campos Rossi
Instituição: Universidade Estadual Paulista – UNESP Campus Bauru

Assinatura_____

Prof. Dr. Marcelo Silva Oliveira
Instituição: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU USP

Assinatura_____

Dedico esse trabalho aos meus pais, Paulo (*in memoriam*) e Leila, com gratidão por todo o amor e suporte oferecido ao longo de tantos anos e aos meus filhos, Arthur e Rosa, a quem espero poder inspirar na busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Apesar de apenas o meu nome estar na capa, não é possível dizer que fiz essa pesquisa sozinho. Ao longo dos últimos seis anos, muitas pessoas ajudaram esse trabalho a ser concluído. Algumas contribuíram diretamente, compartilhando com generosidade o seu saber sobre determinado assunto. Outras, em maior número, eram as que estavam ao meu lado nos momentos mais difíceis (que foram muitos), dando o suporte necessário para que eu pudesse chegar até aqui. A todas elas — mesmo sem citar todos os seus nomes — deixo aqui o meu mais sincero obrigado!

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Paulo E. Fonseca de Campos, pelo privilégio de nossa longa convivência, além de sua generosidade e compreensão.

À arquiteta e amiga Verônica Natividade, professora no curso de arquitetura da PUC-RJ, pela inestimável ajuda durante a etapa empírica dessa pesquisa. Sem a sua disposição — e também de seus alunos Marcelo Chaves e Suzana Bentes — esse trabalho não teria alcançado os mesmos resultados.

Agradeço também à amiga Rafaela Romitelli, pela paciência na revisão do texto e, mais importante, por nossas longas e profundas conversas.

Gostaria de destacar a ajuda recebida pelo Grupo Isorecort que, de forma generosa, doou grande parte do material para a realização do experimento, contribuindo para o avanço da ciência e tecnologia. Também é preciso ressaltar o apoio do CNPq, instituição pública à qual estive vinculado como bolsista, cuja colaboração foi imprescindível para a realização da pesquisa.

Agradeço imensamente à toda minha família, pela compreensão, suporte e paciência durante meus períodos de afastamento. Aos meus pais Leila e Paulo (in memoriam), minhas irmãs Denise e Valéria e minha querida sobrinha e parceira de alma artística, Livia, expresso a minha mais profunda gratidão.

Finalmente, sou eternamente grato à Stefania, pelo apoio incondicional e pela nossa parceria nessa jornada evolutiva.

There are 360 degrees, so why stick to one?

(HADID, Zaha, 2003)

RESUMO

Os recentes avanços alcançados na arquitetura, com o uso de software de modelagem paramétrica, ampliaram as possibilidades criativas do projeto, incorporando geometrias complexas ao seu repertório tradicional. Esta pesquisa apresenta um quadro de referência acerca do uso de ferramentas de criação e manufatura digitais, que possibilitam a materialização de projetos onde tais geometrias fazem parte de sua intenção arquitetônica.

Mais especificamente, aborda-se a fabricação de painéis leves de GRC (*Glassfibre Reinforced Concrete*) na última década, adotada como uma solução construtiva industrializada capaz de expressar uma complexidade formal até então inusitada, tendo como exemplo mais eloquente as obras recentes de Zaha Hadid. Entretanto, questiona-se que, embora o GFRC seja um material compósito avançado, sua produção permanece sendo relativamente artesanal e sua técnica pouco avançou em mais de meio século.

Esta pesquisa busca responder a esse aparente paradoxo por meio do emprego de ferramentas de fabricação digital, com ênfase nos braços robóticos industriais de 6 DOF (graus de liberdade, do termo em inglês “*Degrees Of Freedom*”), tendo como referência o trabalho seminal desenvolvido na década de 1990 pela equipe do Prof. Carlos Balaguer (*Division de Ingeniería de Sistemas y Automática da Universidad Politécnica de Madrid*) para a empresa espanhola Dragados y Construcciones. Apesar de demonstrar resultados expressivos com a automação de uma célula de produção de painéis de GRC, aquela pesquisa foi descontinuada em virtude das dificuldades de implantação à época.

Parte-se da hipótese que o atual estágio de desenvolvimento dos robôs industriais, aliado a novos programas acessíveis de modelagem paramétrica, permitem retomar de forma consistente essa linha de pesquisa.

Ao final, apresentam-se os resultados obtidos na realização de uma prova de conceito e propõe-se uma nova abordagem na produção robotizada de painéis leves de GRC, baseada no conceito *file-to-factory*, onde arquitetos e designers possam assumir uma posição de coordenação de projeto — da concepção à produção — contribuindo para o avanço da industrialização na arquitetura.

Palavras-chave: Arquitetura. Robótica. Fabricação digital. Arquitetura Industrializada

ABSTRACT

Recent architectural innovations, made possible by the use of parametric modeling software, have expanded the creative possibilities of the design, by including complex geometries in its historical repertoire. This research provides a background on digital creation and manufacturing tools, which enables the materialization of designs where these geometries are the core of the architectural intent.

Specifically, it addresses the manufacture of GRC (Glassfibre Reinforced Concrete) lightweight panels in the last decade, as an industrialized building solution that expresses an unprecedented formal complexity, with the most emblematic examples of Zaha Hadid's recent works. However, it is questionable that although GRC is an advanced composite material, its manufacture remains relatively handcrafted and its technique has made little progress in over half a century.

This research aims to respond to this apparent paradox through the use of digital manufacturing tools, with emphasis on the industrial robotic arms of 6 DOF (degrees of freedom), referring to the seminal work carried out in the 1990s by the team of Prof. Carlos Balaguer (Division of Systems Engineering and Automation of the Universidad Politecnica de Madrid) for the Spanish company Dragados y Construcciones. Despite demonstrating significant results with the automatization of a GRC panel production cell, that research was discontinued due to the challenges of implementation at the time.

It is assumed that the current stage of development of industrial robots, associated with new accessible software for parametric modeling, allows this area of research to be continued consistently. At the conclusion, we present the results obtained in the execution of a proof of concept and we propose a new approach in the robotized production of GRC light panels, based on the file-to-factory concept, where architects and designers can assume a position of project-coordination — from conception to production — contributing to the advance of industrialization in the architecture.

Keywords: Architecture. Robotics. Digital fabrication. Industrialized architecture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Cadeira Li-Quid (Alissa Andrasek, 2016)	18
Figura 2 - The Fish, Barcelona. (Frank O. Gehry, 1992)	19
Figura 3 - Projeto do Wexner Center for Visual and Fine Arts, Ohio (P. Eisenman, 1989)	24
Figura 4 - Layer Chair (Jens Dyvik, 2014)	26
Figura 5 - Personalizar a Habitação em Série (J.P.Duarte, 1999)	27
Figura 6 - Primeira fresadora NC construída no MIT (1950)	31
Figura 7 - Gráfico ilustrativo da redução de custos dos robôs industriais (2015)	34
Figura 8 - Aviso de segurança robô Kuka KR16-2	34
Figura 9 - Robô colaborativo trabalhando em linha de montagem	35
Figura 10 - Mapa com a localização de robôs na indústria criativa (2020)	36
Figura 11 - Fachada da vinícola Gantenbein, Suíça (Gramazio & Kohler, 2006)	37
Figura 12 - Pavilhões ICD Stuttgart (Achim Menges, 2011-2015)	39
Figura 13 - Ruled Concrete no DFL, Porto (José Pedro Sousa e Pedro Martins, 2015)	41
Figura 14 - Maxxi Museum of XXI Century Arts, Roma (Zaha Hadid, 1998-2009)	44
Figura 15 - Etapa da construção das formas para concreto armado.	45
Figura 16 - Roca Gallery, Londres (Zaha Hadid, 2009-2011)	47
Figura 17 - Heydar Aliyev Center, Baku (Zaha Hadid, 2007-2012)	48
Figura 18 - King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (Z. Hadid, 2009-2017)	49
Figura 19 - Fluxograma desenvolvimento da pesquisa	59
Figura 20 - Exemplo de desperdício na construção civil	63
Figura 21 - Habitação popular em Padre Miguel, Rio de Janeiro (1974-2019)	67
Figura 22 - Microfotografia mostra a corrosão em fibras de vidro AR	76
Figura 23 - Primeiros edifícios revestidos com painéis de GRC	78
Figura 24 - Processo de manufatura e obra construída com painéis de GRC (Premix)	81
Figura 25 - Equipamento de mistura da matriz cimentícia com fibra de vidro AR	82
Figura 26 - Materiais e equipamentos para processo <i>Spray-up</i>	83
Figura 27 - Projeção e compactação do GRC no processo <i>Spray-up</i>	84
Figura 28 - Projeção do <i>Sprayed Premix</i> sobre molde	87
Figura 29 - Tipologias de painéis leves GRC	88
Figura 30 - Tipos de abas em painéis leves de GRC	89
Figura 31 - Paineis de GRC com reforço metálico (<i>Stud frame</i>)	89
Figura 32 - Tipologia superfícies de painéis de GRC	91
Figura 33 - Fôrmas de madeira para painéis de GRC (<i>Spray-up</i>)	93

Figura 34 - Exemplos superfícies regradas	94
Figura 35 - Sub-estrutura moldes de madeira para GRC (<i>Spray-up</i>)	96
Figura 36 - Sistema de formas digitais adaptáveis para GRC	97
Figura 37 - Corte de EPS robotizado com fio quente	98
Figura 38 – Produção robotizada de painéis de GRC na empresa Dragados (1991)	100
Figura 39 - <i>Workstations vs Personal Computers</i> na década de 1990	107
Figura 40 - Manufatura aditiva com ligas metálicas	108
Figura 41 - Fachada Keller AG e unidade de fabricação robótica móvel (2012)	111
Figura 42 - Sistema de coordenadas e partes de um robô Kuka KR16-2	113
Figura 43 - Esquema de máquina CNC cartesiana	115
Figura 44 - Tecnologias de corte 2D	116
Figura 45 - Fabricação de fôrmas em EPS por meio da fresagem CNC	118
Figura 46 - Fluxo de trabalho manufatura aditiva	118
Figura 47 - Esquema de funcionamento equipamento FDM/FFF	119
Figura 48 - Trabalhos de pesquisa sobre manufatura aditiva na construção civil	121
Figura 49 - Planta pavimento-tipo Edifício Copan	132
Figura 50 - Uso do plugin <i>Brick Design</i>	133
Figura 51 - Resultados finais do exercício com o programa <i>Brick Design</i>	134
Figura 52 - Prototipagem em escala reduzida com braço robótico UR	135
Figura 53 - Unidade de fabricação robótica móvel (Keller AG)	136
Figura 54 - Checagem e finalização de parede fabricada pelo robô	137
Figura 55 - Fases do processo de desenvolvimento de um protótipo	141
Figura 56 - <i>Hardware</i> utilizado no aparato experimental	146
Figura 57 - Algoritmo paramétrico no Grasshopper para definição da superfície A	148
Figura 58 – Modelo tridimensional superfície A	149
Figura 59 - Modelo do molde em EPS (superfície A)	150
Figura 60 - Rotina de calibração do robô no Kuka prc	151
Figura 61 - Efeitos da variação de temperatura no fio durante o corte do EPS	152
Figura 62 - <i>End-effector</i> cortador de EPS a fio quente (PUC-RJ)	154
Figura 63 - Cortes robotizados no laboratório da PUC-RJ	154
Figura 64 - Perfis de corte para amostras de EPS	155
Figura 65 - Resultados testes cortes EPS com diferentes densidades	156
Figura 66 - Tabela de configuração dos parâmetros para corte do EPS (Jacobs Online)	159
Figura 67 - Ilustração equilíbrio térmico	160
Figura 68 - Simulação do robô para corte do molde final em EPS	164
Figura 69 - Cone de projeção e divisões U e V na superfície de projeção	166
Figura 70 - Definição dos caminhos de projeção horizontal e vertical (U e V)	170

Figura 71 - Simulação da projeção (<i>Spray-up</i>) do GRC sobre o painel (sentido U) _____	172
Figura 72 - Braço robótico projetando resina acrílica sobre molde de EPS _____	174
Figura 73 - Tipologias dos painéis utilizados no experimento _____	175
Figura 74 - Simulação da usinagem robotizada da forma em EPS (tipo B) _____	176
Figura 75 - Simulação da projeção no sentido U (esq.) e nas abas (dir.) painel tipo B ____	177
Figura 76 - Impressora 3D FFF de grande volume (1m ³) _____	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações do GRC na construção civil _____	79
Tabela 2 - Características Premix vs Spray-up _____	80
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens Premix _____	85
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens <i>Spray-up</i> _____	86
Tabela 5 - Tabela comparativa espessuras médias dos painéis (manual vs robô) _____	103
Tabela 6 - Tabela comparativa tempo de produção (manual vs robô) _____	105
Tabela 7 - Aumento do número de grupos de pesquisa sobre fabricação digital no Brasil _____	109
Tabela 8 - Tipos diferentes de protótipos dentro de um processo de criação _____	140
Tabela 9 - Etapas e sub-etapas do experimento _____	144
Tabela 10 - Densidades das amostras de EPS _____	145
Tabela 11 - Velocidades de corte do EPS para testes das amostras _____	155
Tabela 12 - Projeção temperatura do fio de Nicromo vs tensão aplicada (V) _____	163

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas Dimensões ou Bidimensional
3D	Três Dimensões ou Tridimensional
3DCP	<i>3D Concrete Printing</i>
AR	Álcali Resistente
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DOF	<i>Degrees of Freedom</i>
EPS	Poliestireno expandido
ETH	<i>Eidgenössische Technische Hochschule</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
GRC	<i>Glassfibre Reinforced Concrete</i>
HWC	<i>Hot Wire Cutting</i>
MA	Manufatura Aditiva
MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i>
NC	<i>Numeric Control</i>
NURBS	<i>Non Uniform B-Splines</i>
PoC	<i>Proof of Concept</i>
RHWC	<i>Robotic Hot Wire Cutting</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.1 Introdução	17
1.2 Colocação do problema	21
1.2.1 A expansão da atividade projetual e a sua dissociação com a matéria	21
1.2.2 O projeto digital	22
1.2.3 A fabricação digital e a “standardização virtual”	27
1.2.4 Os robôs industriais	33
2 CAMPO OBJETO E METODOLOGIA	43
2.1 Campo objeto	43
2.1.1 Objetivos da pesquisa	54
2.1.2 Formulação da proposição	55
2.2 Metodologia	59
3 EMBASAMENTO TEÓRICO	62
3.1 Arquitetura industrializada	65
3.2 O Material	68
3.3 O GRC	73
3.4 O processo de manufatura do GRC	100
3.5 A produção digital: desenho e manufatura	107
3.5.1 Robôs na arquitetura	112
3.5.2 Os processos de fabricação digital	114
3.6 Um novo processo de produção	124
4 BASE EMPÍRICA	126
4.1 Entrevista Prof. Carlos Balaguer	127
4.1.1 Principais pontos	127
4.2 Trabalhos preliminares de campo	130
4.2.1 Workshop Brick Design	130
4.3 Constatações	137
4.4 Prova de conceito	140

5 ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE A FABRICAÇÃO ROBOTIZADA COM GRC	143
5.1 Descrição dos materiais e ferramentas utilizados	145
5.2 Etapa 1 — Molde	147
5.2.1 Criação da superfície regradada por meio da modelagem digital	147
5.2.2 Projeto da fôrma em EPS	149
5.2.3 Corte robotizado e montagem da forma em EPS	150
5.3 Etapa 2 — Projeção	164
5.3.1 Definição das restrições e parâmetros para a projeção	165
5.3.2 Definição dos caminhos para a simulação da projeção do GRC sobre a forma em EPS	169
5.3.3 Simulação da projeção (spray-up) do GRC	171
5.4 Etapa 3 — Simulações alternativas em ambiente virtual	174
5.5 Resumo e principais resultados dos ensaios	177
5.5.1 Modelagem das superfícies	177
5.5.2 Produção das fôrmas em EPS	178
5.5.3 Simulação da projeção do GRC	179
6 CONCLUSÕES	181
6.1 Futuros desdobramentos e questões em aberto	181
6.2 Novas materialidades	183
6.3 Os artesãos e os “Master Builders” digitais	187
6.4 Novos paradigmas	189
7 REFERÊNCIAS	193

1 INTRODUÇÃO E COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

1.1 Introdução

Arquitetura é antes de mais nada construção, mas, construção concebida com o propósito primordial de ordenar e organizar o espaço para determinada finalidade e visando a determinada intenção.

(COSTA, 1995)

Essa pesquisa aborda o estudo e a caracterização de novas possibilidades de materialização de formas, ideias, conceitos e representações, presentes na arquitetura e design contemporâneos, que são gerados através de ferramentas digitais de concepção. Entretanto, não se trata aqui de projetos¹ cuja criação se deu sob métodos convencionais e que depois foram traduzidos para o universo digital, apenas como forma de otimização de processos produtivos, mas sim daqueles cuja origem é intrinsecamente ligada à lógica computacional e que, sem o auxílio destas ferramentas, não existiriam.

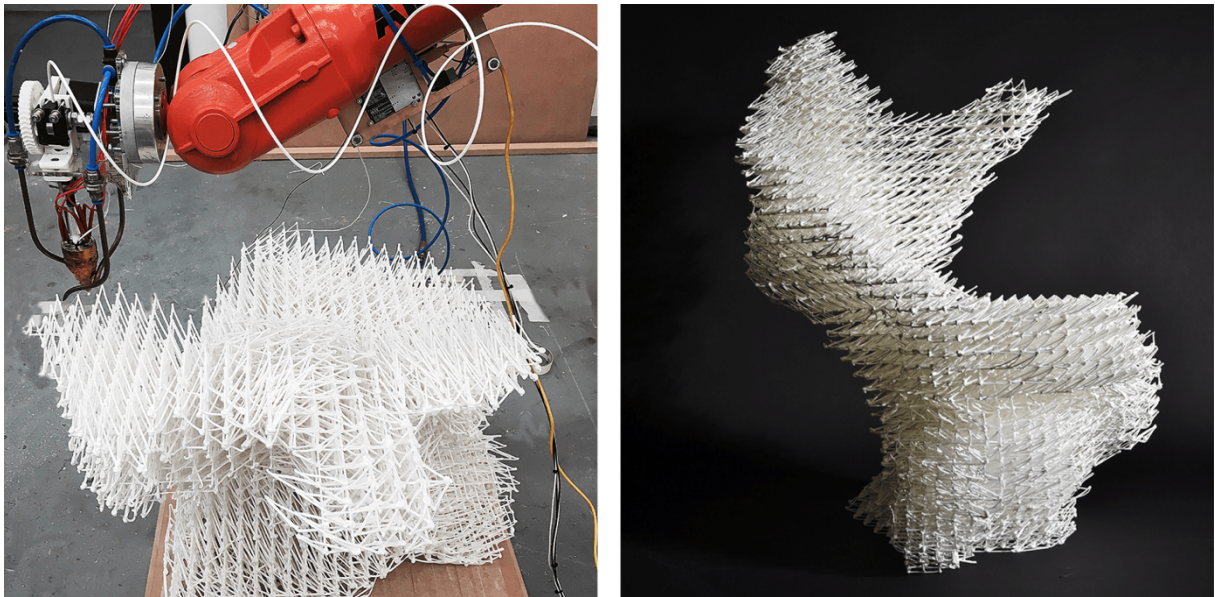
Se até o início da década de 1960 os arquitetos possuíam basicamente as mesmas ferramentas de representação de suas ideias que seus pares no Renascimento, hoje é possível projetar com o auxílio de software de modelagem baseados em NURBS², processos paramétricos, programação visual de algoritmos, scripts generativos, análise de desempenho, variações topológicas da forma, entre outros.

¹ Na língua portuguesa o verbo projetar tem um significado amplo, englobando desde a criação de conceitos e ideias até a organização sistemática das etapas de trabalho projetual. Em inglês existe uma distinção entre o design, isto é a forma do objeto (incluindo todo o processo que levou até a sua criação) e o project, que está relacionado ao gerenciamento da informação. Nesse trabalho, sempre que se mencionar a palavra projeto se estará fazendo referência ao design.

² Acrônimo em inglês representando a definição de Non-Uniform Rational B-splines. Software baseados em geometrias NURBS são essenciais para a representação ou criação de superfícies complexas ou cuja geometria fundamental seja não-euclidiana.

Figura 1- Cadeira Li-Quid (Alissa Andrasek, 2016)

Projetada com o uso de algoritmos paramétricos que simulam a física de partículas



Fonte: site da artista³

A disseminação e a simplificação do uso destas ferramentas digitais, que permitem conceber geometrias extremamente complexas — e visualmente instigantes —, fazem com que os modelos e as representações de ideias e conceitos muitas vezes possuam pouca ou nenhuma conexão com o mundo físico e as suas restrições materiais. Ao adotarmos como verdadeiro o conceito de que arquitetura é, antes de mais nada, construção, pode-se definir que esse trabalho se ocupa dos processos projetuais — seja em arquitetura ou design — nos quais a sua finalidade é a materialização de suas representações e modelos em um objeto físico, real e tangível.

Para traçar com maior precisão o recorte do campo objeto deste trabalho, faz-se necessário definir primeiramente o que se entende como sendo “geometria complexa” e os limites do termo “contemporâneo”. Segundo Pottmann (FLÖRY; POTTMANN, 2010), sob o ponto de vista geométrico, a complexidade de uma forma pode ser medida pela análise de sua curvatura. De maneira simplificada é possível dividir as superfícies em três tipos, em grau crescente de complexidade: plana, de curvatura simples (*developable* ou desenvolvível) ou de dupla-curvatura (que podem ser uniformes ou de forma-livre). Dentro do grupo de superfícies de dupla curvatura

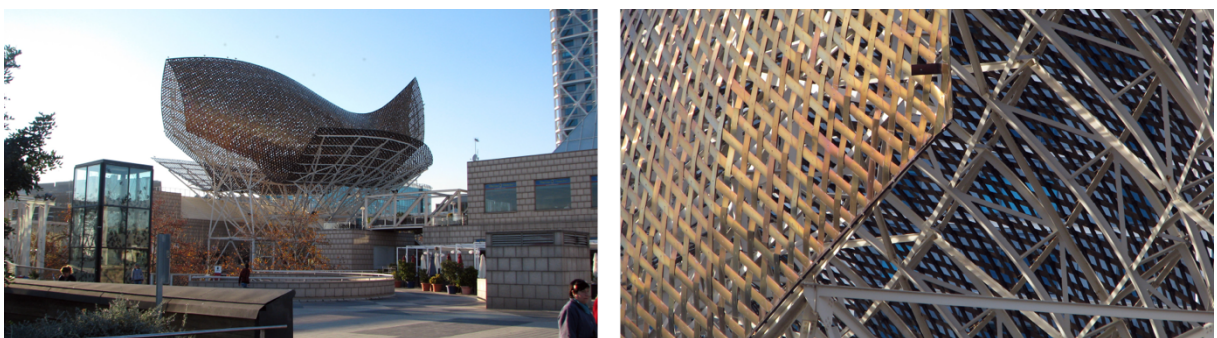
³ Disponível em: <https://www.alisaandrasedk.com/projects/li-liquid>. Acesso em: 01/03/2020.

— que seriam as mais complexas, portanto as que mais se aproximam das formas-livres — emerge uma categoria importante para essa tese, que são as superfícies regradas (*ruled surfaces* em inglês).

O que torna as superfícies regradas particularmente interessantes para a materialização de geometrias complexas na arquitetura é a sua propriedade de serem desenvolvíveis (apesar de possuírem dupla-curvatura). Isso significa que essas superfícies complexas podem ser planificadas (simplificadas ou racionalizadas) sem alterar as características do material, o que simplifica muito o seu processo de manufatura. Esse assunto será apresentado de forma mais detalhada no capítulo IV.

O uso dos termos geometria complexa ou não-standard ou ainda arquitetura de forma-livre⁴ tornou-se amplamente difundido na arquitetura quando se descrevem formas não convencionais, mais próximas à certas formas orgânicas encontradas na natureza. Embora esse emprego não seja absolutamente correto em termos matemáticos, os mesmos serão utilizados aqui como sinônimos de formas que dificilmente podem ser representadas para a sua construção utilizando-se apenas as suas projeções ortogonais tradicionais⁵ e que cujas partes são formadas por elementos distintos, com nenhuma ou pouca repetição.

Figura 2 - The Fish, Barcelona. (Frank O. Gehry, 1992)



Fonte: flickr⁶

⁴ Tradução livre do termo em inglês *free-form architecture*.

⁵ Qualquer forma, seja ela complexa ou não, pode em tese ser representada e construída por meio de suas representações ortogonais, mas, na prática, para a materialização de geometrias complexas esse modelo torna-se pouco viável.

⁶ Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/markjacob>. Acesso em 01/03/2020.

Para a definição de arquitetura contemporânea e dos projetos que serão analisados na pesquisa, definiu-se um recorte temporal que vai do início da década de 1990 até o final da primeira década do século XXI. Não por acaso, esse período coincide com o início e a consolidação do emprego de ferramentas digitais para a criação na arquitetura, até a sua presença ubíqua nos dias de hoje.

Por fim, conforme indica Serra (SERRA, 2006)⁷, acredita-se ser importante explicitar que os motivos da escolha dos campos do projeto e fabricação digitais como temas centrais da tese devem-se a experiência pessoal do pesquisador na área, que desenvolve pesquisa, projeto e aplicação prática de ferramentas digitais de concepção e fabricação desde a metade da década de 1990. O corpo principal desta produção experimental culminou com o convite para a participação na 4a Bienal Internacional de Arquitetura de São Paulo, na sala especial "Arquitetura Virtual" onde os trabalhos foram expostos juntamente com outros arquitetos que atuam no campo do projeto digital, tais como Kas Oosterhuis e Ilona Lénárd, Marcos Novak, Lars Spuybroek, entre outros.

Essa experiência acumulada trouxe a base que originou uma das perguntas geradoras desta tese: como seria possível materializar em forma de arquitetura as geometrias complexas criadas por meio destas novas ferramentas?

⁷ “O tema em torno do qual se desenvolverá a pesquisa deve ter uma história para o pesquisador, isto é, em momentos pretéritos esteve ele já envolvido com o assunto, quer academicamente, quer na sua prática profissional”(SERRA, 2006, p. 46)

1.2 Colocação do problema

1.2.1 A expansão da atividade projetual e a sua dissociação com a matéria

A distinção entre mente e matéria tem um papel fundamental durante toda a história da arquitetura no Ocidente. De Vitruvius a Le Corbusier, a separação existente entre uma ideia de espaço ou edifício e a sua materialidade é uma questão constantemente presente. Entretanto, é possível destacar um ponto crucial no desenvolvimento da atividade projetual, quando Leon Battista Alberti define, em seu tratado *De re Aedificatoria* (ALBERTI, 2011), publicado em 1486, o conceito de *lineamenta*. Alberti discorre que por meio de desenhos (*lineamenta*), o arquiteto “escolhe os locais mais apropriados, seus números exatos, escalas corretas e toda a ordem graciosa de uma construção e de suas partes” e esse processo resulta em que “toda a forma a aparência de uma construção pode depender apenas de seu delineamento”. O arquiteto passa assim a operar de forma cada vez mais aprofundada em um plano mental, em oposição ao “mestre carpinteiro” (*Arkhitékton*) da tradição medieval e ao fazer mecânico.

Amparada pela disseminação do uso do papel (FEBVRE; MARTIN, 1997) e pelo desenvolvimento da perspectiva exata (KATINSKY, 1990) como método de representação de arquitetura, a atividade intelectual do arquiteto que passa pelo desígnio, o projeto, tem a sua importância alçada a um grau que não se observava em outros momentos da história. Assim, como arte liberal, em conjunto com a retórica e a aritmética, incorpora-se mais claramente na arquitetura o caráter de linguagem e de representação, separando-se cada vez mais da técnica de construção.

Essa dissociação ganha caráter de quase oposição ainda na segunda metade do séc. XIX, com o surgimento dos profissionais especializados em engenharia e construção, que passam a utilizar as representações arquitetônicas como instrumento legal e contratual para a execução de suas obras (KOLAREVIC, 2001) .

Desse ponto da história até os dias de hoje, a representação dos edifícios ganha tamanha importância que o arquiteto definitivamente passa a se preocupar quase que exclusivamente com as suas obrigações e responsabilidades formais

perante o projeto — agora o seu objetivo primeiro — afastando-o cada vez mais do contato direto com a materialidade da obra. Essa separação ganha contornos ainda mais definidos na medida em que as ferramentas digitais começam a ser empregadas na produção de projetos.

1.2.2 O projeto digital

Segundo Eisenman (EISENMAN, 1993) a arquitetura não mudou significativamente seu modo de operar a realidade nos últimos cinco séculos. A mudança anunciada pelo movimento moderno teria sido apenas mais um capítulo na sucessão de estilos que ocorreu desde a Renascença, sem romper com a tradição figurativa da arquitetura.

Nota-se que em diversos ramos das artes e das ciências exatas existe uma rápida apropriação de conceitos inerentes ao mundo contemporâneo, tais como: conectividade, multiplicidade, *mass-customization*, informação em tempo real. Enquanto isso, os arquitetos — que operam entre esses dois campos do conhecimento — continuam em sua maioria concebendo seus projetos de maneira tradicional, lenta e pouco integrada, mesmo quando amparados pelo uso de computadores (GANE, 2004).

Para que se possa conceber a arquitetura dentro de um contexto contemporâneo, que opere dentro de um paradigma fundamentalmente digital, o uso intrínseco do computador como ferramenta de criação torna-se essencial.

Desde os primeiros momentos da criação, o arquiteto se depara com a escolha e seleção de uma série de restrições contextuais — do sítio, programáticas, legais, de desempenho — que vão conduzir o objeto do projeto a sua forma final (ALEXANDER, 1964). A oportunidade de contar com ferramentas que não apenas permitam abarcar um maior número dessas variáveis desde o início, mas que também possibilitem a visualização de um sem número de alternativas em tempo real, tem um enorme impacto na maneira de criar o espaço arquitetônico.

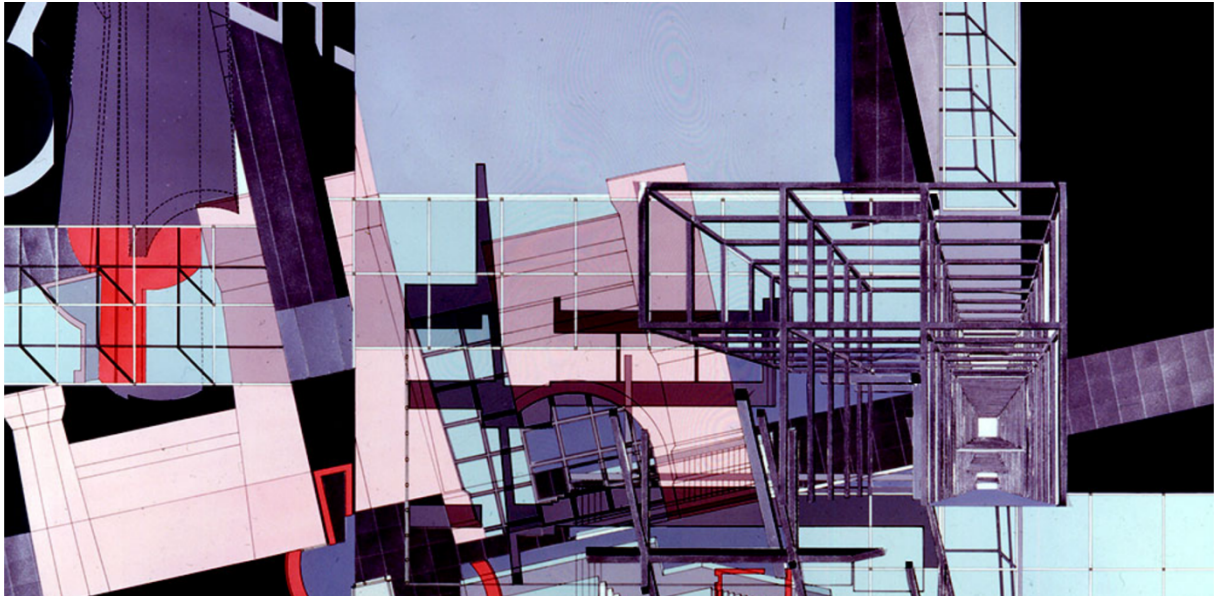
Foi nos primeiros anos da década de 1960 que ocorreram os primeiros passos no sentido da apropriação do uso de tecnologias digitais no campo do projeto. Em 1963, Ivan Sutherland defendeu no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) a sua tese de doutorado intitulada “*SketchPad: A man-machine graphical communication system*”, onde o mesmo apresentava a criação de um *hardware* e *software* que deram origem aos atuais sistemas de desenho auxiliado por computador⁸ (SUTHERLAND, 1964). Enquanto isso, Christofer Alexander avançava no estudo da metodologia de projeto, escrevendo sobre a criação de padrões e suas bases algorítmicas, que seria um dos fundamentos do campo da gramática da forma e do uso de programas de computador nas etapas de concepção (ALEXANDER, 1964).

A partir da década de 1980, com a propagação da chamada revolução digital, onde a tecnologia de base analógica e mecânica deu lugar aos sistemas digitais microprocessados, o uso de computadores na arquitetura tornou-se imperativo. Somado ao aumento exponencial na capacidade de processamento das máquinas e a difusão da Internet, o aparecimento de novos programas paramétricos, scripts generativos, e linguagens visuais de programação computacional, trouxe ao arquiteto novas ferramentas de trabalho que lhe possibilitam realizar uma efetiva mudança na maneira de conceber o projeto (KOLAREVIC; MALKAWI, 2005).

Os primeiros softwares capazes de lidar com geometrias complexas foram criados para serem utilizados na indústria aeroespacial. Empregando as contribuições do matemático Pierre Bézier, trouxeram para o campo digital a prática de projeto já há muito estabelecida na indústria naval, com o uso de *splines*.

⁸ No campo da arquitetura digital, o termo “desenho auxiliado por computador” é mais comumente utilizado em sua versão em inglês “Computer Aided Design (CAD)”, que será utilizada nesse trabalho de agora em diante.

Figura 3 - Projeto do Wexner Center for Visual and Fine Arts, Ohio (P. Eisenman, 1989)



Fonte: site do autor⁹

Esse grande aumento na capacidade de processamento tornou possível muito mais do que apenas otimizar processos de desenho, já que agora as tarefas mecânicas de copiar, apagar ou redesenhar se tornam ações extremamente simples (PIEDMONT-PALLADINO, 2007) . Além disso, a grande quantidade e diversidade das ferramentas digitais disponibilizadas nos últimos vinte anos faz com que, se ampliem os antigos limites formais ditados pelas ferramentas (PIEDMONT-PALLADINO, 2007) ou pela geometria euclidiana (SCHUMACHER, 2012), que até então eram as bases da concepção de qualquer ato projetual.

Nesse contexto surgiram novas ferramentas que dão ao arquiteto ou designer a capacidade de gerar geometrias complexas, euclidianas ou não, desde os primeiros momentos da criação. Além disso, com a utilização de software ou programação paramétricos, as possibilidades de iteração na geração de soluções formais tornam-se virtualmente infinitas.

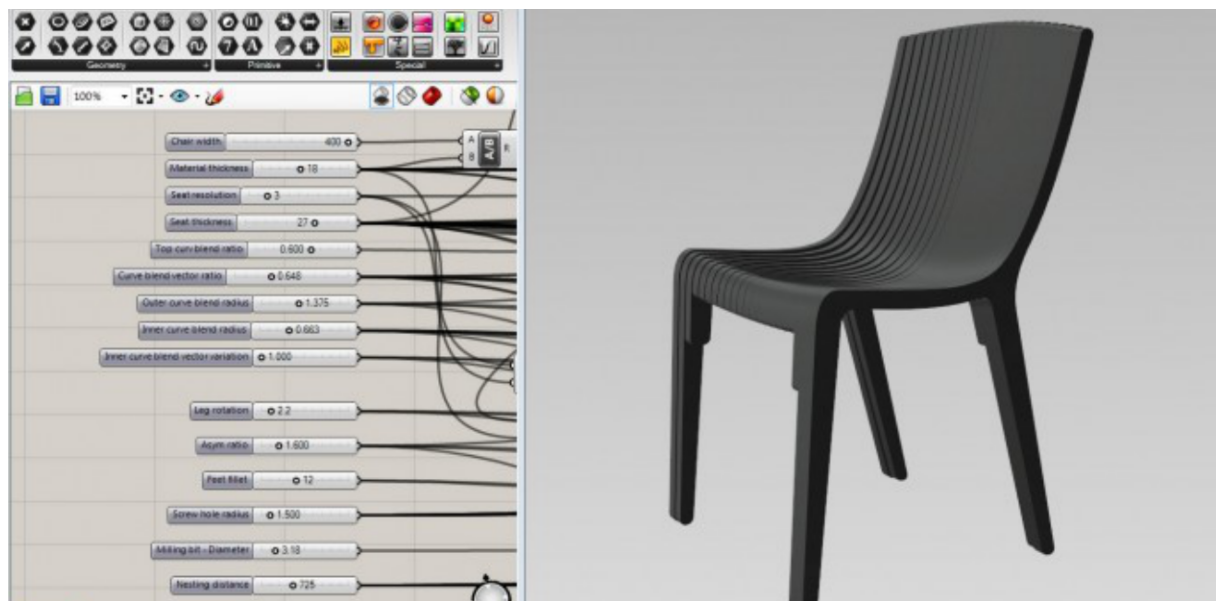
⁹ Disponível em <https://eisenmanarchitects.com/Wexner-Center-for-the-Visual-Arts-and-Fine-Arts-Library-1989>. Acesso em: 01/03/2020.

Segundo Killian (KILLIAN, A. apud GANE, 2004), o design paramétrico é o processo que implica em projetar um sistema que determina um espaço que pode ser explorado através da variação de seus parâmetros intrínsecos, mais usualmente os dimensionais, de escala e orientação. Logo, o uso de programas paramétricos possibilita que, ao invés de projetarmos uma forma final, projetamos o sistema de criação desta forma, ou seu algoritmo de criação. Uma vez pronto o algoritmo, basta ajustarmos as suas variáveis para que obtenhamos alternativas formais diferentes, de modo instantâneo.

Não faz parte do escopo desta pesquisa a explicação detalhada sobre o funcionamento dos diferentes softwares e *plug-ins* utilizados atualmente, mas para ilustrar de forma prática como as ferramentas paramétricas de fato ampliam os limites de criação dos arquitetos e designers, tomemos como exemplo o projeto da *Layer Chair*, do designer norueguês Jens Dyvik (Fig. 4).

Nesse projeto foi utilizada uma ferramenta de design paramétrico — nesse caso o *plug-in* Grasshopper, que funciona em conjunto com o software *Rhino 3D*. Ao invés de criar o desenho da geometria do objeto final pretendido — que seria a aproximação tradicional a um problema de projeto — o designer cria um algoritmo, ou um conjunto de informações e comandos encadeados de maneira hierárquica, que contém todas as etapas da sua construção geométrica e que definirá a própria forma final. Essa aproximação permite que, ao se alterar qualquer parâmetro (dentro daqueles que o designer define a priori que podem ser alterados), novas formas são geradas automaticamente de acordo com as modificações realizadas. O mesmo algoritmo (ou projeto) contém todas as variações possíveis para a mesma cadeira, sem a necessidade de redesenho manual da geometria para cada uma das alterações dos parâmetros.

Figura 4 - Layer Chair (Jens Dyvik, 2014)



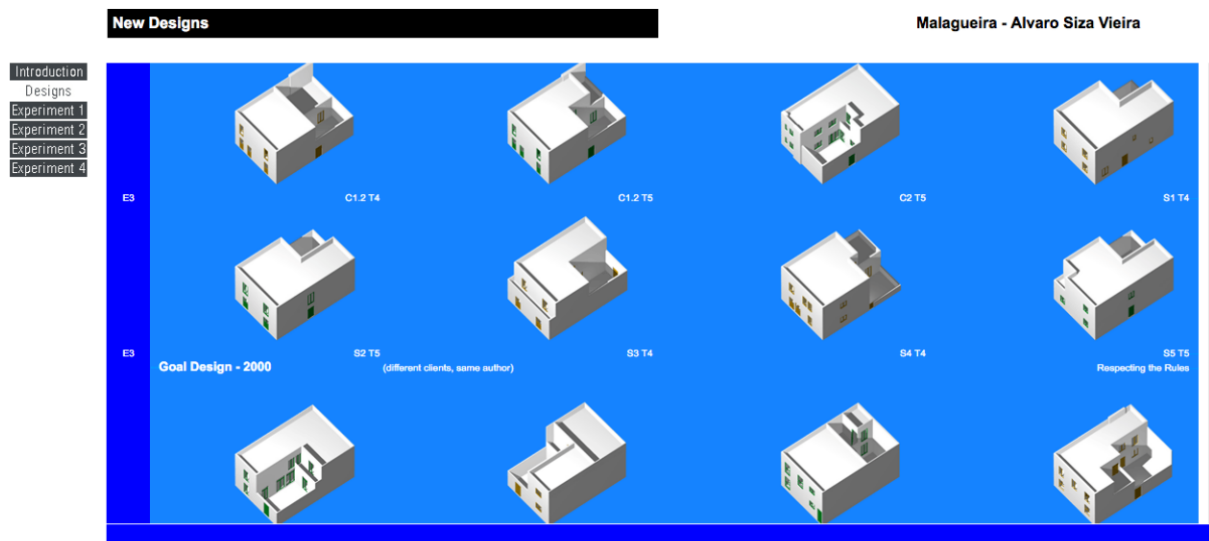
Fonte: site do autor¹⁰

Se acreditamos que, para se resolver um problema de design, é importante que haja a possibilidade de uma criação sistemática de diferentes variantes desse problema, (BONSIEPE, 1986; MUNARI, 2002) o uso de computadores passa a ser nesse momento um aliado do projetista.

Outro exemplo que discorre sobre uma abordagem paramétrica de projeto é a tese de doutorado do Prof. Dr. José Pinto Duarte defendida no MIT em 2001 (DUARTE, 2007) (Fig. 5). Em seu trabalho Duarte desenvolve uma estrutura computacional, baseada na análise da gramática da forma do projeto do conjunto habitacional da Malagueira, do arquiteto português Alvaro Siza. A intenção do sistema é procurar satisfazer plenamente as necessidades do usuário (função, estética e custo), alcançando uma alta qualidade de projeto a um custo acessível, o que não é a regra em projetos de grandes conjuntos habitacionais, que são o *corpus* daquela pesquisa. Esse objetivo é alcançado por meio de um programa de computador, onde as condicionantes e qualidades do projeto eram os dados de entrada, gerando — com base nas formas originalmente pensadas por Siza — um grande número de soluções formais personalizadas, o que seria inviável por meio de um projeto convencional.

¹⁰ Disponível em <http://www.dyvikdesign.com/site/portfolio-jens/the-layer-chair-amsterdam-edit>. Acesso em 01/03/2020

Figura 5 - Personalizar a Habitação em Série (J.P.Duarte, 1999)



Fonte: site do projeto¹¹

É importante salientar que o enfrentamento das questões pertinentes ao projeto e à produção de geometrias complexas como método de expressão arquitetônica vai além do que servir apenas como suporte para um certo formalismo digital. A possibilidade de criar formas de maneira altamente customizada, amplia o ferramental disponível para se responder a questões complexas, tais como as demandadas pelos programas de uma sociedade e cultura contemporâneos e por fatores ambientais e materiais, como nunca antes fora possível na história da construção.

É a partir desta conclusão que voltamos ao ponto de início: como trazer essas ideias, nascidas e criadas no meio virtual, para o mundo material?

1.2.3 A fabricação digital e a “estandardização virtual”

O uso do computador e de programas de modelagem tridimensional como ferramentas de criação em arquitetura faz com que o tempo gasto na concepção de projetos seja cada vez menor, permitindo a exploração de soluções e geometrias

¹¹ Disponível em: <http://home.fa.utl.pt/~jduarte/malag/Malag/index.html>. Acesso em 01/03/2020.

complexas de forma cada vez mais simples. Entretanto, um dos grandes problemas encontrados nessa nova dinâmica de projeto é que o avanço das tecnologias de construção mais utilizadas não acompanha o grau de desenvolvimento dos sistemas de Computer Aided Design (CAD) e Computer Aided Manufacturing (CAM)¹². Criamos com ferramentas digitais, mas a materialização dessas criações — especialmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil — ainda é realizada com técnicas similares às empregadas há cem anos. Além disso, mesmo contando com um parque industrial relativamente desenvolvido, o Brasil possui baixos índices de industrialização na construção civil (CORRÊA et al., 2010).

Devido a uma série de fatores, que vão desde a autossuficiência precoce na produção de cimento Portland ao modelo da matriz siderúrgica implantada no país no pós-guerra (voltada para a produção de veículos) passando pela baixa remuneração e especialização de sua mão de obra, o Brasil avança lentamente no campo da industrialização da construção civil.

O consumo de cimento na indústria da pré-fabricação por exemplo, historicamente está situado na faixa de 5%, enquanto em alguns países europeus esse índice é de cerca de 40%. O uso de elementos pré-fabricados de concreto no País ainda se concentra fortemente na construção de estruturas de ciclo fechado¹³ tais como shoppings, galpões industriais e obras de infraestrutura, limitando o seu uso em grandes obras onde a repetição de elementos estruturais é economicamente vantajosa.

Como será visto com mais detalhes no capítulo V, por meio do emprego da

¹² Sigla em inglês para Manufatura Auxiliada por Computador

¹³ Salas (1988) considera que a evolução do uso dos pré-fabricados de concreto ocorreu em três fases:

De 1950 a 1970 — Edifícios compostos de elementos pré-fabricados, com peças provenientes de apenas um mesmo fabricante, constituindo o que se convencionou chamar por ciclo fechado de produção.

De 1970 a 1980 — Início do declínio dos sistemas pré-fabricados de ciclo fechado, devido a problemas e acidentes envolvendo grandes estruturas.

Pós 1980 — Consolidação dos sistemas pré-fabricados de “ciclos abertos”, que poderiam ser associados a produtos de diferentes fabricantes, onde a padronização dos componentes estabelece a compatibilidade entre os elementos e seus subsistemas.

fabricação digital, é possível alcançar graus de customização elevados, tornando viável a produção de peças complexas, mesmo na escala de uma simples unidade, contrariando os princípios de estandardização estabelecidos dos processos industriais convencionais. Segundo Fonseca de Campos, esse processo de transformação do paradigma industrial, advindo do uso de tecnologias digitais de manufatura, pode ser chamado de “estandardização virtual”, uma vez que as máquinas não mais operam com moldes fixos, configuradas para reproduzir peças de forma repetida e em grande escala, mas sim com “moldes virtuais”, arquivos digitais que servem como base do processo de fabricação.

A ligação entre a concepção e a materialização de objetos arquitetônicos na era da revolução digital é aprofundada no trabalho de Kolarevic, que afirma:

“The digital age has radically reconfigured the relationship between conception and production, creating a direct link between what can be conceived and that can be constructed. Building projects today are not only born out digitally, but they are also realized digitally through “file-to-factory” processes of computer numerically controlled (CNC) fabrication technologies” (KOLAREVIC, 2001, p. 31).

Dessa forma, os sistemas de desenho e fabricação digitais permitem — de forma paradoxal — que o arquiteto volte a se aproximar da materialidade da construção, uma vez que os modelos digitais utilizados na concepção são agora utilizados para o cálculo estrutural e também para a própria fabricação da obra. Esse *continuum* digital, segundo o termo cunhado pelo próprio autor, torna os arquitetos contemporâneos mais próximos aos *master builders* da renascença, pois os mesmos voltam a ter o controle de todo o processo, da criação à sua materialização.

Contexto histórico

Ao contrário do que indica o senso comum, as ferramentas de fabricação digital ou, mais precisamente, os equipamentos que operam através de controle numérico computadorizado (CNC), não são frutos de uma tecnologia recente, sendo que alguns possuem mais de 60 anos de existência.

Após a segunda guerra, devido aos esforços de mobilização para um eventual conflito contra a União Soviética no período da Guerra Fria, a indústria de máquinas, automação e eletrônica se desenvolveu fortemente devido aos avanços em pesquisa nos grandes centros universitários, financiados pela indústria militar (NOBLE, 2011). A primeira fresadora de controle numérico (NC¹⁴, do termo em inglês Numeric Control) surgiu no início da década de 1950 no MIT com o intuito de produzir peças de geometria complexa para a indústria aeroespacial (Fig. 6).

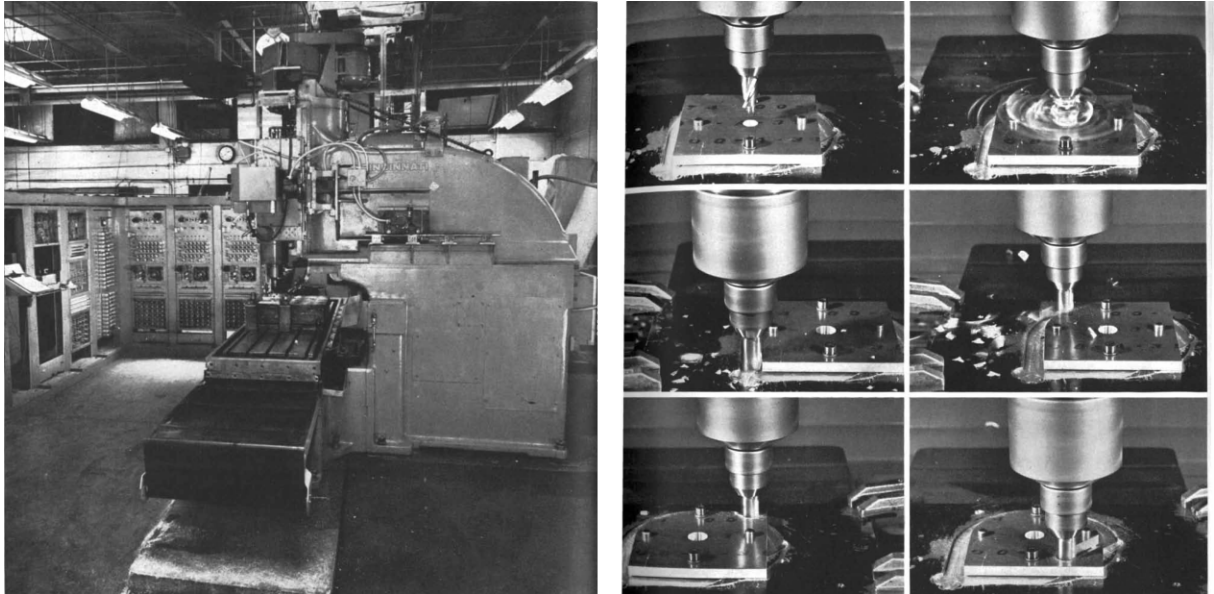
Ao final de duas décadas de desenvolvimento sustentado por projetos governamentais, o controle numérico computadorizado começa a se disseminar apenas no final da década de 1960, juntamente com a digitalização dos computadores. O grande entrave para o desenvolvimento da tecnologia à época, não eram as máquinas em si — que já existiam mais ou menos da mesma forma desde a 2ª Revolução Industrial, no final do Séc. XIX — mas o custo do processamento de dados¹⁵ necessário para se criar um equipamento realmente flexível, capaz de produzir peças em pequenas séries. Os princípios da fabricação digital e do conceito de mass-customization já aparecem na matéria publicada pela revista *Scientific American* em setembro de 1952, que relata a invenção da primeira fresadora NC:

“A rough measure of the cost of automatic control is the amount and nature of the information the automatic machine can handle. To perform a complicated operation such as manufacturing a metal part, we must build into the machine a great deal of information-handling capacity...But suppose we want an automatic machine which will make not one particular product, or part, but a number of different kinds of products, and only a few of each — as the versatile machine tool now must do. Now the machine must handle a different set of instructions for each product...In other words, it must handle with more information. And the cost of information-handling capacity needed for each product is spread over only a few items instead of many. This is the essential problem in automatizing machine tools. (PEASE, 1952)

¹⁴ As primeiras máquinas ainda não eram totalmente controladas por computadores, mas sim máquinas convencionais adaptadas com servomotores controlados por cartões perfurados.

¹⁵ Para se ter uma ideia da dimensão do problema, o custo de armazenamento de 1GB (gigabyte) de dados em 1967 era de aproximadamente USD1,05M (um milhão e cinquenta mil dólares), enquanto que em 2017 guardar a mesma quantidade de dados custava USD0,02 (dois centavos de dólar). (“CW@50: Data storage goes from \$1M to 2 cents per gigabyte (+video) | Computerworld”, [s.d.])

Figura 6 - Primeira fresadora NC construída no MIT (1950)



Fonte: Scientific American Magazine, edição de Setembro de 1952 (arquivo do autor)

Devido à disseminação dos computadores pessoais no começo da década de 1980, as tecnologias de fabricação digital tiveram um alcance ainda maior, com o advento de sistemas de prototipagem rápida, tais como a estereolitografia, as cortadoras à laser e outros equipamentos de comando numérico que passaram por um processo exponencial de miniaturização e aumento de potencial produtivo. Esse salto culminou, no final dos anos 2000, com o aparecimento de máquinas CNC cuja operação, dimensões e custos eram muito mais acessíveis, passíveis de serem chamadas de equipamentos de fabricação pessoal (GERSHENFELD, 2005).

Traçando um paralelo com a evolução no universo dos computadores — que em 1950 ocupavam andares inteiros em edifícios e hoje os carregamos no bolso — as máquinas de comando numérico que pesavam toneladas e se serviam de enormes mainframes, atualmente podem funcionar sobre a mesa de um escritório, conectadas a um computador pessoal como, por exemplo, uma impressora 3D.

Em quaisquer dos processos de manufatura digital a lógica básica é sempre a mesma: uma forma é gerada por computador (CAD) e nela são introduzidos os parâmetros pertinentes à sua fabricação (CAM). Após essa etapa o programa gera

uma sequência de instruções numéricas (p.e. o G-code¹⁶) que vão comandar um equipamento controlado por computador (CNC) de maneira a que ele execute todas as diferentes tarefas necessárias para a fabricação do objeto em questão.

Diferentemente das máquinas utilizadas na manufatura tradicional em série, que são ajustadas — e muitas vezes fabricadas — para executar uma mesma tarefa específica indefinidamente, uma máquina CNC pode produzir objetos na escala de uma única unidade, pois, para esse equipamento flexível, não existem fôrmas ou ajustes preestabelecidos, ele obedecerá as instruções contidas no G-code, possibilitando assim um altíssimo grau de personalização ou customização. Para um equipamento desse tipo, não há uma redução de custos baseada na repetição de elementos.

O conceito de fabricação digital é um termo genérico que abrange uma série de equipamentos e processos diferentes entre si. Apesar de todas essas máquinas terem em comum o fato de operarem a partir do controle numérico computadorizado, elas fazem parte de diferentes sistemas de manufatura, que podem ser resumidos em três tipos principais: subtrativo, aditivo e formativo (ou conformativo), conforme será explicitado com maiores detalhes no capítulo V desta tese.

Da mesma forma que os *software* de modelagem NURBS migraram do contexto da indústria (automotiva, naval e aeroespacial) para os escritórios de arquitetura, é possível afirmar que existe um movimento semelhante com relação a um certo tipo de equipamento de fabricação digital: os robôs industriais. Essas ferramentas extremamente flexíveis estão deixando de ser vistos exclusivamente em seu “habitat” original, o chão de fábrica, para ocupar lugar de destaque em diversas instituições de ensino e pesquisa de arquitetura, arte e design.

¹⁶ G-code, ou código G em português, é uma linguagem de programação simples, criada no MIT e utilizada desde a década de 1950 no controle de máquinas de comando numérico. Embora seja chamada de linguagem de programação, seu uso não permite maiores encadeamentos lógicos, como em uma linguagem de mais alto nível, restringindo-se a passar para a máquina instruções referentes ao seu posicionamento no espaço, velocidades, avanços e outras características específicas do equipamento utilizado.

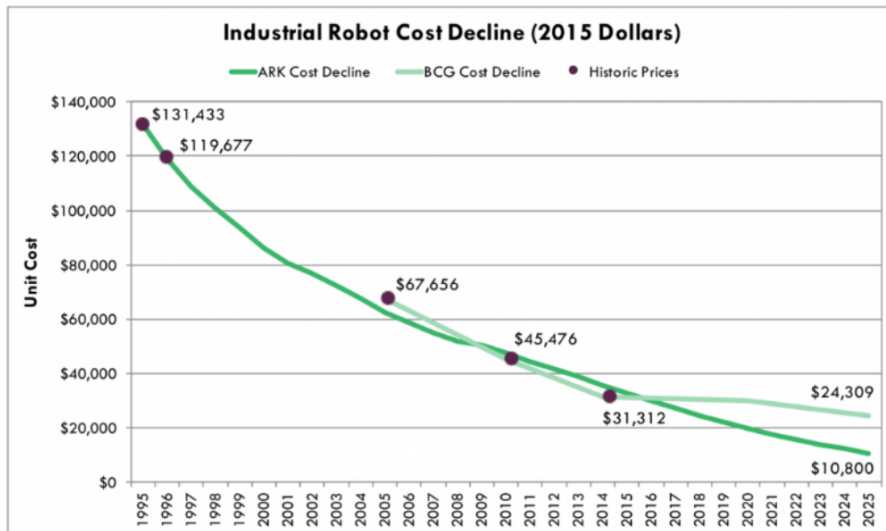
1.2.4 Os robôs industriais

Da mesma forma que as demais tecnologias e máquinas de comando numérico, a invenção dos robôs industriais não é derivada do desenvolvimento de tecnologias recentes. Ainda em 1954 foi depositada a patente que viria a se tornar em 1959 o primeiro robô industrial, o Unimate, pesando duas toneladas e com atuadores hidráulicos, resumia-se a movimentação de partes mecânicas entre linhas de montagem.

Ainda no final da década de 1960 se espalham na indústria automotiva os braços robóticos, cuja versatilidade somada à capacidade de seguir com precisão caminhos predefinidos no espaço propicia o uso desses equipamentos em tarefas mais sofisticadas como a montagem e solda de componentes. A primeira linha de montagem a adotar uma série de braços robóticos programáveis Unimates foi a operação da fábrica de automóveis da *General Motors* em *Lordstown* (Ohio, EUA), onde em 1969 as máquinas assumiram o lugar de trabalhadores humanos nas tarefas de forja e fundição.

Em 1973 já passava de três mil o número de robôs industriais em operação. Em 2013, exatamente quarenta anos depois, esse número alcança um milhão e seiscentas mil unidades (IFR, 2016). O avanço desses números trouxe uma inevitável queda de preços que, aliada ao desenvolvimento de novas capacidades da ferramenta, levou a uma ampla difusão de seu uso em outras indústrias além da automotiva, tais como eletroeletrônica, química e de entretenimento.

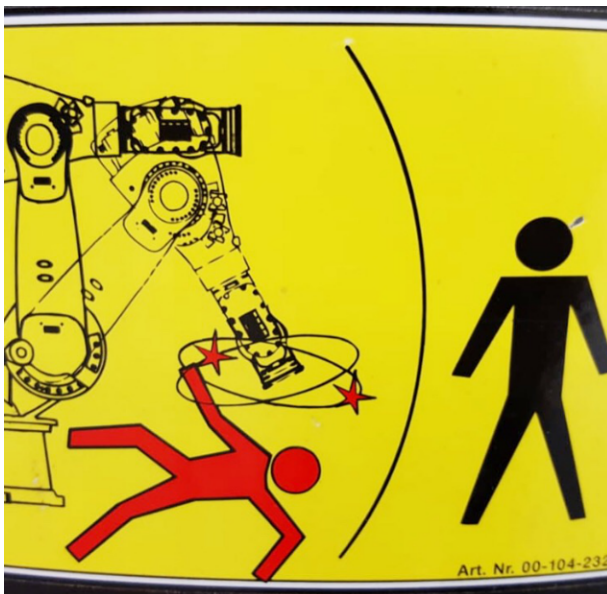
Figura 7 - Gráfico ilustrativo da redução de custos dos robôs industriais (2015)



Fonte: Ark Investment Management¹⁷

No entanto, uma das grandes barreiras para a disseminação do uso dessas ferramentas digitais, no caso específico dos robôs, é o fato de que essas máquinas ainda são extremamente perigosas e seu uso requer uma série de cuidados e proteções para que se evitem acidentes com seres humanos nas linhas de produção, que podem chegar a ser fatais.

Figura 8 - Aviso de segurança robô Kuka KR16-2



Fonte: arquivo do autor.

¹⁷ Disponível em: ark-invest.com. Acesso em: 01/03/2020

Mais recentemente, desde o começo dos anos 2010, a aplicação de robôs industriais em segmentos da arquitetura e construção civil vem crescendo, em virtude do desenvolvimento de novas tecnologias de visão computacional e de sensores, que aliados a sistemas de inteligência artificial (ou AI, *Artificial Intelligence*, em inglês) permitem que o uso de robôs seja feito em conjunto com humanos, com cada vez mais segurança.

Com a solução desta questão, é possível afirmar que esses equipamentos serão vistos desempenhando suas tarefas lado-a-lado com trabalhadores nos canteiros de obra espalhados pelo mundo.

Figura 9 - Robô colaborativo trabalhando em linha de montagem



Fonte: Kuka Roboter GMBH¹⁸

Os robôs na arquitetura

Atualmente os braços robóticos não são vistos exclusivamente em seu ambiente de origem, as linhas e montagem automobilísticas. Grandes instituições de ensino e pesquisa na Europa, Ásia e Estados Unidos utilizam robôs industriais de seis ou sete eixos em suas pesquisas sobre a construção e geometrias avançadas. ETH

¹⁸ Disponível em: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/industries/case-studies/schwingenmontage/flexfello>. Acesso em: 01/03/2020

(Swiss Federal Institute of Technology in Zurich), MIT (Massachusetts Institute of Technology), TU Delft (Delft University of Technology), University of Cambridge, Tsinghua University (China), Universitat Stuttgart e SCI-Arc (Southern California Institute of Architecture) são apenas algumas referências de uma longa lista de mais de quarenta instituições onde o uso dessas ferramentas já faz parte do dia-a-dia.

Figura 10 - Mapa com a localização de robôs na indústria criativa (2020)



Fonte: Association for Robots in Architecture¹⁹

Braços robóticos industriais são utilizados — ainda que de forma experimental — desde o início da década de 2000 no campo da manufatura em arquitetura e design. Os pioneiros nessa introdução foram a dupla de arquitetos suíços Fabio Gramazio e Mathias Kohler, que desde então vem desenvolvendo junto ao Instituto Federal de Tecnologia em Zurique (Eidgenössische Technische Hochschule, a ETH), uma pesquisa aplicada de forma sistemática sobre o uso destas ferramentas na construção civil, por meio de uma série de projetos, instalações e obras realizadas.

Uma das primeiras aplicações práticas do uso dos robôs industriais em uma edificação foi realizada na fachada da vinícola Gantenbein, em Fläsch na Suíça, no ano de 2006 (Fig. 11). A partir de um modelo conceitual que representava uma caixa

¹⁹ Disponível em: <https://www.robotsinarchitecture.org/map-of-creative-robots>. Acesso em: 01/03/2020

preenchida com esferas virtuais de diferentes tamanhos, foi gerada uma matriz com imagens para cada uma das quatro fachadas do edifício. Essas imagens foram processadas por um software específico, produzido pela própria equipe dos arquitetos, que traduziu os diferentes matizes de luz e sombra dos desenhos para um padrão geométrico de posicionamento dos tijolos que compõem os painéis de fachada. Os tijolos são dispostos sobre a forma de um painel e colados um a um, ainda na fábrica, por um braço robótico de sete eixos, possibilitando o posterior transporte e colocação na obra, como um elemento único pré-fabricado.

Figura 11 - Fachada da vinícola Gantenbein, Suíça (Gramazio & Kohler, 2006)



Fonte: Archdaily²⁰

Outro trabalho da mesma dupla de arquitetos é a fachada da sede principal da Keller AG, uma empresa suíça fabricante de elementos cerâmicos e parceira dos arquitetos Gramazio e Kohler no desenvolvimento dos processos de fabricação digital

²⁰ Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-70092/vinicola-gantenbein-gramazio-e-kohler-mais-bearth-e-deplazes-architekten>. Acesso em: 01/03/2020

envolvendo robôs. Nessa obra a fachada de tijolos cerâmicos também foi dividida em pequenas partes, o que facilitava o trabalho de fixação dos elementos na fachada através de insertos metálicos simples. Cada elemento tem uma posição única na composição da fachada, e sua execução também só foi possível pelo uso do mesmo braço robótico, agora deslocado em um contêiner até o canteiro de obras.

Outra pesquisa importante no uso de robôs industriais na escala da arquitetura e design é a conduzida pelo Professor Achim Menges, titular e diretor do Institute for Computational Design na Universidade de Stuttgart, Alemanha (Fig. 12). Desde 2010 o seu grupo de pesquisa projeta e executa pequenos pavilhões utilizando fabricação digital robótica, explorando a versatilidade da ferramenta e experimentando diversos processos de manufatura, desde os subtrativos, com o uso de fresadoras, até os aditivos, com a dispersão controlada de fios de fibra de carbono impregnadas com resina epóxi.

Em todos os exemplos os projetos são realizados tendo como ponto de partida a biomimética, que é o estudo e mímese de determinados processos, estruturas e comportamentos construtivos existentes na natureza, utilizando ferramentas e materiais produzidos pelo homem. A construção dos pavilhões tem como primeiro objetivo a realização de pesquisa aplicada no campo do uso dos robôs e a expansão das fronteiras de sua utilização em combinação com materiais compósitos, mas é interessante observar nesses trabalhos a possibilidade de aplicação real em elementos de escala arquitetônica, o que é um dos propósitos desta pesquisa

Figura 12 - Pavilhões ICD Stuttgart (Achim Menges, 2011-2015)



Fonte: Site do arquiteto²¹

Saindo da Europa em direção à América do Norte, o Media Lab do MIT é outro foco de pesquisa acerca do uso de braços robóticos no campo da arquitetura, em especial o núcleo de pesquisa Mediated Matter, coordenado pela Profa. Neri Oxman. Em um dos experimentos mais recentes (KEATING et al., 2017) o grupo de pesquisa desenvolveu um sistema de construção robotizado batizado de DCP (*Digital Construction Platform*) destinado a produzir elementos em escala arquitetônica.

Como na maioria das pesquisas desenvolvidas por esse grupo, os resultados são importantes do ponto de vista experimental, se entendidos como uma forma de ampliação das fronteiras no uso das técnicas e equipamentos de fabricação digital. Porém, diferentemente dos seus pares europeus aqui citados, os achados têm pouco contato com os problemas reais emergentes na arquitetura industrializada. Apesar de

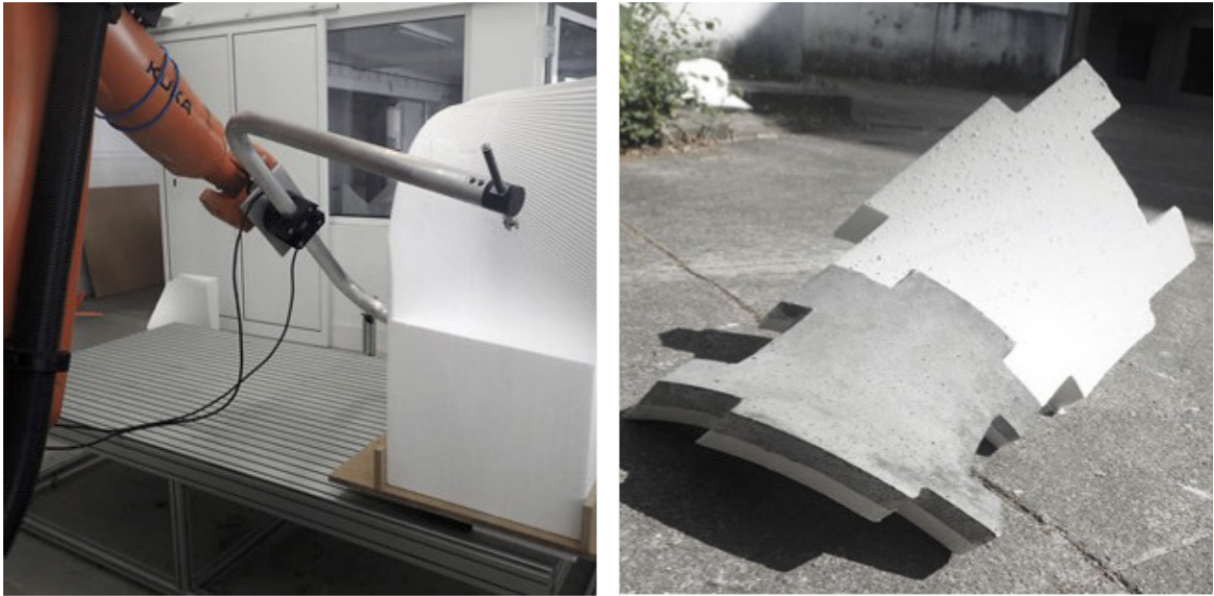
²¹ Disponível em: <http://www.achimmenges.net/>. Acesso em: 01/03/2020.

apresentar o processo de automação como uma forma de mitigar o número de acidentes de trabalho ocorridos na construção civil, é difícil imaginar o sistema aplicado de forma efetiva em um canteiro de obras, tendo em vista que existe uma desconexão entre a plataforma proposta e todo o universo de sistemas pré-existentes na construção civil, que coexistem em um edifício.

No Brasil, os primeiros experimentos no campo da robótica aplicada à construção se deram entre 2014 e 2015, quando a FAUUSP, na pessoa do Prof. Paulo Fonseca de Campos, tomou parte no projeto liderado pelo DFL (*Digital Fabrication Laboratory*) da Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto (FAUP), com quem segue desenvolvendo novos projetos sobre robótica e tecnologia do concreto (Fig. 13) (MARTINS et al., 2015; MARTINS; SOUSA, 2016). Trata-se de pesquisa aplicada pioneira, com um horizonte de curto prazo, que faz uso das qualidades da fabricação digital, associadas aos materiais à base de cimento e concreto, amplamente utilizados e de baixo custo, com vistas à sua utilização na construção industrializada e, particularmente, na pré-fabricação.

Essa pesquisa teve entre seus objetivos o desenvolvimento de elementos pré-fabricados leves, utilizando o microconcreto de alto desempenho (MicroCAD) moldado em fôrmas de poliestireno expandido, cortadas por fio quente (hotwire) acoplado a um braço robótico de seis eixos. Por meio dessa técnica foi possível criar elementos modulares de contenção para muros de arrimo, porém altamente customizáveis e com geometrias complexas, que podem se adaptar melhor, por exemplo, à topografia do terreno (MARTINS et al., 2015).

Figura 13 - Ruled Concrete no DFL, Porto (José Pedro Sousa e Pedro Martins, 2015)



Fonte: Site do Digital Fabrication Lab da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo do Porto, Portugal²².

Estamos atravessando a terceira (ou quarta, dependendo do autor) revolução industrial, onde as tecnologias digitais de produção se encontram com a ubiquidade da informação em tempo real. Em diversos campos dos negócios e da economia vemos vários exemplos de introdução de inovações disruptivas, onde novas tecnologias superam rapidamente as suas predecessoras, criando ou ganhando um mercado até então inexistente.

A construção civil é um campo onde a inovação ocorre historicamente (até o momento) de forma incremental, ou seja, por meio de pequenos avanços na performance de produtos ou serviços já existentes. Não é objetivo desta pesquisa discorrer sobre modelos de inovação, mas é interessante pensar como esses avanços podem trazer mudanças significativas no modo em que construímos nossos edifícios.

Embora nos pareça que a incorporação de novas tecnologias na criação e materialização da arquitetura contemporânea seja inexorável, essa reflexão nos leva a estabelecer uma série de questionamentos acerca de como promover essa integração em um campo onde a técnica, os materiais e as normas são historicamente tradicionais.

²² Disponível em: <https://dfl.arq.up.pt/portfolio/ruled-concrete/>. Acessado em: 01/03/2020.

Como fazer com que sistemas fabricados digitalmente, com um alto grau de customização, integrem-se de forma fluida a centenas de outros sistemas construtivos produzidos em massa? Como fazer com que novas técnicas e materiais de tecnologia avançadas se adequem a leis e normas de desempenho tradicionalmente rígidas? A aprovação de um novo sistema construtivo segundo as regras atuais leva tanto tempo que nenhuma *startup* inovadora sobreviveria à espera.

De forma resumida, coloca-se uma questão primordial: como promover a integração entre o novo e a tradição na arquitetura industrializada?

2 CAMPO OBJETO E METODOLOGIA

2.1 Campo objeto

Não faz parte do escopo desta pesquisa fazer uma análise pormenorizada da produção de Zaha Hadid Architects, mas, ao lançarmos um olhar mais atento para o conjunto de sua obra — especialmente a realizada na última década — encontramos uma forma original de integração entre a concepção e fabricação digitais com a tradição consolidada nos materiais e processos de uma arquitetura industrializada.

Segundo Schumacher, a intenção primordial de Zaha era expandir o universo de possibilidades do design, por meio da adoção da curva - e não do ângulo reto - como meio de expressão. As formas se conectam de maneira contínua, como em uma paisagem natural, onde diferentes gradientes mediam as transições entre os espaços, trazendo uma percepção multidimensional e poli centrada, sem os limites bem estabelecidos entre as relações dicotômicas tradicionais em arquitetura — interior vs. exterior, conteúdo vs. continente, fundo vs. figura (SCHUMACHER, 2017).

Assim como nas obras de Oscar Niemeyer²³, a curva assume o papel principal, não como mero formalismo, mas como uma resposta concreta do arquiteto às demandas do programa, do entorno, da cultura e da técnica de suas épocas.

Entretanto, a relação entre a obra de Zaha — especialmente as realizadas até o início da primeira década do Séc. XXI — com o modernismo curvilíneo do arquiteto brasileiro não se dá apenas na forma. Não por acaso ambos utilizaram como meio principal de materialização de seus edifícios o concreto armado. Até então, ele seria o material que possibilitava a máxima expressão da fluidez pretendida por ambos os arquitetos, devido a sua plasticidade. Ao analisarmos os edifícios mais importantes de Zaha nesse período, o concreto armado é notoriamente o material escolhido para dar forma às suas intenções de design.

²³ É notória a admiração de Zaha Hadid pela obra de Oscar Niemeyer, difundida em diversas entrevistas concedidas pela arquiteta na imprensa mundial.

Figura 14 - Maxxi Museum of XXI Century Arts, Roma (Zaha Hadid, 1998-2009)



Fonte: Site da arquiteta²⁴

Embora seja um material barato, abundante e com grande plasticidade (COLLINS, 2004), o concreto armado, quando chamado a assumir formas não convencionais, traz consigo dois problemas. O primeiro é o aumento na relação do uso de aço por metro cúbico de concreto. Em formas mais complexas, quantidade de aço na armadura cresce de maneira a resistir aos novos esforços de tração. O aumento na densidade da armadura traz, além do aumento dos custos, complexidades adicionais em sua execução e no lançamento do concreto.

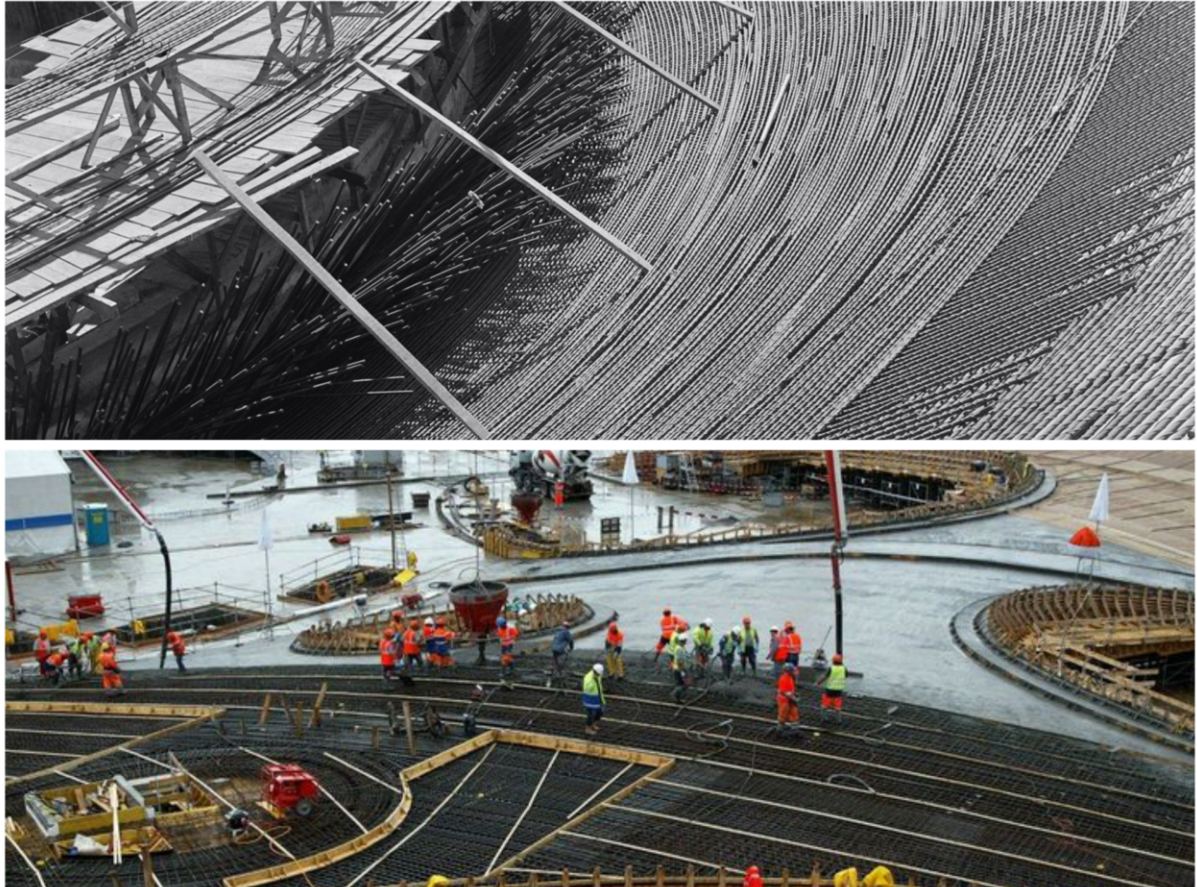
O segundo problema causado pela complexidade é o aumento da quantidade de material utilizado nas fôrmas e escoramentos. Baseando-se no uso da madeira como matéria prima mais comum em sua confecção, é possível afirmar que fôrmas especiais tendem a possuir um alto número de peças diferentes, elevando assim a perda e a dificuldade em sua montagem, que exige uma mão de obra mais qualificada (ANDRIOLO, 1984).

Se o objetivo final do arquiteto é construir uma forma não convencional, as restrições materiais tornam o uso do concreto armado menos defensável, econômica e ambientalmente, frente a outras possibilidades (FAJERSZTAJN, 1987).

²⁴ Disponível em: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/maxxi/>. Acesso em: 01/03/2020.

Figura 15 - Etapa da construção das formas para concreto armado.

Congresso Nacional, Brasília (O. Niemeyer, 1958) e Rolex Learning Center, Suíça (SANAA, 2004)



Fonte: ArchDaily²⁵

Se à época de Niemeyer esses problemas não geravam restrições para a construção de seus edifícios, Zaha utilizou no final de sua produção um material que a possibilitaria expressar as suas formas fluidas e curvas unindo a tradição e a estética da construção em concreto com a fabricação digital e o avanço tecnológico dos materiais compósitos.

Esse material é o *Glassfibre Reinforced Concrete*, ou o GRC²⁶.

²⁵ Disponíveis em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-81125/brasilia-em-construcao-por-marcel-gautherot> e <https://www.archdaily.com.br/br/01-39985/rolex-learning-center-sanaa>. Acesso em: 01/03/2020.

²⁶ Em português, Concreto Reforçado com Fibras de Vidro. Algumas publicações inglesas identificam o material pela sigla GFRC. Adotaremos nessa tese a grafia mais utilizada, o GRC.

De forma preliminar — o material faz parte do tema central desta tese e será detalhado em capítulo específico — os painéis de GRC são fabricados por meio da projeção de uma matriz cimentícia de alto desempenho (formada por cimento, agregados finos e aditivos) reforçada com fibras de vidro álcali-resistentes sobre um molde, utilizando uma pistola e ar comprimido (HORSLEY, 2001).

O molde pode ser executado de diversas maneiras. Nas formas mais simples e voltadas para a produção em série, é mais comum que os mesmos sejam feitos de aço, para que a sua reutilização seja otimizada. Em formas simples, mas de baixa repetição, outros materiais como madeira ou fibra de vidro podem ser utilizados. Em último caso, e o que mais nos interessa, a produção de peças complexas e de pouca repetição requer moldes feitos com materiais mais econômicos (uma vez que serão utilizados poucas vezes) e que permitam uma grande flexibilidade em suas formas. O material mais comumente utilizado para esse fim é o poliestireno expandido (EPS, ou Isopor®) que é usinado por uma fresadora CNC.

Ao analisarmos as obras mais recentes de Zaha Hadid Architects é possível notar o emprego cada vez maior de painéis pré-fabricados de GRC aliado a uma subestrutura metálica, que revestem tanto o interior dos edifícios quanto suas fachadas. Em um primeiro momento, os painéis são utilizados apenas como revestimento interno, como no Guangzhou Opera House (2010, Guangzhou, China) e na Roca Gallery (2011, Londres, UK) (Fig. 16).

Figura 16 - Roca Gallery, Londres (Zaha Hadid, 2009-2011)



Fonte: Site da arquiteta²⁷

Após esses projetos é possível afirmar que na construção do centro cultural Heydar Aliyev (2013, Baku, Azerbaijão) ocorre um ponto de inflexão (Fig. 17). O GRC é utilizado de forma massiva em todo o interior e nas fachadas²⁸, o que possibilita a expressão das curvas resultando em uma arquitetura orgânica e fluida em um grau não visto anteriormente.

²⁷ Disponível em: https://www.zaha-hadid.com/interior_design/roca-london-gallery/. Acesso em: 01/03/2020.

²⁸ O GRC foi utilizado nas fachadas até a altura de 1,50m do piso devido à resistência do material frente às solicitações do projeto. Após esse limite foram utilizados painéis compósitos de GRP (Glassfibre Reinforced Polyester).

Figura 17 - Heydar Aliyev Center, Baku (Zaha Hadid, 2007-2012)



Fonte: Site da arquiteta²⁹

Em quase todos os grandes projetos de Zaha Hadid Architects executados no Oriente Médio e no Extremo Oriente após esse momento, tais como: o centro cultural Dongdaemun Plaza (2014, Seul, Coréia do Sul), o conjunto residencial D'Leedon Singapore (2014, Cingapura) e o centro de pesquisas Kapsarc (2017, Riad, Arábia Saudita) (Fig. 18), o GRC passa a ser o principal material de construção empregado.

²⁹ Disponível em: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre>. Acesso em: 01/03/2020.

Figura 18 - King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (Z. Hadid, 2009-2017)



Fonte: Site da arquiteta³⁰

Para introduzir o campo objeto desta pesquisa escolhemos exemplos de edifícios onde o emprego dos painéis pré-fabricados de GRC surge como uma resposta, adequada ao *zeitgeist* do Séc.XXI, ao questionamento principal que norteia esta tese: como materializar uma arquitetura que se utiliza de formas complexas como meio de expressão?

³⁰ Disponível em: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/king-abdullah-petroleum-studies-and-research-centre>. Acesso em: 01/03/2020.

Entretanto, se analisado do ponto de vista do produto, o material GRC mostra-se adequado e promissor, atendendo a complexidade formal requerida pelos arquitetos contemporâneos, cabe a essa pesquisa levantar outra questão fundamental: em qual contexto e de que maneira esse material é manufaturado, ou seja, como se dá o seu processo de produção?

Arquitetura industrializada

Os primeiros experimentos no campo da construção industrializada com concreto ocorreram ainda nas últimas décadas do Séc. XIX (COLLINS, 2004) e o seu desenvolvimento coincide com o avanço da mecanização dos meios de produção, ocorridos desde a 2ª Revolução Industrial.

Historicamente, a inovação tecnológica no campo da construção ocorre de forma lenta e incremental, porém no período pós Segunda Guerra Mundial houve um grande salto, devido à necessidade de reconstrução massiva dos países afetados pelo conflito na Europa Ocidental. A demanda urgente por milhares de novos edifícios e a escassez de mão-de-obra fez com que a maior parte de sua produção se organizasse de forma seriada, por meio do uso intensivo de elementos pré-fabricados de concreto. A regra nesse período, entre as décadas de 1950 e 1970, é o uso de grandes painéis de fechamento baseados em sistemas fechados de produção (SALAS, 2008). De forma sucinta, o sistema fechado baseia-se no emprego de grandes estruturas adquiridos de um único fabricante, com um baixo grau de padronização e coordenação com outros subsistemas e elementos da cadeia produtiva.

Ainda segundo Salas, os sistemas fechados foram adotados quase sempre em condições excepcionais, como: prazos de execução apertados, o uso de tecnologias nem sempre bem assimiladas, adaptação de projetos de arquitetura pensados para serem construídos de maneira tradicional para o uso de pré-fabricados, baixo orçamento, entre outros.

Se a pré-fabricação pesada se tornou o retrato da reconstrução da Europa Ocidental (e da expressão de um Estado máximo em pleno desenvolvimento nos países sob influência da extinta URSS), a sua adoção impôs uma série de problemas

que, em pouco mais de duas décadas, decretaram a crise do mesmo sistema. As características intrínsecas dos sistemas fechados que viabilizavam o uso da pré-fabricação seriada em grande escala, tais como: variações formais mínimas; necessidade de um grande número de unidades habitacionais agregadas; baixa ou nula flexibilidade de distribuições e alterações em planta; blocos de tipologia linear de grandes dimensões, de forma a minimizar a necessidade de movimentação das guias de montagem, foram as mesmas que causaram a sua falência e as primeiras demolições de grandes conjuntos habitacionais no final da década de 1980 (SALAS, 2008).

No Brasil, não foi o impacto da guerra, mas sim outro fato histórico marcante que levou o país a avançar em direção a industrialização na arquitetura: a construção de Brasília entre os anos de 1957 e 1960. Antes disso, o emprego de um sistema racionalizado de construção com material de base cimentícia aparecia em pouquíssimas obras, espaçadas entre as décadas de 1920 e 1950. A quase totalidade dos fabricantes de elementos pré-fabricados e das maiores obras que utilizaram esse sistema surgiram entre 1955 e 1980 (VASCONCELOS, 2002), período que coincide com a conclusão da nova capital e com o auge do chamado “milagre brasileiro”.

É possível afirmar que a construção da nova capital foi a expressão do que havia de mais avançado em termos de tecnologia no emprego do concreto armado em sua época. Embora a sua arquitetura seja mais lembrada pelos edifícios-ícones projetados por Oscar Niemeyer, que utilizavam primordialmente o concreto armado moldado in loco, Brasília trouxe um grande salto na utilização da pré-fabricação em concreto, capitaneada pelo arquiteto responsável pelo detalhamento e acompanhamento dos projetos de Oscar no canteiro de obras: João Filgueiras Lima, o Lelé.

Foi a necessidade, criada pelo ritmo acelerado das obras, que levou Lelé a criar as primeiras soluções de racionalização das construções de Brasília, dos alojamentos de madeira para os operários até aos edifícios da UnB, com o uso extensivo de elementos pré-fabricados de concreto. Entre as décadas de 1960 e 1980, apesar de continuar a fazer uso dos sistemas de pré-fabricação pesada em algumas obras, como no edifício da Camargo Correa ou no Hospital Geral de Taguatinga, Lelé

foi certamente o catalizador de um avanço da industrialização na arquitetura por meio do emprego da pré-fabricação leve.

Partindo das experiências pioneiras do “Grupo de São Carlos” — que trouxe Pier Luigi Nervi e o ferrocimento para o Brasil — quase toda a sua produção posterior a esse período fazia uso de elementos pré-fabricados em argamassa armada. Desde o experimento com as escolas de Abadiânia até os grandes hospitais da Rede Sarah, passando pelas obras de urbanização de Salvador, Lelé provou que é possível aliar a pré-fabricação à qualidade estética e liberdade de criação, um dos grandes entraves para a popularização desse tipo de sistema construtivo.

Entretanto, sua obra foi um ponto fora da curva.

Nesse mesmo período de tempo, a Europa e os Estados Unidos já assistiam ao fracasso dos grandes empreendimentos de construção em larga escala — e do uso massivo da pré-fabricação fechada. Não por acaso, foi nesse período que Charles Jencks decretou simbolicamente a morte da arquitetura moderna, com a implosão do conjunto residencial de Pruitt-Igoe, projetado pelo arquiteto Minoru Yamazaki em St. Louis, construído menos de vinte anos antes de sua demolição (1956-1972).

Além dos problemas relativos à baixa flexibilidade e adaptabilidade da construção pré-fabricada, um dos grandes entraves para a disseminação da industrialização na construção civil no Brasil foi (e ainda é) a abundância de mão-de-obra barata, além da falta de políticas públicas orientadas à racionalização das construções, tendo em vista o interesse político na manutenção desse sistema primitivo, mas que emprega muitas pessoas sem a necessidade de qualificação.

Mesmo com a alta qualidade e baixo custo de suas obras, o emprego dos sistemas de pré-fabricação leve imaginados por Lelé sempre dependiam de uma grande estrutura industrial, com equipamento industrial pesado e milhares de funcionários, além da vontade política que mudava conforme mudavam os governos. Foi assim com a Fábrica de Escolas no Rio de Janeiro, com a FAEC (Fábrica de Equipamentos Comunitários) e o CTRS (Centro de Tecnologia Rede Sarah) em

Salvador, todas elas fábricas de grande valor, mas que funcionaram por breves períodos de tempo (LIMA, 1999).

O estigma da baixa flexibilidade e da alta incidência de patologias na construção — oriundo das primeiras experiências de pré-fabricação de ciclo fechado — adicionadas a necessidade de produção em escala industrial são entraves significativos para uma aproximação efetiva dos arquitetos a industrialização.

Avanços

De forma geral, avanços em direção a um maior grau de industrialização ocorrem em função de desenvolvimentos de inovações em tecnologias de produto ou de novos processos produtivos, sejam essas incrementais ou radicais (FONTANINI; CARVALHO, 2005).

Desde as patentes de Coignet em 1855 sobre o *Betón Economique* (que utilizava agregados mais baratos) (COLLINS, 2004), até o UHPC (Ultra High Performance Concrete) baseado nos avanços mais recentes da nanotecnologia, o concreto vem se desenvolvendo enquanto produto de forma contínua e incremental.

Apesar de ter sido desenvolvido ainda na década de 1970, o GRC encontra-se no grupo dos materiais mais avançados em termos de engenharia, o dos materiais compósitos. Os compósitos são formados pela união de dois ou mais materiais de diferentes características físico-químicas cujas fases são imiscíveis e que, quando combinados, produzem um novo material com características distintas de seus componentes individuais.

No caso do GRC, a união de uma matriz cimentícia de alto desempenho (cimento, agregados finos e aditivos) com fibras de vidro álcali-resistentes cria um material de alta resistência, com baixa fissurabilidade e alta flexibilidade, possibilitando a criação de elementos delgados e de formas complexas, como as criadas por Zaha Hadid.

Entretanto, se olharmos para o crescimento da industrialização na construção a partir do ponto de vista dos processos de manufatura, existe uma grande disparidade entre o desenvolvimento do material e de sua forma de aplicação. Enquanto em

praticamente todas as áreas de nossa vida contemporânea é quase impossível imaginar algo que não é produzido em uma estrutura industrial, na construção civil o trabalho artesanal e mecanizado ainda é a principal forma de manufatura das edificações.

Esse é o principal motivo pelo qual entende-se que é necessário avançar com a pesquisa no campo das tecnologias de processo de manufatura. O GRC utilizado na construção das mais recentes obras de arquitetura contemporânea ainda é fabricado de maneira extremamente artesanal, com tecnologia rudimentar e, principalmente, com um alto grau de insalubridade para o trabalhador na ponta da linha de produção.

A ubiquidade da utilização de computadores e software de modelagem avançada aliada a disseminação das ferramentas de fabricação digital traz consigo a possibilidade de estabelecer um avanço no processo de produção do GRC, eliminando o paradoxo que existe no emprego de um material tecnologicamente avançado por meio de um processo mecânico-artesanal.

2.1.1 Objetivos da pesquisa

Diante do exposto é possível afirmar que o objetivo geral desta pesquisa é requalificar a tecnologia do GRC por meio do uso de ferramentas de fabricação digital robótica em sua manufatura, como forma de contribuir para uma nova forma de materialidade no contexto da arquitetura contemporânea.

Além do objetivo geral acima descrito, pode-se dizer que essa pesquisa busca alcançar ainda os seguintes objetivos específicos:

- a. Levantar o estado-da-arte da pré-fabricação leve em GRC;
- b. Investigar os motivos que levaram à interrupção das pesquisas na produção robotizada de GRC nos anos 1990;
- c. Estabelecer as bases para aplicação da fabricação robótica na produção contemporânea no GRC;
- d. Executar ensaios laboratoriais para verificação e validação da proposição por meio de um protótipo do tipo Prova de Conceito (PoC).

2.1.2 Formulação da proposição

Algumas ideias e invenções mais inovadoras no campo da tecnologia certamente surgiram à frente de seu tempo. Charles Babbage criou a sua máquina analítica em 1833 e tentou construí-la, sem sucesso, até a sua morte em 1871. Foram necessários mais de um século de avanços técnicos e materiais para que fosse possível construir um computador de uso geral como o proposto pelo matemático.

Johnson afirma (simplificando o conceito criado pelo biólogo Stuart Kaufmann para explicar as origens e a evolução da vida na terra) que a grande maioria das inovações e invenções ocorre segundo o modelo de Kaufmann chamado de “teoria do possível adjacente” (JOHNSON, 2010). Segundo o modelo, a evolução de determinado campo se dá majoritariamente pela combinação de elementos, recursos e ideias pré-existentes e, somente de forma rara, ocorrem grandes saltos nesse processo incremental, como o de Babbage citado no parágrafo anterior.

Historicamente, no campo da construção civil, as inovações seguem esse modelo incremental, mas também é possível observarmos os saltos evolutivos em determinadas ocasiões.

Entre o projeto inicial até o final da construção do Walt Disney Concert Hall, projeto de Frank O. Gehry em Los Angeles (EUA), passaram-se quinze anos. Por motivos distintos, desde o estouro do orçamento até restrições legais impostas pela prefeitura, a construção permaneceu parada e incompleta entre 1994 e 1999 e só veio a ser inaugurada em 2003 (com um custo 300% acima do orçado inicialmente). O projeto original previa o arenito natural como material de revestimento de sua sinuosa fachada — escolha que onerava ainda mais a construção —, fato que ajudou a causar a interrupção das obras.

No mesmo período em que a construção da sala de concertos nos EUA encontrava-se parada, o museu Guggenheim Bilbao foi inaugurado (Bilbao, Espanha, 1998), com a sua pele revestida com placas de titânio, executada por meio de

manufatura digital. A solução técnica inovadora³¹ encontrada para o revestimento das fachadas curvas na Espanha, semelhantes as projetadas para o Walt Disney Concert Hall, fez com que Gehry propusesse a substituição das placas de pedra por chapas de aço inox. A adoção do metal trouxe uma economia de cerca de cinco milhões de dólares no orçamento que ajudou a viabilizar a retomada das obras e, além disso, permitiu otimizar o desenho das fachadas tornando-as mais fiéis às intenções originais do arquiteto, devido à sua flexibilidade (GEHRY, 2009).

No âmbito do desenvolvimento tecnológico do GRC, é possível traçar um paralelo com o projeto desenvolvido pelo Prof. Carlos Balaguer para a companhia espanhola Dragados y Construcciones, no início da década de 1990, na Espanha. A equipe liderada pelo engenheiro espanhol desenvolveu uma célula de produção robotizada para a execução de painéis de GRC pelo método do spray-up. Esse trabalho serviu de inspiração para a realização dessa pesquisa e será abordado em detalhes nos próximos capítulos, mas, de forma sucinta, ele consistiu na integração do processo de projeto digital por meio de ferramentas de CAD com a manufatura dos painéis, automatizada por um braço robótico de 6 DOF (do inglês Degrees Of Freedom, ou graus de liberdade, em português) acoplado a uma pistola concêntrica de projeção, comumente utilizada na produção manual do GRC. Após dois anos de trabalho, o projeto alcançou resultados extremamente positivos em termos de qualidade e produtividade na manufatura de painéis de GRC, conforme foi possível aferir por meio da análise de uma série de artigos científicos publicados pela equipe responsável. Entretanto, mesmo após a comprovação dos resultados, o projeto não foi levado adiante pela empresa patrocinadora.

Indagado sobre os motivos que levaram ao abandono do projeto, em uma entrevista pessoal concedida pelo Prof. Balaguer a este pesquisador, o mesmo afirmou que um dos principais fatores foram os altos custos envolvidos no desenvolvimento de toda a integração entre CAD, CAM e braço robótico, devido a necessidade de programação de toda a solução de software praticamente do zero. Outro ponto importante foi, segundo ele, que a célula robotizada era tão produtiva que

³¹ Inovadora segundo os parâmetros da construção civil, pois nos ramos da indústria naval, automotiva e aeroespacial, utilizar o metal como revestimento de uma “pele” com funções separadas da estrutura principal é o método padrão de construção.

não havia espaço suficiente na fábrica para o armazenamento dos painéis após a sua projeção. Por fim, a baixa flexibilidade dos moldes utilizados (feitos de madeira, manualmente), também impôs restrições que inviabilizaram a continuidade da pesquisa (BALAGUER, 2017). Sem dúvida foi um projeto desenvolvido à frente do seu tempo, numa época em que a demanda por soluções que requeriam a confecção de geometrias complexas, capazes apenas de serem fabricadas por meio de robôs era baixa e os custos de implantação eram extremamente altos, devido ao *hardware* e software customizados.

Hoje, o crescimento exponencial do poder de processamento dos computadores levou a uma ampla disseminação do uso de ferramentas digitais de concepção e de fabricação, derrubando os custos e as barreiras de utilização dessas novas tecnologias fora de seu habitat tradicional na indústria. Nas escolas de arquitetura são ensinados o uso de programas de modelagem tridimensional extremamente versáteis e de baixo custo, que permitem que um braço robótico industrial seja programado a partir de sua interface gráfica, sem a digitação de uma única linha de código.

É a partir desse novo paradigma que o pesquisador formula a proposição que sustenta essa tese, que pode ser definida como sendo a integração das técnicas mais recentes da fabricação digital robotizada com a produção tradicional do GRC, requalificando uma técnica construtiva consolidada, que se utiliza de materiais compósitos avançados, mas que é ainda executada de forma praticamente semi-artesanal, contribuindo para a industrialização da arquitetura.

No caso da produção atual de GRC, existe um claro descasamento entre o desenvolvimento do material — matrizes cimentícias aliadas a aditivos de alto desempenho — com a sua técnica de manufatura artesanal, o que impede uma maior disseminação de sua aplicação apesar da demanda crescente.

A fabricação digital pode romper com esse paradigma produtivo atrasado, por meio da automação da etapa mais insalubre do processo, que é a projeção do GRC, quando uma grande quantidade de partículas de fibra de vidro se espalha no ambiente podendo causar doenças pulmonares crônicas nos trabalhadores, como a silicose.

Embora não tenha sido possível encontrar dados específicos, esse pesquisador acredita não ser mera coincidência o fato de que as grandes empresas produtoras de painéis de GRC para diversas obras contemporâneas estejam situadas em países onde o grau de fiscalização e de proteção dos trabalhadores são baixos (em comparação com países de maior grau de desenvolvimento), segundo os critérios da OIT (Organização Internacional do Trabalho), como China, Índia e Arábia Saudita.

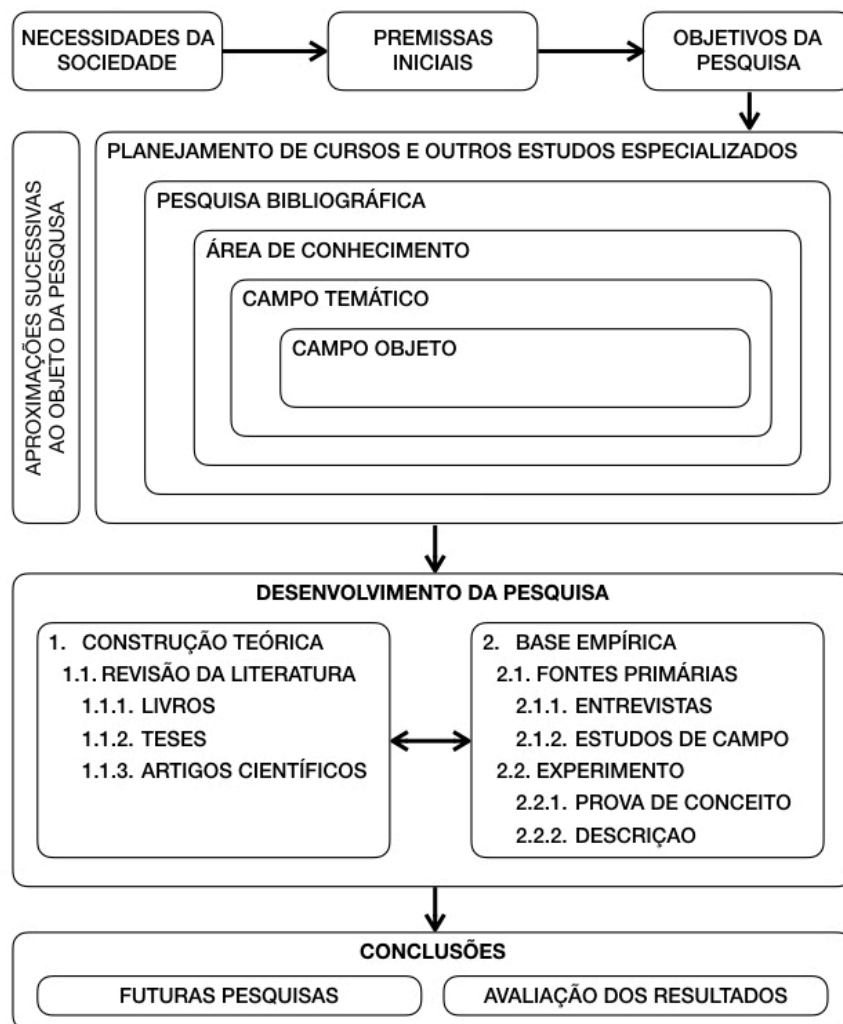
Com base na convergência digital entre os processos de representação e de produção da arquitetura contemporânea — o continuum digital — a presente pesquisa parte do conhecimento adquirido ao longo de mais de 50 anos de desenvolvimento do material e propõe conceber um novo processo de manufatura de painéis de GRC com superfícies complexas, utilizando a fabricação digital robótica na confecção dos moldes e na projeção da matriz cimentícia. O conceito desenvolvido pretende minimizar as barreiras para a adoção dessa solução construtiva, fazendo com que todo o caminho — da concepção das formas até os arquivos digitais necessários para produção robotizada — possa ser realizado pelo próprio arquiteto, que passa a ganhar mais controle sobre o processo como um todo. Segundo as palavras de Kolarevic (KOLAREVIC, 2005), essa integração redefine a relação entre a concepção e a produção, reinventando o papel do arquiteto como um “master builder” digital, o ente que integra as disciplinas de arquitetura, engenharia e construção sem as descontinuidades que surgiram “quando os designers passaram a se ocupar apenas da confecção de desenhos” (MITCHELL; MACCULLOUGH, 1999)

2.2 Metodologia

Considerando a arquitetura uma especialidade inserida no campo das ciências sociais aplicadas, o método escolhido para o desenvolvimento desse trabalho é predominantemente indutivo com uma abordagem empírica — embora não se prescindia da dedução, como na caracterização do problema e nas suas conclusões apresentadas.

O desenvolvimento da pesquisa se deu em duas etapas distintas: (1) construção teórica e (2) embasamento empírico, cada uma delas divididas em sub etapas, conforme apresentado graficamente no fluxograma geral abaixo:

Figura 19 - Fluxograma desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Desenho do autor adaptado de HANAI apud FONSECA DE CAMPOS, 2002

A partir da definição do seu campo objeto, definiram-se o quadro de referências que dão contorno às proposições apresentadas no capítulo anterior e formaram os fundamentos da sua construção teórica. Essa primeira etapa se deu por meio da revisão bibliográfica das fontes secundárias de pesquisa. A maioria dos livros analisados e discutidos nessa etapa encontra-se na biblioteca da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP) com poucas exceções, como livros sobre tópicos muito específicos ou versões eletrônicas (e-books) adquiridos pelo próprio pesquisador via sites de venda online.

As teses e dissertações estudadas foram encontradas em seu formato eletrônico nos bancos de dados abertos das seguintes universidades: USP, UNESP, UNICAMP, MIT (EUA), Cambridge (Inglaterra), Canterbury (Nova Zelândia), Bath (Inglaterra), Delft (Holanda), USC (EUA), Chalmers (Suécia) e UIC (Espanha).

Em se tratando de uma pesquisa cujo objeto está intimamente relacionado com os últimos avanços da tecnologia de robótica e fabricação digital aplicados a arquitetura, o estudo de artigos científicos teve um peso importante no desenvolvimento dessa tese. A grande maioria foi encontrada em meio eletrônico mediante pesquisa em reconhecidos bancos de dados de publicações acadêmicas, tais como: Scopus, Research Gate, Jstor, Doaj e Science Direct. Além desses bancos de dados, foram consultados também os anais dos principais congressos e simpósios relacionados com o tema da pesquisa, tais como: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design (RobArch), International Symposium on Ferrocement and Thin Cement Composites (Ferro12), International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe), Sociedad Iberoamericana de Grafica Digital (SIGraDI) e International Glassfibre Reinforced Concrete Association Congress (GRCA).

A segunda etapa, a base empírica da pesquisa, consiste primordialmente na realização de uma prova de conceito que visa a corroborar com as proposições levantadas pelo pesquisador. Essa prova de conceito baseia-se na realização e descrição de um experimento prático, envolvendo a concepção digital de uma superfície complexa e a posterior prototipagem por meio de fabricação digital robótica.

O experimento foi planejado durante a evolução das etapas anteriores do trabalho e também pelo acesso ao material advindo de fontes primárias de informação, gerados por esse pesquisador. Esse material primário é constituído primordialmente pela entrevista concedida pelo Prof. Carlos Balaguer e o estudo de campo realizado durante a participação do autor em um curso na ETH.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

O uso de computadores na concepção de arquitetura e design é um assunto que já rendeu inúmeras publicações entre livros e periódicos, além de teses e dissertações em diversas universidades no Brasil e no exterior. Desde a sua aplicação mais pragmática, como ferramenta de auxílio ao desenho (PIEDMONT-PALLADINO, 2007), até os impactos filosóficos mais profundos acerca da digitalização dos processos de criação (EISENMAN, 1993; LYNN, 1999; MITCHELL; MACCULLOUGH, 1999; SCHUMACHER, 2012), muito já foi debatido sobre o uso dessas ferramentas no cotidiano do arquiteto.

Entretanto, a digitalização dos meios de produção na arquitetura ainda é assunto relativamente recente no meio. Apenas em 2005 surge uma das obras seminais — que é uma das bases dessa pesquisa — sobre as mudanças no modo de materializar a arquitetura trazidas pela fabricação digital, escrita pelo arquiteto croata Branko Kolarevic e intitulada “Architecture in the digital age : design and manufacturing” (KOLAREVIC, 2005).

Juntamente com outros autores — arquitetos e pioneiros no campo da arquitetura digital, como William Mitchell, Greg Lyn e Marcos Novak — Kolarevic apresenta as bases de conceitos fundamentais para entendermos as mudanças ocorridas no modo de pensar, projetar e construir arquitetura nos dias de hoje, tais como a customização em massa, o continuum digital e o paralelo traçado entre o arquiteto digital e os máster builders da renascença. De acordo com Kolarevic, o arquiteto que trabalha com as ferramentas digitais de projeto e fabricação tem um maior controle sobre o processo de produção da arquitetura de forma mais ampla. À maneira de Brunneleschi — que além dos edifícios projetava as máquinas, guas e acessórios necessários para a sua construção (PRAGER; SCAGLIA, 2012) — Frank Gehry interveio diretamente no formato dos cilindros da calandra que fabricou as placas de titânio que revestem o seu museu em Bilbao (SENNETT; MARQUES, 2009).

A digitalização proporciona uma continuidade entre a concepção e manufatura que aproxima o arquiteto de seu objeto final, a obra construída. O projeto deixa de ser

um conjunto de documentos de especialidades isoladas e os arquivos digitais que contém a intenção original do arquiteto transitam de forma fluida entre todas as etapas e atores, da concepção à sua fabricação (KOLAREVIC, 2001). Essa última afirmação, embora aponte para os desdobramentos da fabricação digital em um futuro próximo, ainda não representa a realidade no dia-a-dia do arquiteto comum, que lida com a construção artesanal de suas obras. Hoje, é possível afirmar que toda a concepção de projetos de arquitetura é feita por meios de ferramentas digitais, mas a maior parte sua construção ainda é calcada em processos manuais e pouco industrializados. O elo que falta para que o continuum idealizado por Kolarevic se torne de fato a regra é o avanço na industrialização da construção civil. Enquanto a construção de um edifício se assemelhar mais com a visão de uma ruína do que com a linha de montagem de um Boeing 787, será preciso centrar os esforços em tornar os materiais e processos de manufatura mais integrados e, sobretudo, mais eficientes.

Figura 20 - Exemplo de desperdício na construção civil



Fonte: Master Ambiental³²

Esse foi o objetivo do outro trabalho seminal que embasa essa tese — citado aqui anteriormente durante a formulação da proposição — que foi a pesquisa

³² Disponível em: <https://www.masterambiental.com.br/noticias/residuos-da-construcao-civil>. Acesso em: 01/03/2020.

desenvolvida em conjunto pelo Prof. Carlos Balaguer e pela empresa Dragados e Construcciones na Espanha, no início da década de 1990.

A análise dos artigos produzidos pela equipe espanhola somada à entrevista concedida pelo Prof. Balaguer a esse pesquisador, foram a origem dos questionamentos que originaram essa tese. Por que, apesar de demonstrar que a fabricação robótica era mais eficiente, com o aumento da produção e melhoria na qualidade dos painéis, aquela pesquisa não foi levada adiante? Como acelerar o processo de industrialização da construção dentro de um paradigma de ciclo aberto de pré-fabricação?

A fabricação digital possui um papel importante nesse processo, pois permite a otimização da produção ao mesmo tempo em que mantém a possibilidade de customização do produto. Essa última talvez seja a característica mais importante e que motivou essa pesquisa. A industrialização da construção civil é tema de debates há mais de um século, se contarmos apenas o período onde essa questão foi colocada de maneira mais clara por alguns arquitetos expoentes do movimento moderno, como Gropius ou Le Corbusier. Inúmeros livros e teses foram produzidos acerca do tema e parece que o único lugar comum para o qual todos apontam é o fato de que a construção civil sempre andou a passos lentos em direção a uma industrialização efetiva. A produção de edificações baseadas nos sistemas de pré-fabricação de ciclo fechado no período pós 2ª guerra — o único em que se pode afirmar que houve um movimento mais disruptivo no sentido de uma industrialização efetiva — produziu tantos equívocos arquitetônicos e urbanísticos, que se criou uma espécie de “trauma” nos arquitetos. Projetar espaços visando a construção industrializada equivalia a disseminar a massificação, a pobreza estética e a falta de qualidade material.

Os equipamentos de fabricação digital — que são utilizados pela indústria automobilística e aeroespacial há muitos anos — possuem o potencial de eliminar os problemas relacionados à massificação da produção em série. Ao permitir a fabricação de elementos distintos em baixa escala, essas máquinas possibilitam ao arquiteto uma maior liberdade de criação sem depender de processos artesanais de produção, que são mais caros e demorados do que os industrializados.

A pesquisa de Balaguer teve implicações importantes ao adaptar um equipamento industrial avançado a um processo de produção artesanal, dando um passo incremental no caminho do desenvolvimento da indústria da construção civil, ao abrir caminhos para o uso da robótica industrial na arquitetura industrializada.

Por se tratar de um assunto relativamente recente, a maior parte do embasamento teórico e empírico ao qual se refere essa pesquisa — com a exceção dos livros de Kolarevic e dos artigos de Balaguer — se deu com a leitura de artigos publicados em periódicos e anais de conferências internacionais sobre o tema de fabricação digital e robótica, disponíveis para consulta na internet. Para o desenvolvimento da base empírica, além dos livros sobre pré-fabricação existentes na biblioteca da Fau Usp e a tese de doutoramento do Prof. Paulo E. Fonseca de Campos, foram consultados diversos manuais sobre a produção de GRC editados por entidades como o *American Concrete Institute* (ACI), *Precast Concrete Institute* (PCI) e *Glassfibre Reinforced Concrete Association* (GRCA).

3.1 Arquitetura industrializada

“Como é possível que na era dos computadores, das viagens espaciais e da produção em série de qualquer tipo de artigo estamos apenas começando o processo de industrializar a construção?”. Essa é uma das perguntas feitas por Bender no início da década de 1970 em seu livro “Una visión de la construcción industrializada” (BENDER, 1976). Passado quase meio século a pergunta continua pertinente, em especial nos países em desenvolvimento onde não há produção de tecnologia de ponta, como o Brasil.

A resposta a esse questionamento não é simples, mas parte dela está embutida na própria questão. O baixo nível de industrialização na construção civil de modo geral não é um limite imposto pela técnica, mas pela complexidade inerente à produção de um edifício, e é nela que reside a maior parte do problema.

“Somos bons para solucionar problemas complicados, mas ainda não sabemos como lidar com questões complexas, que envolvem um grande grau de incerteza e um grande número de interesses distintos”. A afirmação do filósofo Daniel Schmachtenberger se refere às mudanças climáticas, mas podemos adaptá-la

perfeitamente para o problema da construção de uma edificação. Para se tirar uma obra do papel é necessário reunir, um a um, centenas de produtos diferentes, procedentes de vários fabricantes e que são entregues por diversos canais. Também é preciso organizar de forma hierárquica um grande número de empresas e profissões especializadas, além de cumprir um conjunto de leis de edificação e zoneamento — muitas vezes contraditórias entre si — e acompanhar os processos legais referentes à sua propriedade. Além de todo o planejamento necessário para se alcançar um objetivo comum — a construção do edifício — arquitetos, engenheiros e clientes possuem interesses distintos entre si na forma como chegar a esse objetivo.

Não faz parte do escopo dessa tese abarcar toda a história da industrialização na construção civil e na arquitetura, mas como propõe-se avançar no caminho do seu desenvolvimento, acredita-se ser importante esclarecer o entendimento do autor sobre a pertinência desta pesquisa dentro desse campo.

Os avanços na área da industrialização da construção confundem-se com a história da mecanização dos meios de produção. Em sua primeira etapa, as máquinas que simplesmente substituíam a força humana produziram os primeiros elementos pré-fabricados de ferro fundido que deram um impulso a arquitetura industrial nos sécs. XVIII e XIX. Colunas e vigas desse material eram usadas em substituição a madeira em diversas fábricas na Inglaterra e vieram a constituir importantes elementos da arquitetura produzida no Brasil na segunda metade do séc. XIX (BRUNA, 1976). Em um segundo momento ocorreu a transformação dos mecanismos, que passaram a ser construídos e regulados de forma a repetir determinadas tarefas específicas. Isso limitou o operário apenas a função de manter a máquina em funcionamento da forma mais eficiente possível e deu o impulso ao início da criação das primeiras linhas de montagem. A produção seriada de objetos em grandes quantidades viria a se tornar o paradigma dominante até os dias de hoje.

O período pós 2ª guerra mundial, quando foi necessário construir habitações em massa para uma Europa praticamente destruída, foi o momento onde se pode aplicar os princípios da linha de montagem à construção civil, o que acabou se mostrando uma realidade muito diferente daquelas visionadas por Le Corbusier, Gropius ou Füller (CORBUSIER, 1998; FULLER, 2016; GROPIUS, 2015) no início do

séc. XX . Os edifícios construídos com elementos pré-fabricados pesados de concreto, manufaturados em sistemas de ciclo fechado de produção, resultaram em uma arquitetura massificada e soluções urbanas precárias.

Figura 21 - Habitação popular em Padre Miguel, Rio de Janeiro (1974-2019)



Fonte: arquivo do autor e Google Maps

Se podemos considerar que a experiência na aplicação da produção seriada para a indústria da construção civil no período do pós-guerra não foi bem sucedida, mais difícil ainda é pensar em sua adaptação na produção de uma arquitetura contemporânea, onde as soluções adotadas pelos arquitetos para a resposta a problemas cada vez mais complexos estão se voltando para a construção de formas cada vez mais únicas (KOLAREVIC, 2001).

Segundo a ideia desenvolvida na formulação do campo objeto dessa pesquisa, ao observarmos a relação entre a expressão formal e as técnicas construtivas adotadas nas obras de Zaha Hadid, temos uma pista de como esse problema pode ser abordado de forma inovadora por meio da união de processos produtivos tradicionais com a fabricação digital. O uso cada vez maior desse material (GRC) em suas obras parece resolver a questão da materialização da complexidade formal, mas ele envolve outros aspectos relativos à sua manufatura que ainda não são tão abertamente abordados e que são parte dos motivos da realização dessa pesquisa.

A obtenção de avanços (radicais ou incrementais) tecnológicos na industrialização são o resultado do desenvolvimento de inovações nos processos de produção e em seus materiais (ou produtos) (FONTANINI; CARVALHO, 2005; OECD, 2005).

Sob esse aspecto, o GRC, como será visto adiante, mostrou-se um material que se desenvolveu muito nos últimos quarenta anos, incorporando avanços nas áreas dos materiais compósitos e da nanotecnologia. Entretanto, o seu processo produtivo ainda é extremamente artesanal, ineficiente e insalubre. Esse descasamento entre um material compósito extremamente avançado e um processo de manufatura precário é o problema principal que esse trabalho se propõe a equacionar por meio do uso intensivo da fabricação digital robotizada.

3.2 O Material

Todos os autores que escrevem acerca do tema “concreto” cumprem um certo ritual inicial, onde invariavelmente dizem que “o concreto é um dos materiais de construção mais antigos da humanidade e é empregado desde o Império Romano, na construção do Panteão de Roma”. Mais interessante do que seus dois mil anos de antiguidade é o fato de seu esquecimento durante os séculos seguintes. O concreto só veio a ser utilizado novamente de forma massiva como material construtivo no final do século XIX. Isso ocorreu, em parte, pelo fato de a argamassa de cal não ser o melhor material para ser usado como material de ligação, mas principalmente porque se acreditava que a alvenaria de pedras era a única opção satisfatória para se construir com qualidade.

Essa realidade começa a mudar no final do Séc. XVIII, após a revolução francesa, com a busca por soluções mais econômicas para a construção civil. O uso de fachadas revestidas com estuque, imitando a alvenaria de pedras se torna padrão, e é nessa época que os primeiros pesquisadores se voltam para o passado e perguntam por que o concreto não voltou a ser utilizado pelos arquitetos e construtores por mais de vinte séculos?

Curiosamente as origens do uso concreto tal qual conhecemos hoje derivam de uma técnica simples: a taipa (COLLINS, 2004). Mais do que o material, a influência da construção em taipa no uso contemporâneo do concreto se dá pelo uso das fôrmas. Técnicos começaram a experimentar melhorias na matéria prima base da taipa (terra), acrescentando argamassa a fim de aumentar a sua resistência. Logo em seguida surgem os primeiros experimentos na adição de agregados, originando o que conhecemos como o béton.

François Cointeraux foi o primeiro construtor a propagar o método da construção em pisé (taipa) que ajudou a desenvolver o trabalho de formas com o concreto armado, entre o final do séc. XVIII e início do Séc. XIX. Seu sucessor mais importante foi François-Martin Lebrun, um arquiteto, que construiu com sucesso várias obras usando o novo material, experimentando vãos cada vez maiores e novas possibilidades de expressão utilizando o material. Lebrun foi o primeiro a pensar em adicionar reforços de metal a estrutura de concreto a fim de contrabalançar os esforços de compressão em uma estrutura de abóbada, que ruiu.

O terceiro nome importante na sucessão dos pioneiros no uso do concreto como material de construção foi outro François, desta vez com sobrenome Coignet. Coignet, usando de suas capacidades como industrial, procurou encontrar os tipos de agregados mais econômicos de serem utilizados, a fim de baratear as construções. Sua primeira tentativa foi com o uso de clínquer e cinzas. Mostrando-se não forte o suficiente, Coignet tentou substituir a mistura por areia pura, com resultados ainda piores. Entretanto, durante os experimentos o construtor se convenceu de que o problema não estava no material, mas sim na consistência do concreto utilizado. A época o controle no uso de água não existia e a mesma era adicionada em grande quantidade a fim de obter um concreto com densidade baixa, propício a ser misturado com máquinas mais simples e fácil de ser lançado entre as formas.

Após várias experiências, incluindo a construção de máquinas para efetuar a mistura mais seca de forma mais fácil, Coignet conseguiu chegar a um resultado satisfatório. Em 1855 Coignet deposita as primeiras duas patentes envolvendo o uso de concreto: Béton Économique (sobre o uso de agregados mais baratos) e Emploi du Béton, mais importante, sobre o método de emprego e que lhe deu exclusividade

na construção de obras monolíticas utilizando concreto como material. Após o desenvolvimento de diversas obras utilizando o material, na tentativa de construir a fachada de um teatro, Coignet se deparou com o que seria uma das maiores limitações do material. Apesar da plasticidade do concreto ser ilimitada, essa mesma plasticidade não é alcançada pelas fôrmas onde o concreto é lançado.

Embora sua empresa tivesse muitas obras contratadas e construídas, a mesma entrou em dificuldades financeiras devido a falta de pagamentos do poder público e a explosão da guerra. Coignet foi obrigado a fechar, mas deve ser lembrado como o pioneiro no uso do concreto como material de construção em larga escala, que serviu como base para o ressurgimento, vinte anos depois, dos trabalhos na Inglaterra e América.

Já na segunda metade do Séc. XVIII uma série de pesquisadores, arquitetos e construtores depositaram várias patentes acerca no novo material, elevando o grau de desenvolvimento do concreto. É nesse momento que se deposita a patente do cimento Portland por Joseph Aspdin (que possui exagerada fama na história do descobrimento do concreto, uma vez que o uso destinado ao cimento de sua descoberta era para a criação de uma pedra artificial, para substituir a pedra natural em ornamentos. O uso seu como aglomerante só ocorreu anos depois). O primeiro construtor a utilizar os métodos de Coignet foi Joseph Tall, que sabiamente identificou que o maior problema do sistema era o alto custo do trabalho com as formas. Assim foi o primeiro a pensar na standardização como uma melhoria no sistema original.

Alguns arquitetos e construtores passaram a adotar o material em obras de maior importância e para proprietários de maior renda. O uso ganha força, assim como os problemas advindos da impossibilidade de testar o material em laboratório e a inexistência do cálculo estrutural. Várias construções vêm abaixo devido a erros de construção ou mesmo a audácia dos construtores, que visavam construir edifícios cada vez maiores, testando na prática os limites do material.

Mesmo assim, o concreto é utilizado em grande escala, embora ainda seja considerado como um material inferior, devido ao seu pobre acabamento superficial

(à época) e a necessidade de se utilizar outro material (ferro) para o reforço de paredes, o que causava desconforto em alguns construtores. Enquanto alguns repudiavam, outros estudavam as possibilidades de tornar o concreto e o ferro materiais inseparáveis. Patentes nesse sentido foram depositadas, já demonstrando que com a combinação dos dois materiais, o concreto tinha um comportamento monolítico. Pouco a pouco a literatura e a prática foram preparando o terreno para as descobertas que viriam revolucionar a arquitetura no final do século.

Alexander Payne foi o primeiro a aplicar o ferro de forma estrutural em domos de concreto, com barras circulares concêntricas ao redor de toda a construção.

Entre sucessos e desastres, cria-se um impasse sobre o uso do material de forma generalizada. Embora várias patentes tenham sido depositadas até o final do Séc. XIV, os arquitetos e construtores menores não viam o seu uso com tantas vantagens, permanecendo ainda como um material “barato” a ser usado em obras mais simples.

Os arquitetos norte-americanos não desenvolveram um profundo interesse pelo novo material devido ao preço proibitivo do cimento importado. Quando a indústria do cimento se estabeleceu nos EUA o uso do aço como material de construção básico já era amplamente difundido. Entretanto, devido à necessidade de proteção contra incêndios das paredes e das estruturas, o uso do concreto associado ao aço passou a ser estudado em maiores detalhes. Abria-se um espaço para o desenvolvimento do estudo científico da união dos dois materiais e para o nascimento do cálculo estrutural.

Vários estudos sobre o tema da união do aço e concreto se deram no último quarto do Séc. XIV nos EUA, levando a uma tensão entre os pioneiros do concreto. Enquanto Monier e Lambot haviam patenteado o uso do aço como reforço no cimento (fazendo o que seria chamado de argamassa armada, não concreto, uma vez que não se utilizavam agregados), Hyatt se considerava o inventor do sistema nos EUA. Embora os franceses tenham sido pioneiros no uso, Hyatt foi quem primeiro entendeu de fato a importância e o porquê do concreto armado, sendo o primeiro a pregar o uso da armação de aço na parte inferior das vigas, de modo a suportar os esforços de tração.

É de um belga — que também requeria o pioneirismo no descobrimento do concreto armado — François Hennebique, a invenção do uso de estribos para unir as armaduras superiores e inferiores.

É um período de intenso desenvolvimento de pesquisas sobre o uso de concreto associado ao ferro ou ao aço, com a criação de inúmeras patentes e invenções. Tal desenvolvimento acrescido do surgimento das normas e regulações de uso fez com que houvesse um maior conhecimento no uso do material, e o mesmo deixou de ser uma novidade e passou a ser um material amplamente difundido no mundo arquitetônico moderno.

Entre o final do Séc. XIX e o início do XX deram-se os primeiros experimentos com a pré-fabricação em concreto armado na Europa e nos Estados Unidos.

Em 1891, no final de suas atividades, a empresa de Coignet na França produziu vigas de concreto pré-fabricadas para a construção do Cassino de Biarritz e em 1904 J. Brodie patenteia o que viria a ser o primeiro sistema fechado de construção, com o uso de grandes painéis de concreto (ORDOÑEZ, 1974).

Em 1908 o inventor norte-americano Thomas Alva Edison requereu a patente de um sistema construtivo para a edificação de residências utilizando concreto armado e formas metálicas pré-fabricadas (EDISON, 1917). O sistema permitiria a produção de casas em larga escala, barateando o custo final da obra por meio da reutilização de suas formas. Os mais de dois mil e trezentos moldes metálicos eram montados para formar não apenas as fundações e a estrutura principal da edificação, mas todas as suas paredes, pisos, tetos, escadas e partes que incluíam desde as banheiras até os elementos de decoração. Tudo moldado em uma única concretagem, de forma monolítica.

O empreendimento fracassou após a construção de poucas unidades — o custo e a complexidade da montagem das formas eram muito altos para os padrões técnicos da época —, mas a utilização do concreto como material apto para a construção industrializada mostrou-se correta.

O período entre guerras foi marcado pelo otimismo com que os grandes arquitetos adotaram as premissas da pré-fabricação em concreto em seus projetos, como a casa Do-Mi-No de Le Corbusier, as Meister Häuser e Gropius em Dessau e a Dymaxion House de Füller nos EUA (ORDOÑEZ, 1974). Entretanto, o início da segunda guerra adiou os esforços de industrialização da construção por quase vinte anos e o ideal da pré-fabricação atingiu seu auge apenas entre as décadas de 1950 e 1970 com a reconstrução da Europa Ocidental e as experiências de construção massiva de cidades inteiras formadas por edificações pré-fabricadas na União Soviética (SALAS, 2008).

Entretanto, se no campo dos processos construtivos, os sistemas pré-fabricados em concreto (em especial os baseados em ciclos fechados de produção) passaram a ser amplamente questionados, o concreto enquanto material incorporou os últimos avanços tecnológicos trazidos pelas pesquisas realizadas durante a guerra e passou a fazer parte da classe mais avançada dos materiais: a dos compósitos.

3.3 O GRC

Por aliar a tecnologia de ponta dos materiais compósitos com o baixo custo e a tradição construtiva do concreto convencional, o interesse sobre o GRC tem aumentado consideravelmente na última década, o que pode ser comprovado pelo grande número de obras significativas produzidas com esse material.

O Glassfibre Reinforced Concrete (GRC) é um material compósito, formado por uma matriz cimentícia (cimento, agregados finos, água e aditivos) reforçada estruturalmente com fibras de vidro álcali-resistentes (AR). O material que conhecemos hoje vem se desenvolvendo há mais de 50 anos, porém pode-se dizer que a sua origem é ainda mais remota, derivando da invenção patenteada em 1901 pelo austríaco Ludwig Hatschek, chamada de “Processo para a produção de pedra artificial por meio de materiais fibrosos e ligantes hidráulicos”³³. O chamado “método

³³ Tradução livre do título do documento original AT5970 (B)—1901-11-25 “*Verfahren zur Herstellung von Kunststeinplatten aus Faserstoffen und hydraulischen Bindemitteln*”, acessado em 15.10.2019 <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=AT&NR=5970B&KC=B&FT=D&ND=1&date=19011125&DB=&locale=#>

Hatschek” deu origem poucos anos depois a empresa Eternit, conhecida mundialmente pela fabricação de placas cimentícias.

A seleção e a proporção dos materiais básicos que compõem a matriz cimentícia do GRC variam de acordo com o método de produção escolhido e com o design das peças em si, porém algumas características gerais podem ser pormenorizadas.

Cimento

O cimento mais utilizado em sua composição é o Portland comum, que no Brasil é identificado como CP-V-ARI (cimento Portland de Alta Resistência Inicial), recomendado para a produção de elementos pré-fabricados devido à rapidez com que atinge um grau de resistência adequado para a desforma da peça.

Agregados finos

Idealmente, somente areia industrial com alto teor de sílica (>96%), lavada e seca deve ser utilizada como agregado fino. Areias comuns, utilizadas na fabricação de concreto convencional não devem ser utilizadas, pois podem levar a perda das propriedades mecânicas do GRC.

Aditivos

O uso de aditivos como plastificantes ou superplastificantes são recomendados, uma vez que melhoram a performance geral do concreto no que se refere a trabalhabilidade da matriz e na sua resistência final.

Polímeros

A cura de peças de grandes superfícies esbeltas de concreto como os painéis de GRC é crítica, uma vez que o grau ideal de umidade tem que ser mantido durante toda a fase de hidratação do cimento a fim de eliminar problemas de fissuração causados pela rápida evaporação da água. Por esse motivo é comum a adição de polímeros acrílicos no mix, como forma de reduzir a permeabilidade nas primeiras horas de cura, garantindo a hidratação correta.

Materiais cimentícios suplementares

Estudos comprovam que uma porcentagem do cimento Portland utilizado na matriz pode ser substituída por uma gama de materiais pozzolânicos como a metacaulinita ou a microsilica, trazendo não só uma economia no uso do cimento (reduzindo a pegada de carbono do material) como melhora na resistência mecânica do GRC.

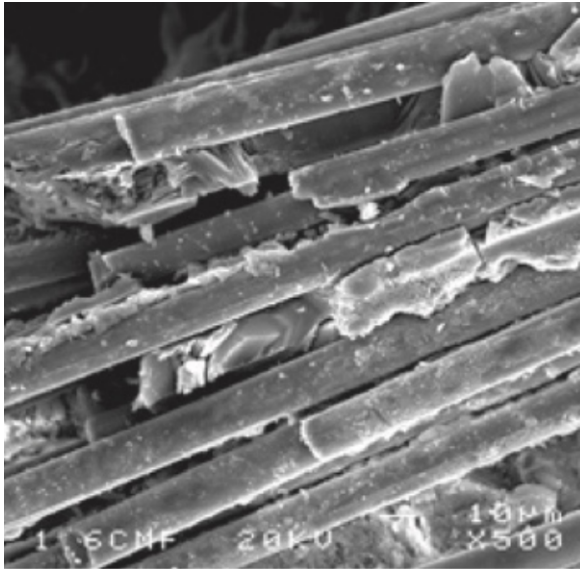
Fibras de vidro AR e avanços na pesquisa

Entre a patente de Hatschek e o final da primeira metade do Séc. XX, pouco se avançou no campo da substituição do asbesto na produção das placas cimentícias devido a dificuldade de obtenção de novas fibras com as mesmas propriedades mecânicas. Entretanto, durante o período da II Guerra Mundial ocorreu um grande salto no conhecimento acerca dos materiais compósitos. Já no início da década de 1940 o resultado das pesquisas com plásticos reforçados fez com que a fibra de vidro borosilicato comum (*E-glass*) — inventada pela empresa Owens-Corning Fiberglas Corporation — se tornasse um substituto promissor do asbesto devido às suas propriedades mecânicas estruturais (BALL, 2011).

Entretanto, experimentos conduzidos por pesquisadores soviéticos entre 1950 e 1965 revelaram que esse tipo de fibra comum sofre rápida degradação devido ao ataque dos álcalis presentes no cimento (BIRYUKOVITCH, K.L. et al, 1965 apud (MAJUMDAR; NURSE, 1974). O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), um dos subprodutos encontrados durante a hidratação do cimento, torna o ambiente extremamente alcalino (Ph aproximado de 12,5), o que leva a deterioração das fibras de vidro³⁴ causando a diminuição do seu diâmetro e, por consequência, de sua resistência aos esforços solicitantes (Fig.22).

³⁴ Esse processo pode ser atribuído à quebra das ligações entre os átomos de silício causados pela alta concentração de Íons de hidroxila (OH^-) na solução. Além disso a cal forma grandes cristais entre as fibras de vidro, preenchendo os espaços vazios e aumentando a sua rigidez, o que também causa a diminuição da capacidade de conferir resistência ao cimento. (MAJUMDAR; NURSE, 1974)

Figura 22 - Microfotografia mostra a corrosão em fibras de vidro AR



Fonte: (ARABI; MOLEZ; RANGEARD, 2018)

Dentre as tentativas para solucionar o problema³⁵, a aproximação mais bem-sucedida foi a de Majumdar e Ryder no British Research Establishment (BRE) (MAJUMDAR; NURSE, 1974). Os pesquisadores desenvolveram uma bateria de testes submetendo amostras de fibras de vidro adicionadas a uma matriz de cimento Portland comum em soluções alcalinas. Os testes determinaram que um vidro formulado com a adição de um mínimo de 16% de óxido de zircônio era resistente ao ataque dos álcalis, mantendo as suas características mecânicas inalteradas. A companhia norte-americana Pilkington Glass Co. juntou-se aos esforços de pesquisa e passou a comercializar a nova fibra sob o nome de Cem-FIL® a partir do início da década de 1970.

Em paralelo com as pesquisas acerca das fibras de vidro, foram obtidos avanços significativos também no desenvolvimento da outra parte do compósito, o cimento. Ao longo dos anos foram realizados estudos sobre a possibilidade do aumento da resistência e durabilidade do GRC na tentativa de reduzir ou eliminar o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação da matriz.

³⁵ Outras soluções de proteger a fibra de vidro comum contra o ataque dos álcalis foram tentadas, como a de incorporar um aditivo a base de zircônio na matriz ou usar cimentos especiais como o cimento aluminoso (com alto teor de alumina), mas não obtiveram o mesmo sucesso no mercado do que a criada pela Pilkington/Cem-Fil.

A substituição do cimento Portland comum por outros ligantes com características físico-químicas distintas, como o cimento aluminoso (ou com alto teor de alumina) teve resultados satisfatórios no aumento da durabilidade a longo prazo do GRC, porém as pesquisas também relataram que essa alteração trazia um indesejado aumento da porosidade do composto com a consequente perda de sua resistência (ACI COMMITTEE 544, 2002).

Desenvolvimentos mais recentes indicam que a substituição de parte do cimento na matriz por outros materiais reativos aos carbonatos, causa significativa melhora na durabilidade e resistência mecânica do concreto, como o silicato de alumínio (Metacaulim) ou a microsilica (HELENE; MEDEIROS, 2004). Além de impedir a formação desse subproduto indesejado, esses aditivos são menos densos e possuem grau de finura maior do que o do cimento, preenchendo os espaços vazios entre as fibras de vidro impedindo a sua degradação pelo Ca(OH)_2 .

Aplicações

A aplicação mais comum do GRC é, de longe, a fabricação de painéis esbeltos para revestimento para fachadas. Segundo o Prestress/Precasted Concrete Institute (PCI), mais de cinco milhões de metros quadrados desses componentes foram fabricados nos Estados Unidos entre 1970 e 1993, o que representa mais de oitenta por cento de todo o uso desse material (ACI COMMITTEE 544, 2002).

Alguns dos primeiros edifícios revestidos com painéis de GRC, ainda na década de 1970, se tornaram marcos históricos, tais como a fábrica de essências da UOP, de Piano + Rogers em Tadworth (Reino Unido, 1973-1974) e antiga sede do Credit Lyonnais³⁶ em Londres, projetada por Whinney, Son & Austen Hall (1974-1977), hoje tombada pelo patrimônio cultural (Fig. 23).

³⁶ Obra conhecida nos dias atuais pelo nome de seu endereço, 30 Cannon Street.

Figura 23 - Primeiros edifícios revestidos com painéis de GRC



Fontes: Colliers International e Piano + Rogers³⁷

Devido — entre outros fatores — à sua excelente relação entre peso e resistência, o GRC tem sido utilizado desde então para os mais variados fins, de elementos arquitetônicos decorativos a dutos de drenagem (GILBERT, 2004). Alguns exemplos dos diversos usos do material na construção civil são encontrados na tabela abaixo:

³⁷ Disponíveis em <https://30cannonstreet.com> e <https://www.rsh-p.com/projects/uop>. Acesso em: 01/03/2020

Tabela 1 - Aplicações do GRC na construção civil

Área de aplicação	Exemplos específicos
Agricultura	Abrigos Canais de irrigação Reservatórios
Revestimento arquitetônico	Painéis de fachada interior Painéis de fachada exterior
Componentes construtivos	Soleiras e peitoris de janelas Unidades pré-fabricadas de banheiros Bancadas e prateleiras Formas permanentes para concretagem Elementos decorativos
Dutos e shafts	Dutos de serviços para cabos e tubulação
Restauro	Recomposição de elementos arquitetônicos, cornijas e arquitraves
Mobiliário urbano	Bancos Lixeiras Vasos e canteiros Abrigos de ônibus Barreiras acústicas

Fonte: Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI COMMITTEE 544, 2002), traduzida e adaptada pelo autor.

Como visto, o GRC é um material flexível e pode ser utilizado de várias maneiras em campos distintos, da agricultura ao mobiliário urbano. Entretanto, o foco dessa pesquisa é o de explorar as potencialidades da aplicação do GRC como forma de materialização de projetos na arquitetura contemporânea, cujas geometrias, criadas pelas novas ferramentas de modelagem digital, se tornam cada vez mais complexas e desafiantes do ponto de vista construtivo.

Confirmando essa perspectiva, é possível observar que o uso de sistemas de fachadas ventiladas com painéis esbeltos em GRC foi explorado na construção das obras mais recentes de Zaha Hadid Architects (Heydar Alyiev Center, Baku), Jean

Nouvel (National Museum, Qatar), Frank O. Gehry (Fondation Louis Vuitton, Paris) e Diller+Scofidio (The Broad, Los Angeles).

No decorrer desse capítulo, para estabelecer uma maior clareza no recorte do objeto de estudo desta tese, propomos separar as três variáveis mais importantes na confecção de painéis esbeltos de GRC: o processo de manufatura, a tipologia construtiva e a geometria da superfície dos painéis.

Processo de manufatura

Existem três métodos básicos para a produção de painéis esbeltos de GRC, o *premix* o *spray-up*³⁸ e o terceiro, que é a junção dos anteriores, o *sprayed premix*. Todos utilizam o mesmo material, mas possuem diferenças na composição da matriz e as resistências finais das peças diferem entre os dois principais processos (*premix* e *spray-up*), como pode ser observado na síntese apresentada na tabela abaixo:

Tabela 2 - Características Premix vs Spray-up

Materiais e características	Premix	Spray-up
Relação cimento/agregado ³⁹	0.5 a 1.5	0.5 a 1.0
Relação água/cimento	0.3 a 0.375	0.3 a 0.375
Fibra de vidro AR (% sobre o peso total do mix)	2.0 a 3.5%	4.0 a 5.5%
Aditivos poliméricos (% sobre o peso do cimento)	4.0 a 7.0%	4.0 a 7.0%
Tamanho da fibra de vidro	12 a 25mm	25 a 40mm
Resistência a flexão (módulo de ruptura em 28 dias)	5 a 14 N/mm ²	18 a 30 N/mm ²

Fonte: (JONES et al., 2005)

O foco dessa tese é o estudo e desenvolvimento da manufatura de elementos pré-fabricados de GRC por meio do *sprayed premix*, porém, a título de informação, detalhamos aqui algumas características dos demais processos.

³⁸ Os termos em inglês aqui usados não possuem uma tradução fiel para a língua portuguesa e são comumente utilizados no meio técnico nacional, por isso faremos a sua adoção literal no decorrer dessa pesquisa.

³⁹ A relação cimento/agregado tradicional na composição do mix no GRC é de 1:1, porém pode ser menor caso sejam adicionados compostos como sílica ativa, metacaulim ou outros fillers em substituição ao cimento.

Elementos pré-fabricados de GRC manufacturados por meio do *premix* são formados pelo lançamento do material misturado previamente em um molde duplo, de forma similar ao concreto armado convencional. Diferentes modos de vibração são aplicados às formas de maneira a eliminar o ar que causa imperfeições às peças.

Figura 24 - Processo de manufatura e obra construída com painéis de GRC (Premix)

Coluna da esquerda: Lançamento, desforma e peça final

Coluna da direita: Fachada pronta, com painéis instalados.



Fonte: Contemporist⁴⁰

⁴⁰ Disponível em: <https://www.contemporist.com/wp-content/uploads/2017/02/building-facade-decorative-concrete-panels-240217-1125-04.jpg>. Acesso em: 01/03/2020.

O compósito é fabricado pela deposição de todos os componentes (cimento, areia, água, aditivos e fibras de vidro AR) em um misturador, que produz a matriz já com as fibras, pronta para ser lançada na forma. A mistura ocorre em duas etapas, onde em um primeiro momento, são misturados todos os elementos que compõe a matriz cimentícia, de forma a obter uma argamassa homogênea e que permita a correta incorporação das fibras. Essas são adicionadas à mistura apenas ao final do processo, de forma a minimizar os danos físicos causados pelas pás do misturador. Também por conta do processo de mistura mecânica, o tamanho das fibras de vidro no *premix* é menor do que as utilizadas no processo de spray-up, o que confere uma resistência final menor nas peças fabricadas dessa forma. Por fim, o lançamento do GRC em formas duplas não é o mais adequado para a fabricação de peças com pequenas espessuras e geometrias complexas como painéis de revestimento para fachadas, que por meio do spray-up podem chegar ter apenas 12mm. Outra desvantagem é a alta complexidade e maior custo dos moldes duplos necessários para a concretagem.

Figura 25 - Equipamento de mistura da matriz cimentícia com fibra de vidro AR



Fonte: Power Sprays⁴¹

O processo de *spray-up* é o mais comumente utilizado e consiste em projetar simultaneamente a matriz cimentícia e as fibras de vidro sobre um molde, utilizando

⁴¹ Disponível em: <https://www.power-sprays.com>. Acesso em: 01/03/2020

uma pistola especial de ar-comprimido (*spray gun, chopper gun ou concentric gun*). Esse equipamento tem a capacidade de projetar a argamassa de cimento — que é impulsionada até a pistola por uma bomba hidráulica — ao mesmo tempo em que traciona, secciona e projeta os filamentos de fibra de vidro (25 a 40 mm) alimentados pelo *roving*. O roving é um fio contínuo composto de fibras trançadas (usualmente vinte e oito fibras por fio), que por sua vez são formadas por filamentos de vidro álcali-resistente (cerca de duzentos filamentos por fibra) enrolados em forma de uma bobina única (VETROTEX, [s.d.]). Ao projetar ao mesmo tempo os dois materiais do compósito, garante-se que as fibras de vidro são distribuídas na matriz cimentícia de forma homogênea e em diferentes direções, o que confere ao material a sua resistência estrutural. Normalmente, a projeção da primeira camada de revestimento (*facing coat*) é realizada sem a mistura da fibra de vidro, para conferir um acabamento liso à superfície da peça (GRCA (GLASS FIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION), 2010).

Figura 26 - Materiais e equipamentos para processo *Spray-up*

Sentido horário: Concentric gun, facing coat gun, roving de fibra de vidro AR, bomba de projeção



Fonte: Power Sprays⁴²

⁴² Disponível em: www.power-sprays.com. Acesso em: 01/03/2020

A *spray-gun* é geralmente operada de forma manual por um operador capacitado que direciona o fluxo perpendicularmente à superfície do molde, em movimentos contínuos de um lado ao outro. A capacidade usual da projeção manual do GRC é de cerca de 10 a 12 Kg por minuto.

Após a projeção de cada camada — que possui de 3 a 4 mm de espessura — é necessário realizar a compactação manual do material, utilizando-se um rolo metálico especial, para eliminar o ar garantir que as fibras de vidro estejam solidarizadas com a matriz, aumentando assim a sua densidade e diminuindo a porosidade. Depois da compactação, a aferição da espessura é realizada com o auxílio de um calibre. As etapas de projeção e compactação são repetidas até que se alcance a espessura final projetada para o painel, que usualmente varia entre 13 a 25 mm, dependendo de suas dimensões.

Figura 27 - Projeção e compactação do GRC no processo *Spray-up*



Fonte: Power Sprays⁴³

⁴³ Disponível em: www.power-sprays.com. Acesso em: 01/03/2020

As peças são normalmente desenformadas após um dia e armazenadas para finalizar o processo de cura, que pode ser em temperatura ambiente ou com controle de umidade, dependendo de fatores como o clima e tamanho dos painéis. O processo de spray-up manual requer mão de obra intensiva e especializada, mas é o que atualmente possibilita a execução de painéis e peças com geometrias mais complexas.

Existem métodos mecanizados desse processo, mas os mesmos são apropriados apenas para a produção de chapas planas ou com pequenas variações na geometria, geralmente realizadas pela dobra do material plano em seu estado “verde” para a formação de dutos e calhas. Em contrapartida à limitação da liberdade formal, a produção do processo mecanizado frente ao manual é significativamente maior, alcançando-se de 25 a 30 Kg por minuto.

Henriksen resume em duas tabelas comparativas as vantagens e desvantagens de cada método de manufatura para a confecção de painéis esbeltos para fachadas em GRC (HENRIKSEN, 2017).

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens Premix

Vantagens	Desvantagens
UHPC pode ser utilizado na matriz	Baixa proporção de fibras de vidro
Concreto auto-compactável pode ser utilizado na matriz	Fibras não-uniformemente distribuídas na matriz
Os moldes podem ser vibrados	Apenas moldes planos podem ser usados
Moldes planos com vãos podem ser utilizados	Difícil implementação de dobras ou edge-returns nos painéis
Podem ser adicionados reforços estruturais metálicos	Baixa consistência na qualidade da superfície
Trabalho menos intensivo	Bolhas de ar e vazios são difíceis de evitar
	Orientação tridimensional das fibras na matriz

Fonte: (HENRIKSEN, 2017)

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens *Spray-up*

Vantagens	Desvantagens
Alta concentração de fibras	Requer trabalho intensivo
Distribuição controlada das fibras	A qualidade depende da destreza do operador manual
Qualidade superficial consistente	Rolos manuais são necessários para a compactação das fibras
Ausência de fibras aparentes na superfície exposta	
Alta resistência à ruptura	
Possibilidade de execução de formas complexas	
Possibilidade de execução de bordas (edge-returns)	
Redução nas bolhas de ar ou vãos	

O terceiro método, o *sprayed premix*, consiste na projeção da argamassa de GRC já pré-misturada sobre um molde. Nos últimos anos esse método tem sido tema de estudos e publicações na área, que indicam algumas vantagens do processo sobre os demais (PETER, 2008) (Fig. 28).

Figura 28 - Projeção do *Sprayed Premix* sobre molde



Fonte: Power Sprays⁴⁴

Podemos listar os principais motivos pelos quais optamos por utilizar esse processo nas simulações realizadas na etapa empírica da pesquisa como sendo:

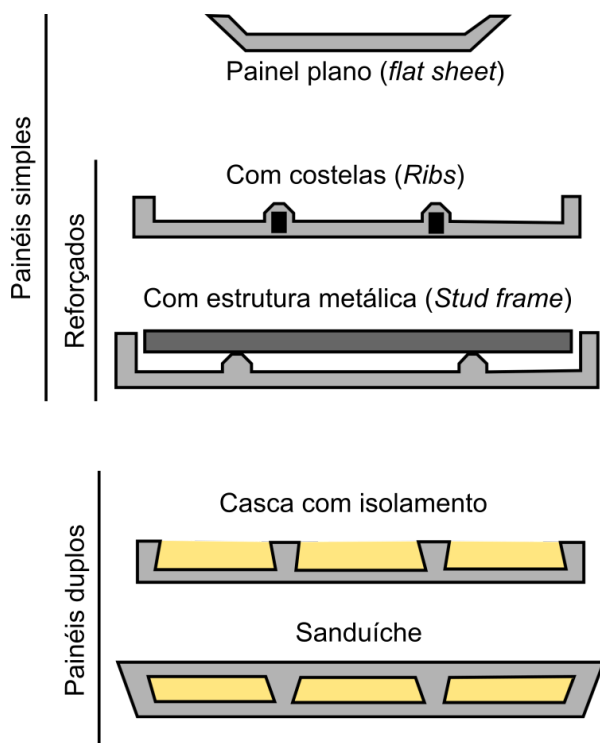
- Produção consistente como a do *spray-up*, porém com menor frequência de testes e necessidade de calibração das máquinas a cada batelada.
- A quantidade de fibra de vidro AR é garantida, pois a mistura é pesada antes da projeção, o que não ocorre com o *spray-up*.
- Equipamentos mais simples, pois não há a necessidade da *concentric gun*;
- Processo mais simples e não requer mão de obra altamente especializada;
- É mais versátil do que o *premix*, pois pode utilizar moldes mais simples;
- Propriedades mecânicas semelhantes a das peças fabricadas via *spray-up*.

Tipologia

No que se refere à sua tipologia, os painéis esbeltos podem ser divididos em dois grupos básicos com seus respectivos subgrupos:

⁴⁴ Disponível em: www.power-sprays.com. Acesso em: 01/03/2020.

Figura 29 - Tipologias de painéis leves GRC

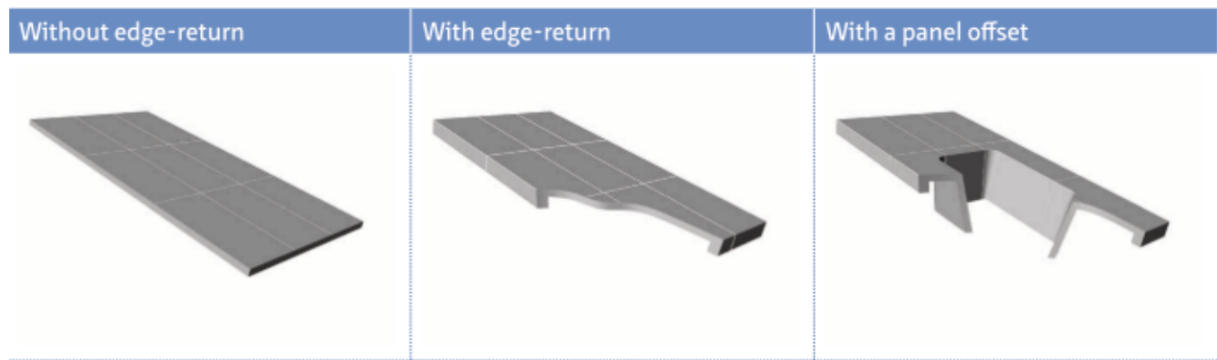


Fonte: Desenho do autor (adaptado de (BALAGUER et al., 1993)).

Nos sistemas de fachadas ventiladas apenas os painéis simples e reforçados são utilizados como componentes no sistema construtivo, por isso não nos ateremos a descrição dos demais tipos e configurações.

Painéis esbeltos com grande superfície necessitam de algum tipo de reforço para que respondam adequadamente aos esforços solicitantes e as normas aplicáveis. A forma mais simples de aumentar a resistência desses elementos é alterar a sua geometria, acrescentando “costelas” (ribs) e/ou dobras em suas arestas (edge-return). As costelas são formadas com a projeção do GRC sobre elementos (ex.: barras, tubos ou tarugos de poliestireno expandido) posicionados no verso dos painéis, nas regiões onde os esforços de tração ou compressão são maiores, aumentando a sua resistência e rigidez. A execução de dobras nas arestas dos painéis acaba tendo dois resultados práticos: o aumento da resistência pela alteração da geometria e um melhor acabamento estético, uma vez que os painéis ganham um aspecto monolítico, escondendo a sua sub-estrutura e a aplicação de selantes em suas juntas é facilitada.

Figura 30 - Tipos de abas em painéis leves de GRC



Fonte: (HENRIKSEN, 2017)

A outra forma de aumentar a resistência dos painéis é acrescentar uma estrutura auxiliar, chamada de *stud frame*. Um painel esbelto de GRC com *stud frame* consiste em uma placa de GRC presa a uma moldura pré-fabricada (geralmente em metal) por meio de âncoras de fixação. As âncoras, distribuídas uniformemente no painel, auxiliam na resistência aos carregamentos do vento e no suporte ao seu peso-próprio, ao mesmo tempo em que permitem um livre movimento entre o GRC e a estrutura metálica, reduzindo os problemas de fissuras geradas pelos diferentes coeficientes de retração/expansão térmica dos materiais. A execução de elementos esbeltos adicionados a *frames* metálicos permite que sejam construídos, transportados e içados painéis com até 20m² de superfície, facilitando a fixação dos painéis nas subestruturas das edificações, otimizando o seu tempo de montagem.

Figura 31 - Painel de GRC com reforço metálico (*Stud frame*)



Fonte: Kinetica⁴⁵

⁴⁵ Disponível em: <http://www.kinetica.com.mx/project/terrazas-gfrc-facade>. Acesso em: 01/03/2020

Superfície dos painéis

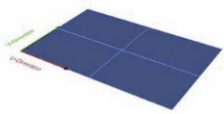



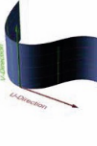
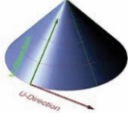
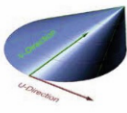
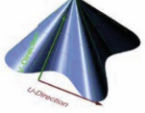




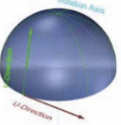
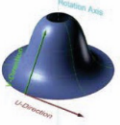
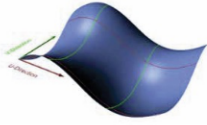

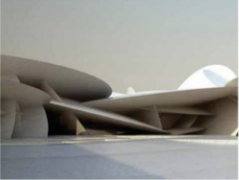

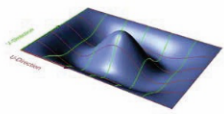

Painéis de GRC são muito utilizados na confecção de fachadas ventiladas pela sua esbeltez (12-20mm) e baixo peso, o que alivia a carga nas fundações e facilita o seu transporte em obra (HENRIKSEN, 2017).

Além disso, devido à sua capacidade assumirem formas complexas, tem sido utilizados recentemente em grandes obras de arquitetura, tais como o centro de pesquisa Kapsarc (Riyad, 2018) de Zaha Hadid Architects e o museu nacional do Qatar (Doha, 2018) projetado por Jean Nouvel. Ambos possuem mais de cem mil metros quadrados de painéis de GRC em suas fachadas.

Para distinguirmos as diferentes formas que os painéis de GRC podem assumir é necessário classificá-los de acordo com a geometria de sua superfície. Seguindo a classificação proposta por Henriksen, pode-se fazer a distinção de quatro diferentes categorias aplicáveis aos painéis, em ordem crescente de complexidade:

- a. Superfícies planas
- b. Superfícies de curvatura simples
- c. Superfícies de dupla-curvatura
- d. Superfícies de forma-livre

Figura 32 - Tipologia superfícies de painéis de GRC

FLAT SURFACE	 Flat surface			
				
SINGLE CURVED SURFACE	 Single curved surface	 Simple cone surface	 Tilted cone surface	 Cone-like surface
				
DOUBLE CURVED SURFACE	 Spherical surface	 Rotational surface	 Translational surface	
				
FREE-FORM SURFACE	 Truly free-form surface			
				

Fonte: (HENRIKSEN, 2017)

O grau de dificuldade na produção dos painéis está diretamente relacionado com a complexidade de sua forma. Painéis com superfícies planas são os mais simples de serem produzidos. Alguns métodos mecanizados de fabricação prescindem mesmo de moldes, utilizando um sistema de prensas para a produção dos painéis, de forma semelhante à utilizada no “método Hatschek”. Por outro lado, painéis com formas livres requerem moldes únicos, muitas vezes fabricados de modo artesanal, com o uso de mão de obra especializada, o que é de certo modo um paradoxo. Quanto mais avançado e único é o design, menos industrializado é o seu processo de produção.

Parafraseando Salas (SALAS, 2008), um dos maiores entraves para a adoção dos sistemas industrializados pelos arquitetos sempre foi a baixa flexibilidade e a necessidade de fazer o projeto se adequar ao material de construção. Quanto maior o nível de complexidade formal, menor a industrialização e maior a artesanaria. Quanto maior a industrialização, menor a complexidade formal e a liberdade de criação.

Figura 33 - Fôrmas de madeira para painéis de GRC (*Spray-up*)



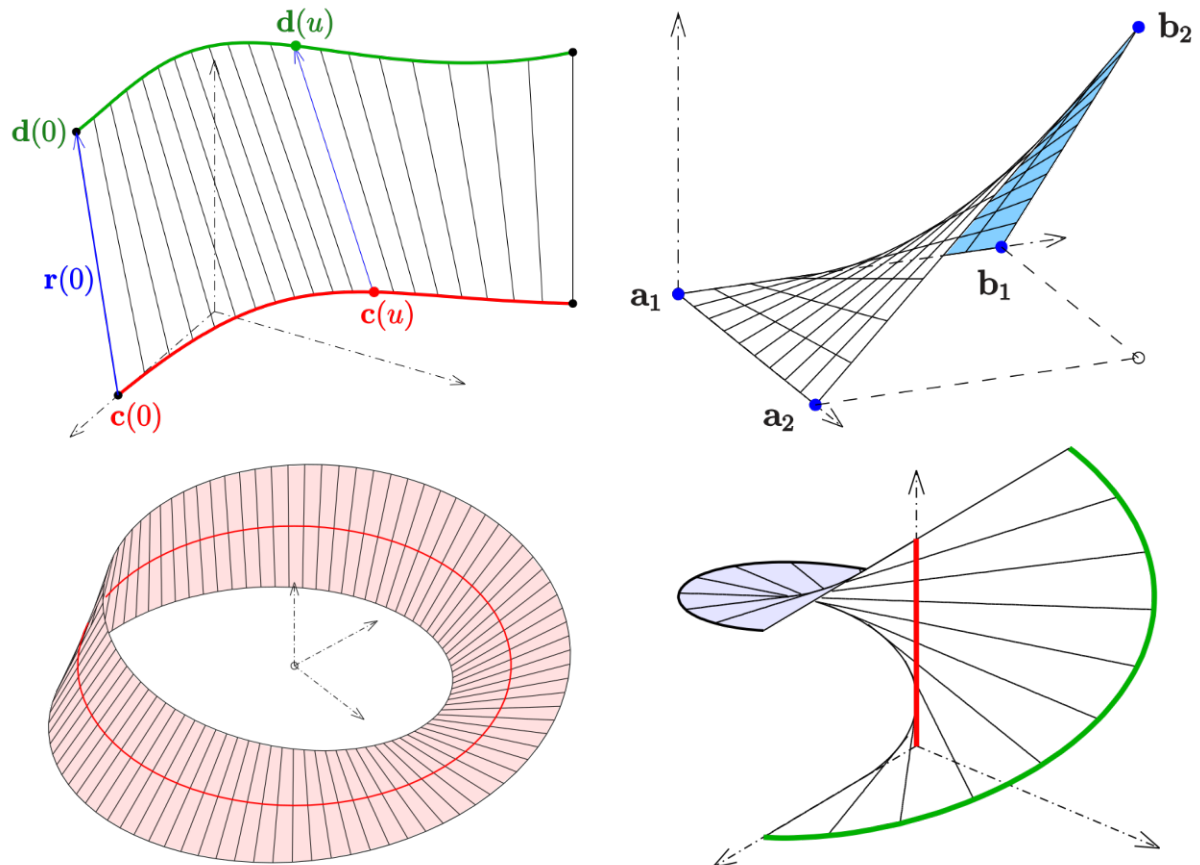
Fonte: ArchDaily ⁴⁶

Entretanto, novos programas de computador e a disseminação das ferramentas de fabricação digital estão ajudando a balancear essa equação. Um dos métodos adotados para viabilizar a produção de formas complexas ainda na fase de concepção é a adaptação das superfícies (*surface fitting*). Software de modelagem digital permitem aos arquitetos realizar a subdivisão de superfícies complexas e formas livres de diversas maneiras. Subdivisão por triangulação, por quadriláteros ou por polígonos são alguns dos processos disponíveis que permitem adaptar automaticamente as formas complexas para geometrias planas ou desenvolvíveis. A transposição de formas livres para superfícies regradas (*ruled surfaces strips*), por exemplo, simplifica muito a construção de formas complexas (POTTMANN et al., 2007). Como as superfícies regradas de curvatura simples são desenvolvíveis (possíveis de serem planificadas sem nenhuma deformação) isso as torna

⁴⁶ Disponível em: <https://www.archdaily.com/775902/house-of-dior-seoul-christian-de-portzamparc>. Acesso em: 01/03/2020

especialmente atraentes para a arquitetura, uma vez que muitos dos materiais utilizados para a produção de moldes é fabricada em chapas planas ou materiais laminares (FLÖRY; POTTMANN, 2010).

Figura 34 - Exemplos superfícies regradas



Fonte: Wikipédia⁴⁷

Além da simplificação das formas, com o auxílio do computador e de programas de desenho paramétrico é possível analisar em tempo real as tipologias e o nível de repetição das fôrmas utilizadas no projeto (KURODA, 2019). Com isso, o arquiteto pode alterar o design baseado no impacto que um baixo número de repetições de determinada fôrma possa acarretar nos custos da obra. Esse processo é chamado de racionalização (LEE; KIM, 2012).

⁴⁷ Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Ruled_surface. Editado pela última vez em: 05/11/2019. Aceso em: 01/03/2020.

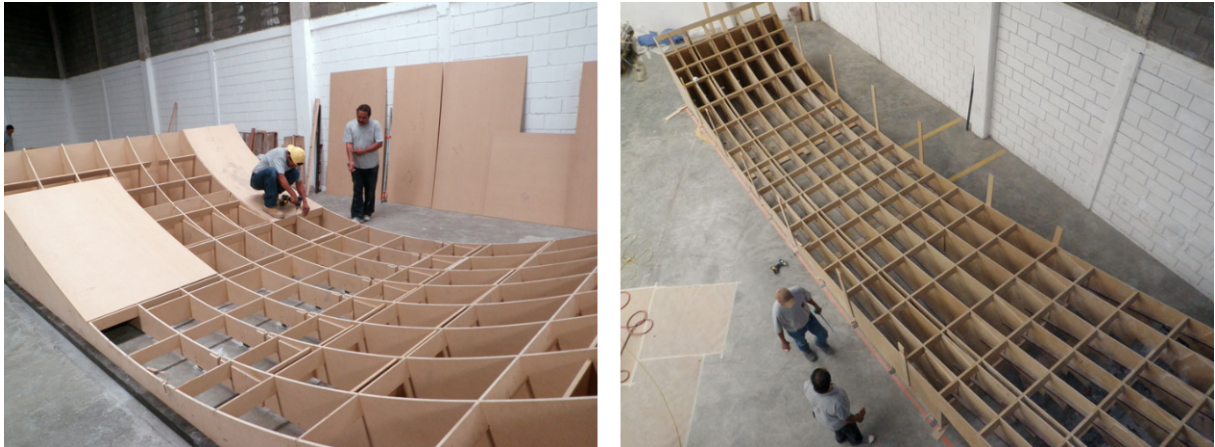
A adoção de máquinas de fabricação digital na indústria do GRC —como as fresadoras CNC, para a produção das fôrmas — também contribuem para a viabilização da construção de edifícios com geometrias complexas. Diferentemente da indústria convencional, onde os equipamentos são voltados para a produção em série de grandes quantidades de produtos idênticos (ex.: extrusoras, dobradeiras, injetoras ou estamparia), as máquinas controladas por computador podem produzir objetos na escala de uma única unidade, pois não dependem de moldes ou ferramentas únicas.

Grande parte dos edifícios que utilizam painéis esbeltos de GRC mostrados aqui nessa tese teve as fôrmas de suas peças fabricadas com uma fresadora CNC esculpindo grandes blocos de poliestireno ou poliuretano expandido. O edifício Neue Zollhof Towers de Frank O. Gehry em Dusseldorf é um exemplo do uso dessa tecnologia. Cada um dos 335 painéis pré-fabricados de concreto de sua fachada teve seu molde feito dessa maneira (CASTAÑEDA et al., 2015). Embora possibilite a produção de peças únicas, esse processo de fresagem ainda tem um alto custo, devido ao grande tempo de utilização da máquina para a confecção das peças.

Fôrmas

Uma das grandes frentes de pesquisas na área da industrialização da produção do GRC para as demandas contemporâneas é na confecção das fôrmas e moldes. Tradicionalmente, as fôrmas para a produção de painéis de GRC via spray-up são confeccionadas com placas de madeira laminada. Se a sua superfície não é plana, como no caso do objeto dessa pesquisa, é necessário criar uma subestrutura para o molde, para a posterior aplicação das chapas planas, conformadas de modo a garantir a forma final desejada para a peça. Apenas superfícies planas, e curvatura simples ou de dupla curvatura com grandes raios podem ser fabricadas por meio dessas fôrmas (HENRIKSEN, 2017).

Figura 35 - Sub-estrutura moldes de madeira para GRC (*Spray-up*)



Fonte: Kinetica⁴⁸

No caso das geometrias complexas, mesmo após a racionalização do design inicial — feita para garantir o melhor aproveitamento possível das fôrmas — o número de repetições de determinadas peças pode ser baixo. Isso causa um impacto negativo substancial no volume de resíduos gerado e nos custos da obra.

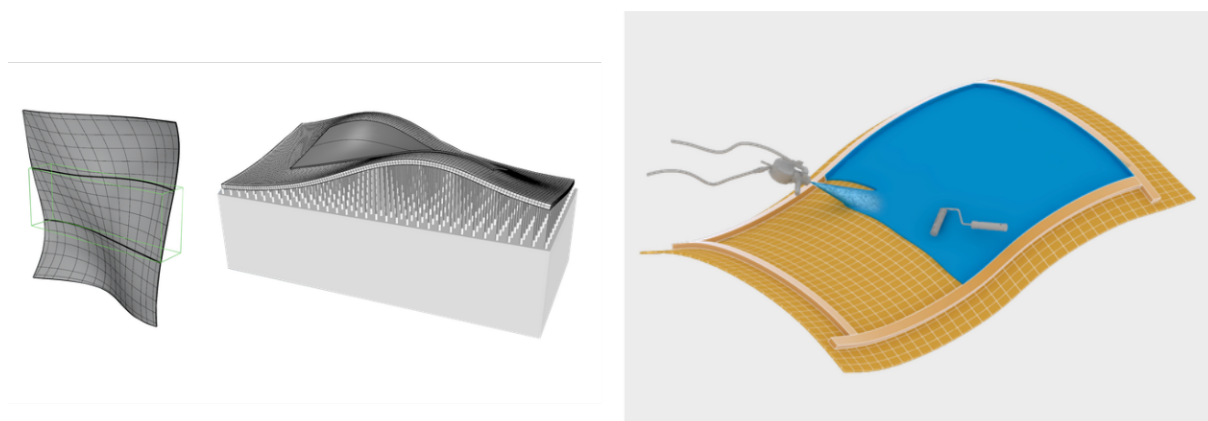
Como alternativa ao uso da madeira, outros materiais têm sido utilizados na confecção das formas de geometrias muito complexas (HENRIKSEN; LO; KNAACK, 2015). Moldes feitos com grandes blocos de poliuretano ou poliestireno de alta densidade são modelados por uma fresadora CNC, que esculpe a forma desejada subtraindo material do volume original. Muitas obras contemporâneas com superfícies complexas em concreto utilizaram esse método de fabricação que, apesar de minimizar a utilização de um recurso natural, ainda gera um grande volume de resíduos e dispende de uma grande quantidade de horas em sua execução (HAUSCHILD; KARZEL, 2011).

Os últimos avanços das pesquisas na tecnologia de fabricação dos moldes apontam para a viabilização de processos de moldes digitais flexíveis. Trabalhos baseados nesse processo foram desenvolvidos nas universidades de Delft (Países Baixos), Jilin (China) e pela empresa dinamarquesa ADAPA. Apesar de possuírem aproximações distintas, os processos constituem-se basicamente de uma mesa

⁴⁸ Disponível em: www.kinetica.com.mx/project/terrazas-gfrc-facade. Acesso em: 01/03/2020

flexível, conformada por mecanismos atuadores lineares, que geram a forma a partir do modelo original de CAD. O equipamento tem a capacidade de gerar formas complexas e é reutilizado indefinidamente, eliminando o problema da repetição e diminuindo muito tempo de execução das peças, uma vez que a forma não precisa ser construída fisicamente. O concreto ou GRC é lançado sobre a forma flexível em sua forma ainda plana e, à medida em que o processo de cura ocorre e as propriedades reológicas do material se alteram, o equipamento aciona os atuadores que mudam a configuração do molde para atingir a forma final desejada enquanto o material se encontra em seu estado “verde”.

Figura 36 - Sistema de formas digitais adaptáveis para GRC



Fonte: ADAPA⁴⁹

Embora promissoras, essas pesquisas ainda estão em seus estágios iniciais e, nesse momento, não há possibilidade de sua utilização em grande escala, necessária para uma obra de grande porte. Além disso, essa tecnologia ainda não permite a execução de peças com dobras nas arestas ou reentrâncias, o que limita o seu uso a painéis complexos, porém sem o reforço pela sua geometria.

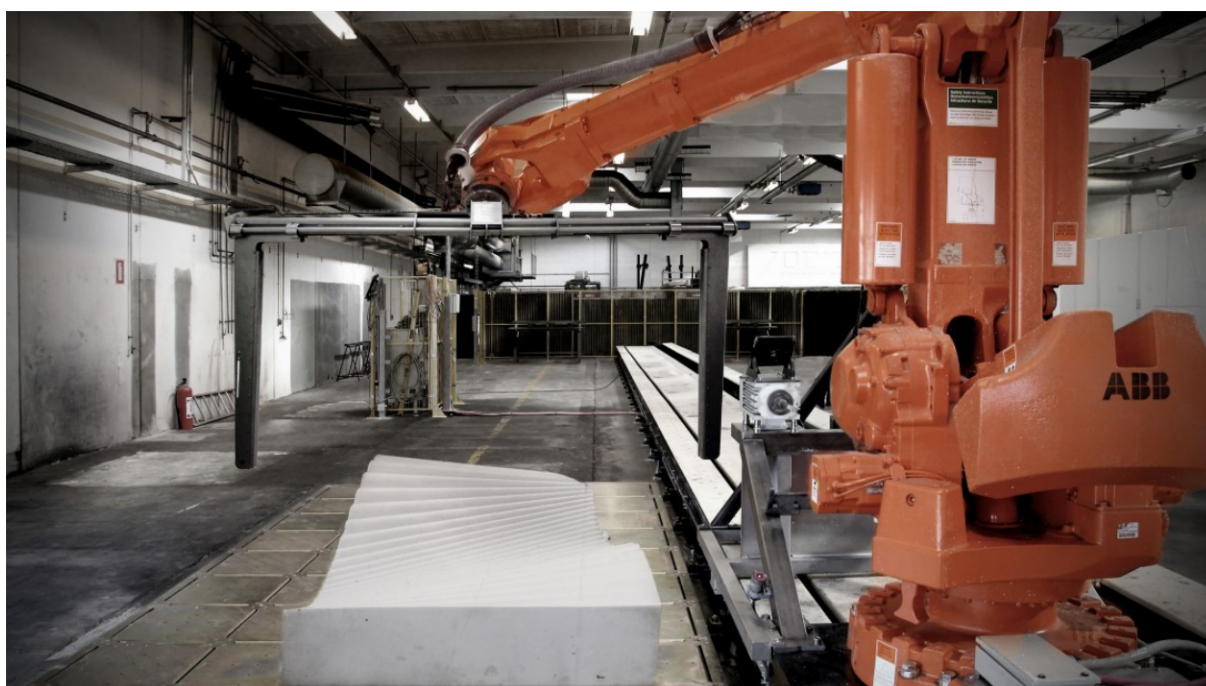
Tendo em vista o panorama traçado acerca dos processos de produção de fôrmas e racionalização das geometrias complexas, o processo que nos parece mais adequado para a produção de moldes para painéis esbeltos de GRC é o de corte à fio quente (*hot wire cutting* ou HWC) de blocos de EPS. As principais razões que nos

⁴⁹ Disponível em: www.adapa.com. Acesso em: 01/03/2020

levam a essa afirmação são: a tradição, a economia, a capacidade de gerar superfícies regradas e a sustentabilidade do processo.

O HWC utiliza como ferramenta de corte uma resistência formada por um fio metálico aquecido por meio da aplicação de uma tensão elétrica. O fio quente tensionado, ao se aproximar do EPS, vaporiza o material, seccionando-o no formato desejado⁵⁰.

Figura 37 - Corte de EPS robotizado com fio quente



Fonte: Odico⁵¹

Equipamentos automatizados que utilizam o corte a fio quente são largamente utilizados na indústria da construção civil, como na produção de blocos de EPS para preenchimento de lajes, blocos de contenção para geotecnia e na fabricação de telhas termo isolantes. O processo de corte é extremamente rápido. Diferentemente da usinagem com fresadoras CNC, o tempo para a fabricação de moldes pode ser contado em minutos ao invés de horas, o que o torna muito mais econômico. Pela sua característica única de utilizar um fio metálico tensionado como ferramenta, o

⁵⁰ Mais detalhes sobre o processo de corte de EPS a fio quente serão apresentados no capítulo seguinte.

⁵¹ Disponível em: www.odico.com. Acesso em: 01/03/2020

processo se adequa perfeitamente à produção de superfícies regradadas, uma vez que as mesmas são formadas geometricamente por famílias de linhas retas (POTTMANN et al., 2007). Por fim, o EPS é um material encontrado no mercado local de forma ampla e possui um potencial de reciclagem muito alto. As fôrmas feitas com esse material podem ser reintroduzidas no ciclo de produção do EPS, pois já existe a produção comercial de matéria prima nova a partir de fontes recicladas.

O ponto negativo da utilização do EPS é que ele é um material não-biodegradável de duração não determinada, ou seja, ele não se decompõe se descartado de forma inadequada em aterros ou na natureza, e o seu percentual de reciclagem ainda é baixo. Apenas cerca de trinta por cento de todo o material produzido no país é reciclado, segundo pesquisas realizadas pela própria indústria de plásticos, o que nos leva a pensar que esse número pode ser ainda menor. Como o EPS em seu estado final ocupa um grande volume com um baixo peso, o transporte do material para a reciclagem é praticamente inviável, observando critérios puramente econômicos. Esses problemas poderiam ser mitigados caso a legislação sobre o destino de resíduos sólidos que existe atualmente fosse aplicada de forma mais rigorosa, e os fabricantes se responsabilizassem pelo destino final do material.

Resumo

O GRC é um material compósito avançado, resistente, versátil e capaz de assumir formas complexas. Além disso, sob o ponto de vista ambiental, a sua utilização pode ser considerada mais favorável do que o concreto armado convencional. Elementos de GRC possuem um menor consumo de cimento por metro cúbico e, se aplicados em sistemas de fachadas ventiladas, contribuem para o conforto térmico da edificação (WHITE; CHE, 2011).

Entretanto, apesar de vários pontos positivos, o seu processo de manufatura é extremamente artesanal e insalubre. Seja por meio do premix ou spray-up, o trabalhador é exposto a um ambiente contaminado por fibras de vidro, o que pode causar doenças graves no trato respiratório como a silicose e a pneumoconiose.

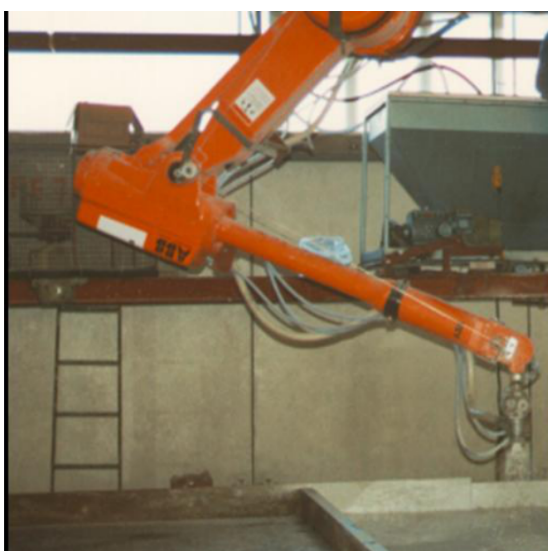
O uso de EPI's adequados minimizaria esses problemas, mas a sua utilização tem baixa aderência entre os profissionais, uma vez que acabam limitando a visão e os seus movimentos.

3.4 O processo de manufatura do GRC

A situação paradoxal do GRC — um material altamente tecnológico, porém cujos processos de manufatura pouco evoluíram nos últimos cinquenta anos — poderia ser resolvida com a introdução da fabricação digital em sua manufatura.

Esse foi o objetivo da pesquisa no campo da robótica aplicada à construção civil, liderada pelo Prof. Dr. Carlos Balaguer, então pesquisador na División de Ingenieria de Sistemas y Automática (DISAM) da Universidade Politécnica de Madrid. Em conjunto com a companhia espanhola Dragados y Construcciones, a pesquisa pretendia implementar um sistema automatizado de produção de painéis de GRC utilizando um braço robótico industrial. O equipamento realizaria a etapa do *spray-up*, ou o jateamento da matriz cimentícia juntamente com o reforço em fibra de vidro sobre moldes de madeira para a manufatura de uma série de tipos de painéis. Os painéis pré-fabricados poderiam ser utilizados para fachadas ou como elementos de vedação.

Figura 38 – Produção robotizada de painéis de GRC na empresa Dragados (1991)



Fonte: Robotics lab Universidad Carlos III Madrid⁵²

⁵² Disponível em: <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/people/c-balaguer>. Acesso em 01/03/2020.

Em dezoito meses de pesquisa e implementação foram gerados três artigos seminais, publicados nos anais dos congressos IAARC (International Association for Automation and Robotics in Construction).

No primeiro deles, intitulado “Robotized system of GRC panels for construction industry” (1993), foi apresentada a estrutura do sistema automatizado de produção de painéis, além da descrição do processo tradicional (realizado de forma manual) e as justificativas para a realização da pesquisa, como os prováveis ganhos em qualidade, produtividade e economia, trazidos pela automação do processo.

O sistema proposto era separado em quatro partes complementares:

- a) a célula de jateamento, composta por um braço robótico ASEA de 6 DOF;
- b) as células de compactação manual (que no futuro poderiam vir a ser automatizadas também);
- c) o sistema de transporte dos painéis;
- d) o sistema de preparação do material de base cimentícia.

O foco principal desse artigo se encontrava na descrição do desenvolvimento e implementação da célula robotizada de jateamento e no planejamento das trajetórias do robô.

Outra informação importante presente nesse artigo é que o sistema de CAM implementado no experimento foi desenvolvido de forma personalizada e customizada para a pesquisa, pois não havia uma solução “de prateleira” para a integração entre o desenho em CAD e a fabricação robótica, fato que o Prof. Balaguer veio a confirmar posteriormente em uma entrevista concedida ao pesquisador.

O primeiro artigo concluía que a vantagem mais importante do sistema, além dos citados ganhos de qualidade e produtividade, era a flexibilidade alcançada pela produção robotizada, que permitiria a incorporação de novos tipos de painéis na linha de produção, de forma rápida e simples. Ainda não havia se cunhado o termo mass-customization, tão utilizado hoje em dia para se falar de tecnologias digitais de fabricação, mas a utilização do braço robótico já proporcionava ao projetista uma maior liberdade formal no desenho dos painéis, diferentemente dos sistemas

tradicionais de pré-fabricação, que possuem limites muito mais restritos com relação a mudanças na geometria original dos moldes.

O segundo artigo publicado em 1994 e intitulado “Automatic Robot Path Planning for a GRC spraying cell”, traz uma descrição pormenorizada da construção dos algoritmos que foram criados especialmente para o trabalho, responsáveis por gerar automaticamente, a partir dos desenhos tridimensionais, os caminhos (toolpaths) que o braço robótico deveria percorrer.

São especificadas com detalhes as regras e restrições estabelecidas para os algoritmos, baseadas tanto no desempenho do equipamento (como a velocidade linear máxima pretendida, vazão do sistema de alimentação de argamassa), como nas características construtivas da produção de painéis de GRC, como o ângulo de abertura do cone de projeção, a espessura do painel e a perpendicularidade do eixo de projeção em relação a geometria do molde. A combinação de todos esses dados é que permitia gerar um caminho otimizado para o robô, de forma a evitar colisões entre o braço e o painel, singularidades⁵³ e também eliminar trajetórias onde os mangotes de alimentação de argamassa e fibra de vidro pudessem de alguma forma serem torcidos e inviabilizar a projeção. Nas conclusões desse artigo é citado pela primeira vez o fato de que os painéis produzidos pela célula robótica têm qualidade e uniformidade superiores aos alcançados pela produção manual, confirmando a robustez e a confiabilidade da solução matemática construída.

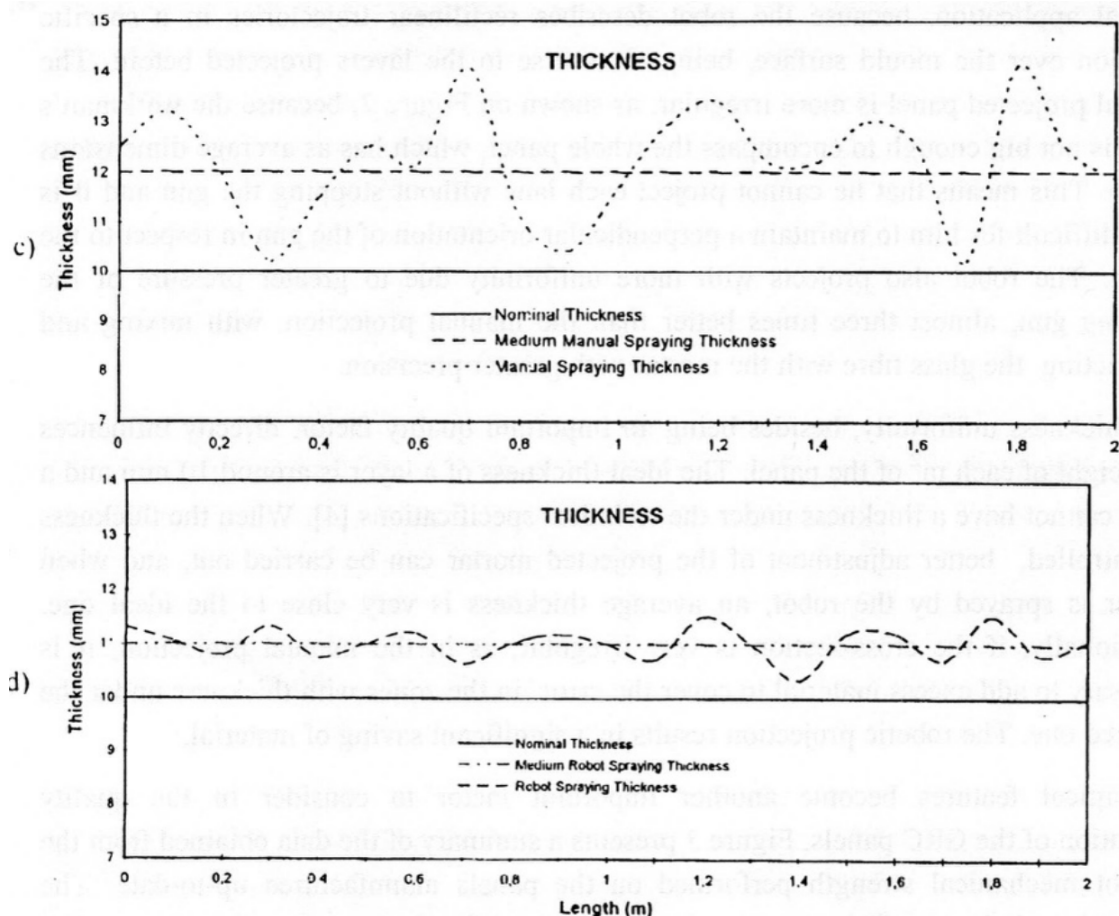
Após dezoito meses de pesquisa e desenvolvimento, a equipe do Prof. Balaguer publicou um terceiro e último artigo mostrando um estudo comparativo entre a produção manual e automatizada de painéis de GRC. Sob o título “*Evaluation and Comparative Study of Robotics vs. Manual Spraying of GRC Panels*”, o trabalho visava explicitar as diferenças de qualidade entre ambos os modos de produção, tendo como principal critério a uniformidade na execução dos painéis.

⁵³ Singularidade é o termo utilizado em robótica para uma condição normalmente não desejada, causada pelo posicionamento colinear de dois ou mais eixos do robô, resultando em movimentos ou velocidades imprevisíveis.

Além da questão da maior precisão nos movimentos, o braço robótico consegue realizar a projeção do material cimentício com uma pressão até três vezes superior à alcançada na projeção manual, misturando e compactando o *mix* de argamassa e fibras de vidro de forma mais eficiente.

Foi demonstrado de forma empírica que o painel executado manualmente possuía maiores variações na espessura de sua secção transversal, pois o operador humano não tem envergadura suficiente para cobrir toda a sua extensão (em média 5x3 metros). Isso faz com que o mesmo tenha que parar a projeção e tornar a começá-la mais adiante, gerando assim imperfeições e desperdício de material. Além disso, é muito difícil, numa operação manual, conseguir manter a pistola operando em velocidade constante e com o eixo da projeção orientado sempre perpendicularmente ao painel, o que é a condição mais desejável em termos da obtenção de uma maior qualidade final.

Tabela 5 - Tabela comparativa espessuras médias dos painéis (manual vs robô)



Fonte: (BALAGUER et al., 1995).

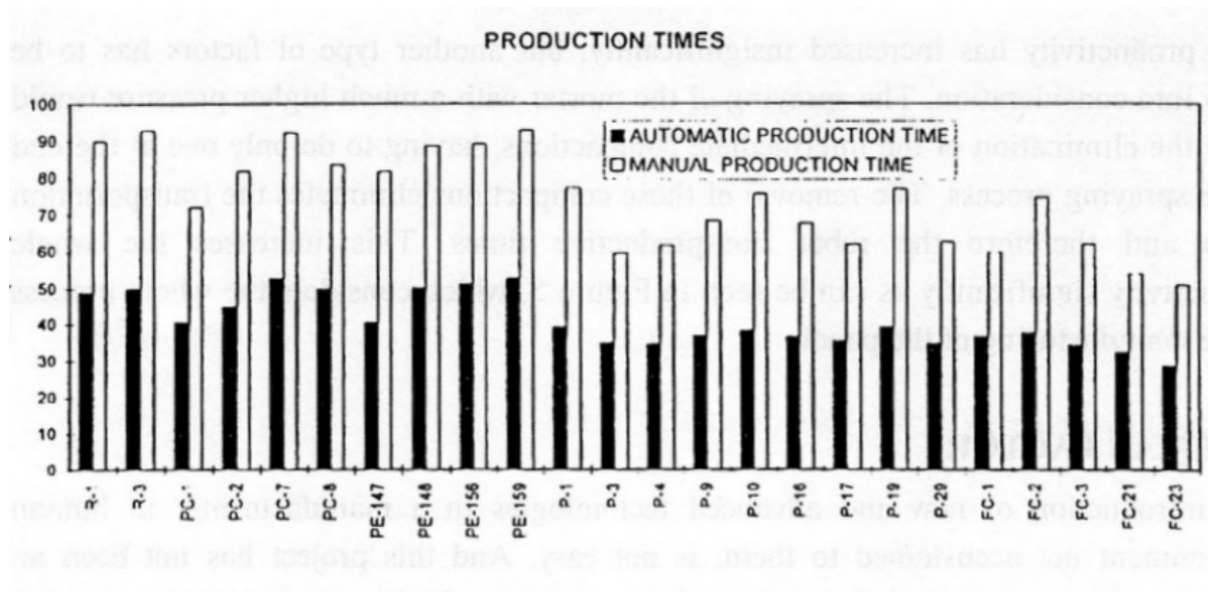
Outro ponto favorável, alcançado graças a maior uniformidade da projeção automatizada, é o fato que a espessura média das camadas do painel é menor — mantendo-se dentro das normas aplicáveis — gerando uma economia substancial de material empregado. Por fim, foram analisadas as diferenças entre a produtividade alcançada pelos diferentes sistemas, quesito onde ficava clara a maior vantagem na adoção do sistema robotizado.

A primeira vantagem clara da automação era poder substituir um trabalhador em uma tarefa normalmente realizada em um ambiente com alto grau de insalubridade (devido à presença do cimento e da fibra de vidro). Outra diferença era que a quantidade de material projetada pelo braço robótico em um mesmo período de tempo era maior do que a conseguida pelo operador manual. Embora essa característica trouxesse uma ligeira vantagem em termos e produtividade, ainda assim o tempo gasto para o jateamento em ambos os sistemas era muito semelhante, não justificando por si só o emprego da automação.

A grande diferença só é de fato vista quando é levado em conta o tempo total de produção dos painéis, considerando não só a etapa de projeção da argamassa, mas também as etapas de compactação manual da mesma sobre o molde.

Em um sistema manual, é necessário realizar a compactação de todas as camadas que formam o painel, após a sua projeção. No caso da célula automatizada, como o braço robótico consegue suportar uma pressão de projeção muito maior do que o operador manual, as etapas intermediárias de compactação das camadas puderam ser suprimidas, sendo essa tarefa necessária apenas após a projeção da camada final.

Tabela 6 - Tabela comparativa tempo de produção (manual vs robô)



Os valores no eixo Y representam o tempo de produção em minutos, enquanto no eixo X estão representados as diferentes tipologias de painéis. Fonte: (BALAGUER et al., 1995)

Considerando esse aspecto fundamental, o tempo total de produção para um mesmo painel era praticamente 50% menor no caso da produção automatizada, deixando claro que o desenvolvimento e implementação desse sistema poderia trazer grande vantagem para a indústria da construção civil.

Passados mais de vinte anos da publicação dos trabalhos do Prof. Balaguer, o pesquisador ainda não encontrou outras publicações acerca do tema da fabricação digital robótica de painéis de GRC. Embora existam atualmente muitos trabalhos práticos e pesquisas teóricas que contam com a utilização de robôs e materiais de base cimentícia em sua execução, a maioria deles trata do uso de extrusoras acopladas a máquinas de comando numérico computadorizado, ou, mais comumente chamada de impressão 3D em concreto (3DCP, do inglês *3D concrete printing*). É possível citar como exemplos mais importantes nessa linha de pesquisa os trabalhos do Prof. Behrokh Khoshnevis (*Contour Crafting, University of South Califórnia*), os realizados na Universidade de *Loughborough* (Reuno Unido) liderados pelo Prof. Richard Busswell e o caso amplamente divulgado concretizado pela companhia chinesa WinSun, que desenvolveu um sistema capaz de imprimir dez edificações em 24 horas e construiu o que é considerada atualmente a mais alta construção feita com impressão 3D no mundo.

No caso do uso de GRC aliado a fabricação digital robótica, alguns trabalhos de expressão têm sido realizados, como o desenvolvido pelo arquiteto Pedro Martins no DFL (*Digital Fabrication Lab*, Porto) e orientado pelo Prof. José Pedro de Sousa. A diferença com relação ao trabalho do Prof. Balaguer é que nesse caso o braço robótico é utilizado na realização de moldes (produzidos por meio do corte robotizado de blocos de poliestireno expandido) para a posterior concretagem manual do GRC (sistema premix).

O fato de não terem sido encontradas outras pesquisas que indicassem uma continuidade com o método proposto por Balaguer, apesar dos resultados amplamente satisfatórios apresentados ao final dos trabalhos, foi o motivo principal da idealização de uma entrevista com o pesquisador espanhol. O intuito foi tentar responder a indagações surgidas ao longo do trabalho que reforçavam ou tinham estreita relação com a proposição apresentada dessa tese: se os resultados foram tão satisfatórios, por que a pesquisa não teve continuidade? Quais seriam as diferenças se o sistema automatizado fosse implementado hoje, com a maior oferta de programas e soluções de software de baixo custo? Seriam os braços robóticos, ferramentas originalmente idealizadas para a realização de tarefas repetitivas na indústria pesada, os equipamentos mais adequados para se produzir formas únicas e geometrias complexas?

O concreto é — e continuará sendo — o material de construção mais conhecido e utilizado em todo o mundo, com um crescente apelo econômico, social e ambiental no contexto de seu setor produtivo. A fabricação digital robótica, por sua vez, é a tecnologia mais avançada e flexível disponível hoje, que traz consigo um profundo impacto nas condições tecnológicas, no trabalho e condições humanas. O desafio está em como tratar a inovação como um catalizador do desenvolvimento sustentável e visando o futuro que a construção civil será capaz de produzir para si mesma.

3.5 A produção digital: desenho e manufatura

A digitalização dos meios de produção (re)integra dois conceitos que, historicamente, nunca foram separados na arquitetura: o pensar e o fazer.

Ambas as ferramentas que são a base da manufatura digital, o CAD e o CAM, foram inventadas em um mesmo período, entre o final da década de 1950 e o início dos anos 60, porém as máquinas de controle numérico e controle numérico computadorizado se desenvolveram muito mais rapidamente do que os programas de desenho auxiliado por computador (SCHURR et al., 1990). Se na década de 1980 as máquinas NC e CNC já eram encontradas em grande número nas fábricas, os sistemas de CAD integrados à fabricação ainda eram utilizados apenas em indústrias altamente especializadas, como a aeroespacial, devido ao alto custo do *hardware* necessário para suportar aplicações gráficas no computador. Programas de CAD até os anos 1990 só rodavam em estações gráficas como as fabricadas pela Sun Microsystems e Silicon Graphics, que custavam dez vezes mais do que um computador pessoal comum (ECKERT, 2015).

Figura 39 - *Workstations vs Personal Computers* na década de 1990



Fonte Jason Eckert⁵⁴

⁵⁴ Disponível em:

https://triosdevelopers.com/jason.eckert/blog/Entries/2015/2/18_The_evolution_of_the_power_workstation.html. Acesso em: 01/03/2020.

Hoje em dia, programas de CAD são onipresentes⁵⁵ e equipamentos de fabricação digital como fresadoras CNC e impressoras 3D são comprados em lojas de departamento, graças a queda no custo dos microcomputadores causada pelo desenvolvimento exponencial das tecnologias digitais. Essa disseminação dos sistemas de fabricação pessoal (GERSHENFELD, 2005) teve um grande impacto na produção de design e engenharia de produtos a partir do início da década de 1990, quando os sistemas de prototipagem rápida tornaram possíveis a materialização de modelos funcionais e visuais de objetos concebidos por meio de computadores. Hoje, não é mais algo raro vermos produtos prontos para o uso e consumo produzidos via fabricação digital, em impressoras 3D capazes de processar materiais metálicos.

Figura 40 - Manufatura aditiva com ligas metálicas



Fonte: 3D Printing Media e Shapeways⁵⁶

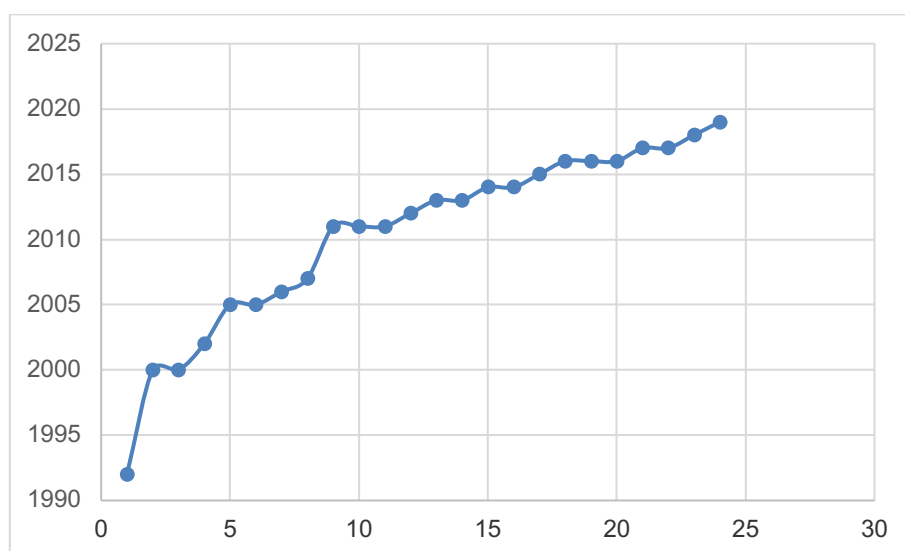
Na arquitetura, em virtude de sua escala, as máquinas de fabricação digital mais acessíveis possibilitavam apenas a produção de modelos visuais em tamanho reduzido, limitando o impacto inicial dessas tecnologias no campo da construção industrializada. Entretanto, essa realidade vem se alterando na medida em que os preços dos equipamentos caem e os arquitetos se ocupam cada vez mais com a produção no campo das tecnologias digitais, o que está diretamente relacionado ao ensino e pesquisa na área.

⁵⁵ Existem programas de CAD voltados para o ensino de modelagem tridimensional para crianças e amadores (Autodesk TinkerCAD) que funcionam de forma online e gratuita e que são integrados com processos de fabricação digital, como a manufatura aditiva em impressoras 3D.

⁵⁶Disponíveis em: https://www.3dprintingmedia.network/wp-content/uploads/2017/03/LEAP_Fuel_Nozzle.jpg e www.shapeways.com. Acesso em: 01/03/2020.

Um artigo publicado em 2008 (CELANI; PUPO, 2008) mostrava que existiam no Brasil, segundo a base de dados do CNPq, apenas três grupos com linhas de pesquisa relacionados ao tema da fabricação digital voltada para a arquitetura. Em levantamento realizado pelo autor, atualmente existem ao menos vinte e cinco grupos listados no mesmo diretório⁵⁷, espalhados em diversos estados do País, o que representa um crescimento de mais de 800% em um período de dez anos.

Tabela 7 - Aumento do número de grupos de pesquisa sobre fabricação digital no Brasil



Fonte: Dados coletados pelo autor na Plataforma Lattes.

Um dos primeiros experimentos que integram o desenho e fabricação digital em escala arquitetônica foi o projeto intitulado Wikihouse, uma biblioteca aberta de tecnologias construtivas digitais. O objetivo do projeto é colocar nas mãos de pequenas empresas e cidadãos as ferramentas para se construir casas customizadas e com baixo impacto ambiental. Embora ainda seja um projeto piloto, é um exemplo claro do impacto que a fabricação digital pode trazer para o ecossistema da construção como um todo.

Os criadores da Wikihouse estão desenvolvendo um “sistema operacional” voltado para o design digital, chamado em sua versão alfa de Build_x, que é uma

⁵⁷ Na realização do levantamento, foram usadas na busca as mesmas palavras-chave relacionadas no artigo citado: prototipagem rápida, fabricação digital, CAD, CAD-CAM e arquitetura. Foram contabilizados apenas os grupos relacionados ao subtema arquitetura e urbanismo, sem incluir a área do desenho industrial.

espécie de sistema BIM (Building Information Modeling) voltado para os usuários finais e pequenos escritórios, não apenas para grandes construtoras. Segundo os seus criadores, o sistema possibilitaria executar um projeto totalmente integrado com a sua fabricação, onde todos os materiais utilizados têm suas quantidades, custos e impactos ambientais calculados de forma automática e adaptativa. Qualquer alteração no projeto automaticamente recalcula toda a sua lista de materiais e com poucos cliques os arquivos de fabricação podem ser enviados diretamente para a fábrica.

A Wikihouse tem sido tema de pesquisa em algumas universidades brasileiras, com o destaque para o trabalho pioneiro desenvolvido na UFRJ pela arquiteta Clarice Rohde sob orientação do Prof. Dr. Andres Passaro, que constituiu no projeto e construção de uma residência baseada no sistema inglês, porém adaptado ao clima e cultura brasileiros (PASSARO; ROHDE, 2016; ROHDE, 2018).

No campo da pesquisa aplicada, as instituições internacionais estão na vanguarda dos estudos relacionados à integração do projeto e manufatura digitais. Já é possível pontuar mais de uma dezena de universidades nessa lista, mas uma em particular vem efetivando pesquisas sistemáticas há mais de uma década, que vão além do caráter meramente exploratório, e que extrapolam seus resultados para aplicações reais na construção civil. A dupla de arquitetos suíços Fabio Gramazio e Mathias Köhler, professores do departamento de arquitetura da ETH em Zurique, vem produzindo pesquisa aplicada na área de robótica e fabricação digital customizada desde 2008. Uma de suas principais características é a de utilizar os braços robóticos industriais como ferramenta de fabricação digital, explorando a flexibilidade que esse tipo de equipamento traz para a manufatura.

Em um de seus primeiros projetos aplicados na área os arquitetos utilizaram uma garra mecânica acoplada ao robô, que era capaz de manipular blocos cerâmicos e posicioná-los um a um com precisão, construindo unidades pré-fabricadas de paredes que posteriormente eram montadas em seu local final na obra. Com essa tecnologia foram realizados os projetos da vinícola de Gantenbein, a fachada da fábrica Keller AG e uma série de outros experimentos que envolviam a fabricação customizada com blocos cerâmicos e de outros materiais (BONWETSCH; GRAMAZIO; KOHLER, 2004).

Figura 41 - Fachada Keller AG e unidade de fabricação robótica móvel (2012)



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Estes são apenas alguns dos exemplos onde a fabricação digital já é utilizada fora do campo das pesquisas, com aplicações reais em obras construídas. O denominador comum a todos eles, é que os arquitetos não apenas se ocuparam do design de suas obras, mas também com todo o processo de fabricação, com sua materialidade. Em alguns casos, o criador do projeto é quem constrói os próprios códigos de programação dos programas utilizados⁵⁸, fabricando a sua própria ferramenta.

Projetar para a fabricação digital implica necessariamente no fato do designer ter que dominar os equipamentos, as técnicas construtivas e as características dos materiais utilizados. Ao ampliar o seu olhar, o criador não visa apenas o processo do desenho e reintegra definitivamente os atos de pensar e construir.

⁵⁸ No caso das paredes de tijolos fabricadas por robôs, a equipe de arquitetos e pesquisadores criou um software próprio, que funciona como um plugin do modelador Rhino3D, chamado *Brick Design*. O mesmo pode ser obtido gratuitamente em <https://www.food4rhino.com/app/brickdesign>.

3.5.1 Robôs na arquitetura

O uso de robôs industriais na arquitetura ainda está longe de alcançar o mesmo patamar dos principais setores da indústria contemporânea — onde o uso dos braços robóticos é uma regra — mas o interesse e a pesquisa sobre as suas aplicações na construção civil industrializada têm crescido nos últimos anos. Outros equipamentos de fabricação digital chamam mais a atenção do público em geral (e dos pesquisadores também), como as impressoras 3D, que prometem casas e edifícios inteiros construídos de uma só vez, em tempo recorde, nos remetendo ao imaginário da ficção científica.

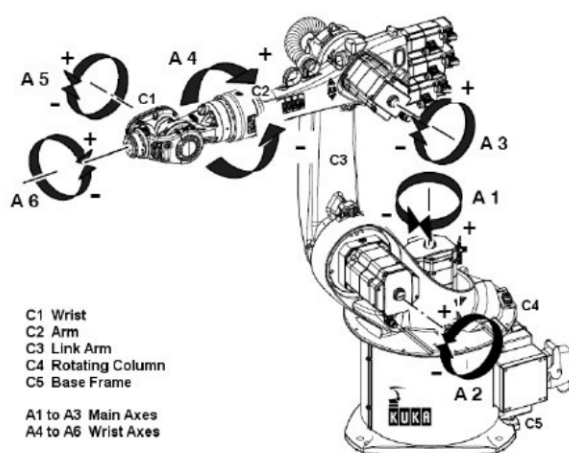
Mas, assim como automóveis (e quase tudo no mundo), edifícios não são construídos apenas por uma só máquina, feitos com apenas um material e, portanto, não há motivo razoável para pensar — nesse momento — que fabricar máquinas do tamanho de um prédio que usam o concreto para criar estruturas monolíticas seja o futuro mais promissor para o avanço da arquitetura industrializada.

É possível afirmar que os braços robóticos são os equipamentos mais compatíveis com a realidade de uma construção. São os mais flexíveis dentre todos os aplicados à manufatura digital e possuem o maior grau de liberdade em seus movimentos, além de permitir um grande alcance e a ter capacidade de lidar com cargas mais altas. Como desvantagem podemos dizer que são máquinas relativamente perigosas e pouco adequadas para trabalhar lado-a-lado com seres humanos, mas isso tende a melhorar com o desenvolvimento da robótica colaborativa, apoiada nos avanços da visão computacional e inteligência artificial.

Várias pesquisas tem sido desenvolvidas sobre o uso de robôs na fabricação *in situ* ao longo das últimas duas décadas, como as de Bock (ANDRES et al., 1994; BOCK, 1999, 2008, 2015), Pritschow (PRITSCHOW et al., 1996), Gambao (GAMBAO et al., 1999), Helm (HELM et al., 2012), Hodson (HODSON, 2013) e Ercan (ERCAN et al., 2019). Esse é um campo em crescimento e, não por acaso, é o tema da conferência anual RobArch2020, evento da principal entidade mundial relacionada as pesquisas sobre o uso de robôs industriais na arquitetura, arte e design, a Robots for Architecture.

Outra vantagem do uso de braços robóticos industriais é a sua natureza aberta e a sua versatilidade. Um mesmo robô pode executar tarefas diferentes, tais como: usinagem, corte de EPS a fio quente, pintura, impressão 3D, posicionamento de peças ou soldagem, entre muitas outras, dependendo da ferramenta (*end-effector*) que é fixada no flange de conexão localizada em seu punho⁵⁹. Os limites são basicamente definidos pelo alcance do equipamento e sua capacidade de carga (*payload*).

Figura 42 - Sistema de coordenadas e partes de um robô Kuka KR16-2



Fonte: Kuka Roboter GMBH (arquivo do autor).

Essa versatilidade, aliada às características comuns das máquinas de comando numérico computadorizado, que podem ser reprogramadas rapidamente para seguir diferentes caminhos, fazem dos robôs ferramentas com um alto potencial de uso na produção de elementos pré-fabricados para a construção civil industrializada. Braços robóticos são equipamentos de fabricação digital capazes de executar diferentes tarefas e criar elementos na escala de poucas unidades, atendendo a uma demanda crescente da arquitetura contemporânea por formas cada vez mais complexas e exclusivas.

Conforme observado por Mitchell (apud KOLAREVIC, 2005, p. 32), “arquitetos desenham o que podem construir e constroem o que podem desenhar”. Essa

⁵⁹ É comum na descrição das partes de um “braço” robótico industrial se recorrer a analogias com partes do corpo humano. O “punho” de um robô industrial é composto pelas partes situadas entre os eixos A4 e A6.

reciprocidade histórica não desapareceu na era da fabricação digital. A diferença é que, como observamos acima, os meios de produção digitais obrigam o designer a ter um conhecimento preciso sobre os processos de produção, fazendo com que ele tenha contato direto com a materialidade da sua obra. Linhas retas e curvas traçados em um papel são representações bidimensionais, abstrações criadas pelo homem para explicitar uma ideia e, ao mesmo tempo, simplificar a realidade. Esse modo de representar a arquitetura naturalmente cria uma distância entre a ideia e seus processos de produção. Na medida em que se tenta aprofundar na relação entre a representação tradicional e o objeto representado, o nível de complexidade aumenta de forma exponencial e a sua tradução se torna cada vez mais difícil e sujeita a erros.

É fato que as representações ortográficas em duas dimensões são funcionais quando as geometrias representadas são euclidianas. Quando as formas são complexas, torna-se quase impossível representar a arquitetura de forma tradicional a fim de que a mesma possa ser construída. A arquitetura digital, naturalmente tridimensional, permite uma ligação direta entre projeto e manufatura. Equipamentos de fabricação digital são capazes de traduzir as informações contidas no modelo em três dimensões em objetos físicos, direta ou indiretamente, por meio de diversas técnicas e processos distintos. Em comum a todos eles reside o fato de que agora o arquiteto é indiscutivelmente obrigado a aproximar-se das características materiais que vão trazer a sua ideia ao mundo real. De modo análogo ao que ocorria aos seus pares na Renascença, ele passa a dominar os processos construtivos do início ao fim.

3.5.2 Os processos de fabricação digital

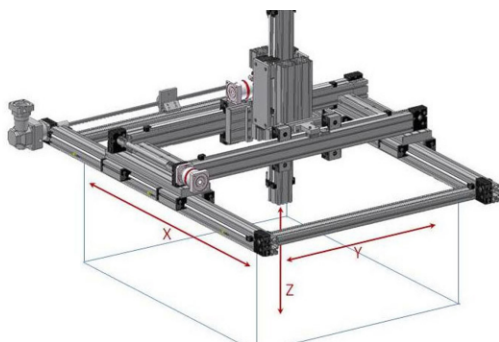
A fabricação digital é um termo genérico, que abrange uma série de processos distintos, cada um com suas características e equipamentos próprios. O ponto em comum a todos eles é o fato de que a manufatura digital necessariamente utiliza máquinas CNC, que por sua vez são programadas segundo um arquivo digital contendo todas as informações necessárias para a execução de suas tarefas.

Seguindo a classificação proposta por Kolarevic (KOLAREVIC, 2001), a seguir serão detalhados os principais processos de fabricação digital que estão relacionados com a produção da arquitetura industrializada.

Fabricação 2D ou corte CNC

O corte de materiais planos realizado por meio de máquinas CNC é o mais comum dos processos de manufatura digital. De forma geral, os equipamentos se movimentam em dois eixos no plano cartesiano (X e Y) e utilizam diferentes ferramentas para efetuar o corte de materiais, normalmente em forma de chapa (cujas dimensões de largura e altura são substancialmente maiores do que a sua espessura). As ferramentas de corte mais comuns são as fresadoras, o feixe de laser, o arco de plasma e o jato d'água.

Figura 43 - Esquema de máquina CNC cartesiana



Fonte: Macron Dynamics⁶⁰

As fresadoras utilizam ferramentas rotativas como *spindles* e fresas (ou *bits*) fixados em sua extremidade que possuem a capacidade de realizar o corte de forma mecânica, por meio do contato da parte afiada da fresa com o material. A velocidade de rotação do *spindle* e de avanço no corte dependem exclusivamente do tipo de material a ser cortado e de sua espessura em relação a dimensão da fresa utilizada. Existe uma grande variedade de fresas, próprias para o corte dos mais diversos tipos de materiais com diferentes propriedades mecânicas, da madeira laminada, passando pelos polímeros, metais e materiais compósitos.

O corte CNC com feixe de laser é outra modalidade comum na fabricação digital. O corte do material é realizado pelo direcionamento de um feixe de luz *laser*

⁶⁰ Disponível em: <https://www.macrondynamics.com>. Acesso em: 01/03/2020

(geralmente oriunda do CO_2)⁶¹ por meio de espelhos, de forma que o mesmo atinja a superfície do material a ser cortado em um ângulo reto. O corte é realizado pela vaporização do material em função do calor gerado pelo *laser*. Isso faz com que apenas materiais que absorvam energia luminosa possam ser manufaturados por esse processo, mas os mais comuns no caso da construção são as madeiras laminadas como os compensados e o MDF (*Medium Density Fiberboard*).

O corte realizado com arco de plasma é semelhante ao laser, porém o calor é gerado pela aplicação de um arco elétrico em um gás pressurizado, fazendo o mesmo aquecer até chegar ao estado de plasma, atingindo altas temperaturas. Geralmente é utilizado no corte de chapas de metal de até uma polegada de espessura com grande precisão e rapidez.

Por fim, o jato d'água, como o próprio nome indica, utiliza um feixe extremamente concentrado de água misturada a um material abrasivo sólido, direcionado em altíssima pressão ao material, que é cortado devido a erosão mecânica. Assim como o corte a plasma, é utilizado apenas para corte de materiais metálicos e pode efetuar o corte de chapas de grande espessura, chegando até 20cm no caso de metais mais flexíveis como o titânio. Outra vantagem do corte a jato d'água é que o processo não envolve calor, o que minimiza ou elimina eventuais deformações ao efetuar o corte de chapas mais esbeltas, como acontece no caso do corte a plasma.

Figura 44 - Tecnologias de corte 2D



Fonte: Arquivo do autor

⁶¹ Existem tipos de laser baseados em outros gases — geralmente utilizados no corte de metais — mas os mesmos não são os mais comumente utilizados na indústria.

Embora os processos de manufatura listados acima trabalhem com materiais laminares bidimensionais, os mesmos são muito utilizados para a materialização de geometrias complexas. Como explicitado na primeira parte dessa tese, uma das estratégias mais utilizadas para materializar formas livres é realizar a sua racionalização por meio da subdivisão de superfícies (POTTSMANN et al., 2010) ou da aproximação por superfícies regradas desenvolvíveis (FLÖRY; POTTSMANN, 2010). Por meio desses processos de discretização, as formas livres ou demais geometrias complexas com um ou dois graus de curvatura são subdivididas de maneira que suas partes sejam formadas por planos ou por superfícies regradas de curvatura simples. Por meio desse processo, geometrias complexas podem ser construídas com a utilização de materiais laminares, comumente encontrados na cadeia da construção civil industrializada, aliando o seu baixo custo à rapidez de produção.

Manufatura subtrativa

Os processos de corte bidimensional listados acima também poderiam ser categorizados como manufatura subtrativa, pois o seu produto final é conseguido por meio da subtração de parte do material utilizado, seja por meio da ação do calor ou do atrito, porém Kolarevic (KOLAREVIC, 2001) sugere uma distinção. A manufatura subtrativa é a que remove parte do material de uma peça sólida tridimensional utilizando a usinagem CNC, até se obter a geometria final desejada. A ferramenta utilizada é a mesma do corte em duas dimensões — *spindles* e fresas metálicas — porém nesse processo ela está conectada a uma máquina CNC que tem a capacidade de se movimentar em três ou mais eixos no plano cartesiano (X, Y e Z), ou mesmo acopladas a braços robóticos industriais com seis ou mais graus de liberdade.

A usinagem tridimensional geralmente é utilizada na indústria da construção civil para a fabricação de fôrmas em materiais leves — como poliuretano e poliestireno expandido — para a produção de elementos pré-moldados de concreto em baixa escala de produção, como ocorre com as geometrias complexas. Alguns exemplos de arquitetura contemporânea construídos por meio dessa técnica são as Neuer Zollhof Towers de Frank O. Gehry (Dusseldorf, 1999) ou a Big Belt House projetada por William Massie (Montana, 2001).

Figura 45 - Fabricação de fôrmas em EPS por meio da fresagem CNC



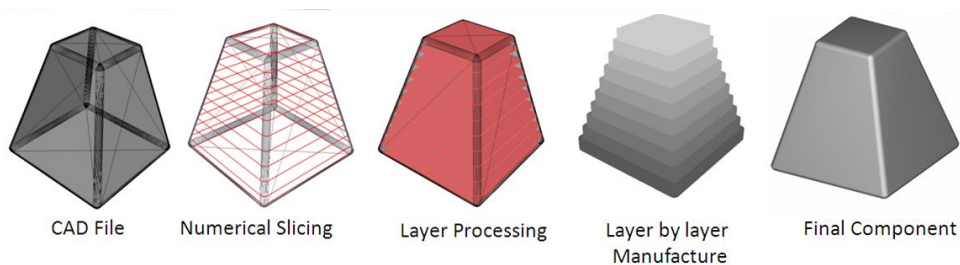
Fonte: Wikimedia

Diferentemente dos processos de corte em 2D, a utilização da fabricação subtrativa para a confecção de moldes permite a materialização de formas livres sem a necessidade de aproximação ou racionalização da forma original, porém a usinagem de grandes blocos de EPS é um processo que consome uma grande quantidade de tempo de máquina, o que termina por encarecer o seu custo.

Manufatura Aditiva (MA)

A manufatura aditiva, mais conhecida como impressão 3D, é um processo que utiliza equipamentos CNC para fabricar — de forma customizada e em pequena escala — objetos criados digitalmente por meio de programas de CAD. Com o uso de um software de CAM o objeto digital é “cortado” de alto a baixo (*slicing*) em fatias de espessura pré-determinada, gerando um desenho bidimensional de cada uma das partes. Posteriormente, esse conjunto de desenhos bidimensionais é enviado para a impressora 3D na forma de um código numérico e o equipamento deposita a matéria prima, camada sobre camada, de baixo para cima, até a materialização total do objeto.

Figura 46 - Fluxo de trabalho manufatura aditiva



Fonte: Amcor⁶²

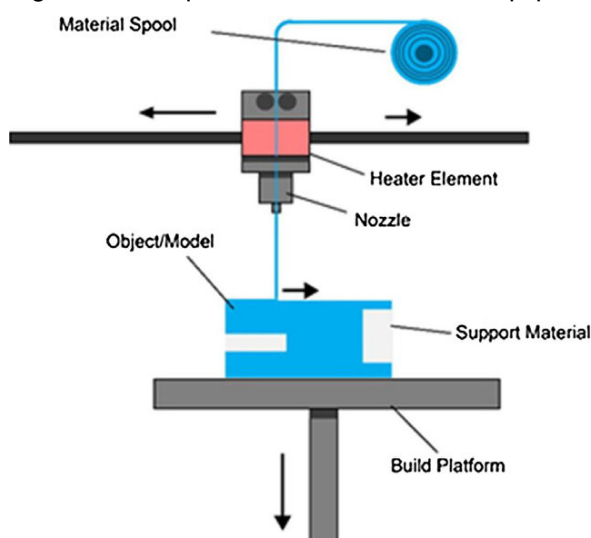
⁶² Disponível em: <http://www.amcor.eu>. Acesso em: 02/03/2020

A principal característica da impressão 3D, assim como em todos os processos que envolvem máquinas de fabricação digital, é a possibilidade de atingir um alto grau de customização na produção, uma vez que os equipamentos não trabalham com moldes físicos, mas sim virtuais. Não há otimização com a repetição, como na fabricação seriada. Não existe diferença em fabricar dez peças iguais ou dez peças diferentes pois, na MA o que conta é o tempo de uso do equipamento e o material gasto, e não a forma final do objeto.

Embora a MA tenha o potencial de criar inovações disruptivas em diversas áreas, ela possui uma desvantagem, que é a sua baixa capacidade de produção. Não é possível comparar a velocidade e o volume de fabricação de uma impressora 3D - que pode consumir dias para produzir um objeto de grandes proporções - com a capacidade das máquinas utilizadas na produção industrial em série.

O processo de manufatura aditiva mais utilizado é o FDM ou FFF (do inglês, *Fused Deposition Modeling* ou *Fused Filament Fabrication*) criado por Scott Crump em 1989 (CRUMP, 1992). Esse processo é caracterizado pela extrusão de um material termoplástico, normalmente apresentado em forma de filamento, que é aquecido até o seu ponto de transição vítrea e depositado em uma superfície plana, camada sobre camada, até a formação do objeto final desejado, conforme o esquema abaixo:

Figura 47 - Esquema de funcionamento equipamento FDM/FFF



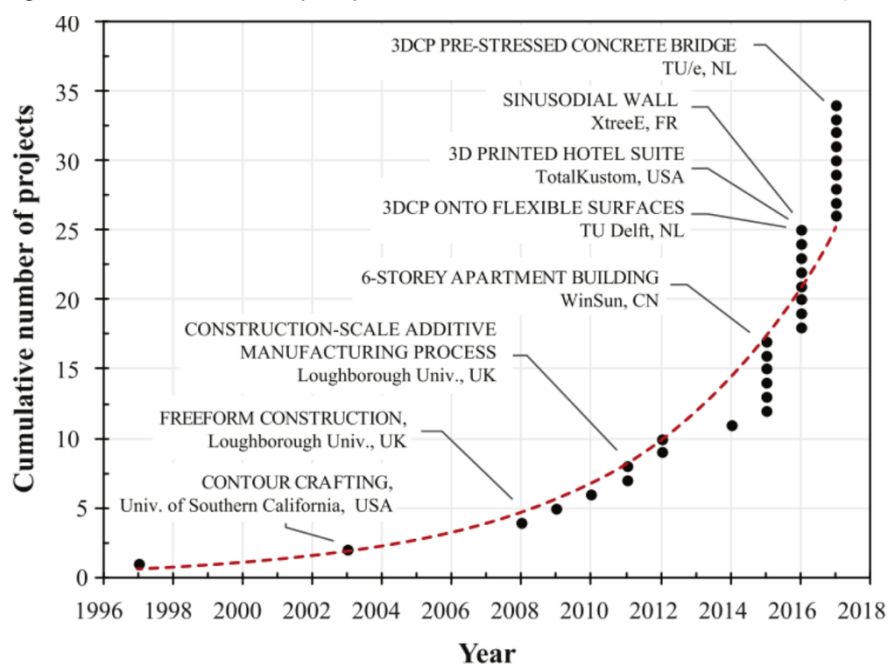
Fonte: (DIZON et al., 2018).

Um dos grandes motivos por trás da disseminação das impressoras 3D foi o vencimento da patente do processo FDM em 2008, que provocou o surgimento de centenas de modelos de equipamentos mais simples e acessíveis (abaixo de US\$ 5.000,00), baseados em licenças abertas (GPL / *Creative Commons*) (JONES et al., 2011; SELLS et al., 2010). Para se ter uma ideia dos números, em 2007 foram vendidos 66 equipamentos FDM de baixo custo, enquanto apenas oito anos depois (2015), esse montante chegou a quase 280 mil impressoras vendidas em todo o mundo (WOHLERS, 2016).

A manufatura aditiva é um dos campos da fabricação digital que mais se desenvolveu na última década. Segundo trabalhos publicados por Ngo e Leu (GUO; LEU, 2013; NGO et al., 2018) , em 2018 foram listados seis principais processos distintos de MA, que envolvem o processamento de dezenas de materiais apresentados em diferentes formas (filamentos sólidos, resinas e outros líquidos, pó, lâminas, pasta e folhas).

Esse rápido desenvolvimento acabou introduzindo a MA no campo da construção civil, com o uso de impressoras 3D capazes de utilizar o concreto ou cimento adicionado de fibras como matéria prima. A pesquisa sobre a MA de larga escala que utiliza materiais de base cimentícia, comumente chamada de 3DCP (do inglês *3D Concrete Printing*), vem crescendo nos últimos dez anos e, atualmente, existem mais de trinta grupos ao redor do mundo envolvidos com o tema (BUSWELL et al., 2018).

Figura 48 - Trabalhos de pesquisa sobre manufatura aditiva na construção civil



Fonte: (BUSWELL et al., 2018).

É possível afirmar, apoiando-se em pesquisas em bases de dados de patentes⁶³ e anais de congressos especializados⁶⁴, que a primeira pesquisa que envolve a utilização de material de matriz cimentícia e fabricação digital é aquela realizada na University of Southern California (USC), intitulada “Contour Crafting” (CC) (HWANG; KHOSHNEVIS, 2004).

O sistema consiste em uma tecnologia de fabricação aditiva que utiliza o controle computadorizado para criar superfícies de forma livre. Um grande pórtico automatizado, somado a um equipamento de extrusão de material cimentício, possibilitaria a construção da estrutura ou edificação de maneira integral. Segundo o próprio pesquisador principal (KHOSHNEVIS et al., 2006), a viabilização do projeto pressupõe um tal desenvolvimento e integração com a indústria da construção e de todos os seus atores em torno esse novo sistema construtivo, que hoje ainda é inimaginável pensar em sua viabilidade a curto prazo, embora a sua técnica seja comprovadamente plausível.

⁶³ Patente US 7814937 B2, Deployable contour crafting. Fonte: Google Patents (22/06/2015)

⁶⁴ Anais do ISARC (International Symposium of Automation and Robotics in Construction) de 1984 até 2014. Fonte IAARC.org (consultado em julho de 2019)

Outra pesquisa de fundamental importância acerca da manufatura aditiva utilizando materiais cimentícios teve origem na Universidade de Loughborough, no Reino Unido. Da mesma maneira que o trabalho desenvolvido pelo grupo da USC, essa pesquisa emprega um pórtico mecânico computadorizado, utilizado como meio para a deposição das camadas de cimento, com precisão, no local desejado.

Inspirada, particularmente, nas técnicas tradicionais de impressão, a pesquisa tem o apoio de importantes atores do mercado da construção mundial, como o escritório de arquitetura Foster & Partners e o Buro Happold, especializado em projetos estruturais de alta complexidade (BUSWELL et al., 2005).

Mais recentemente, em 2014, a Universidade de Loughborough firmou um acordo de cooperação com um consórcio de empresas, liderado pela gigante mundial da construção civil Skanska, com o objetivo de desenvolver o uso da impressão 3D em concreto. O engenheiro Rob Francis, diretor de inovação e desenvolvimento da Skanska UK (Reino Unido) declarou na ocasião que a “impressão em concreto, quando combinada com uma espécie de centro de pré-fabricação móvel, tem o potencial de reduzir o tempo necessário para criar elementos complexos para os edifícios, de semanas para horas”⁶⁵. Acrescentou ainda: “Nós esperamos alcançar um nível de qualidade e eficiência jamais visto na construção”. O objetivo final da iniciativa, segundo a mesma matéria, é desenvolver o primeiro robô comercial do mundo para impressão 3D em concreto.

A principal diferença entre as duas pesquisas (“*Contour Crafting*” e “*Freeform Construction*”) reside no fato de os ingleses partirem do princípio do uso da técnica para a execução de componentes construtivos, e não da edificação inteira, o que nos parece ser uma aproximação mais razoável. Essa abordagem, ao que tudo indica, oferece algumas vantagens importantes a serem consideradas, pois permite a integração dos seus componentes com os demais sistemas construtivos já existentes no mercado, sem a necessidade de grandes adaptações na cadeia produtiva da

⁶⁵ Matéria de Justin McGar veiculada pela revista eletrônica *Sourceable Industry News and Analysis* sob o título “*Partnership Signed to Develop 3D Concrete Printing*” datada de 10/12/2014. Fonte: <https://sourceable.net/partnership-signed-to-develop-3d-concrete-printing/> (15/10/16)

construção civil, particularmente a da pré-fabricação em concreto. Além disso, permite ao projetista uma liberdade quase que irrestrita na criação de formas complexas, uma vez que o equipamento também prescinde da utilização de moldes para a execução dos elementos pré-fabricados, possibilitando a concepção de um sistema construtivo aberto, passível de integração com os demais subsistemas comerciais existentes.

Apesar de promissora, a técnica de extrusão de material cimentício em camadas, de forma análoga a uma impressão 3D com filamentos, traz uma série de desafios ainda não equacionados. Buswell, em um dos seus mais recentes artigos, enumera uma série de questões chave que fazem com que o processo de 3DCP atualmente ainda seja, nas suas próprias palavras “um processo inconsistente e pouco confiável, que requer operadores de máquinas experientes e um extraordinário cuidado na preparação e formulação dos materiais” (BUSWELL et al., 2018).

As propriedades reológicas do concreto são um dos mais importantes pontos de observação, de acordo com as mais recentes pesquisas realizadas por Zhou (ZHOU et al., 2013), Volkmer (HAMBACH; VOLKMER, 2017), Gibbons ((GIBBONS et al., 2010), Wang (MA; WANG, 2017) e Kazemian (KAZEMIAN et al., 2017). A impressão de formas complexas requer um material com uma baixa relação água-cimento, porém com alto grau de viscosidade, de forma que seja possível realizar a extrusão do material por um pequeno orifício. Por outro lado, é preciso garantir uma alta resistência inicial, de forma que as camadas já impressas não colapsem sob o peso das camadas subsequentes. Outro problema recorrente apresentado nas pesquisas é a tendência a formação de juntas frias entre as camadas de argamassa. A determinação de uma dosagem (*mix design*) ótima é influenciada por diversos fatores, como as quantidades de superplastificantes, retardantes e aceleradores de pega, fibras e fillers (LE et al., 2012).

Ainda não é possível prever quando (e se) o processo de 3DCP vai se desenvolver a ponto de se tornar viável comercialmente, mas, na opinião desse pesquisador, a fabricação de elementos — ou de edifícios inteiros — a partir da extrusão de camadas concreto parece não ser a abordagem mais viável para a materialização de formas livres e complexas. Até o presente momento, a única vantagem do sistema frente aos outros processos de fabricação com concreto é o fato

da impressão 3D prescindir do uso de formas, ao depositar o material diretamente no local desejado, na quantidade correta.

Entretanto, essa vantagem teórica ainda não se concretizou em um método produtivo confiável ou compatível com os sistemas construtivos existentes no ecossistema da construção civil.

3.6 Um novo processo de produção

Antes de adentrarmos na descrição de um novo processo de manufatura digital para a produção de elementos pré-fabricados em concreto, que é o princípio da proposição apresentada nessa tese, acredita-se ser importante recapitular os conceitos que a embasam, sintetizando o panorama exposto nos capítulos anteriores.

A introdução de inovações no campo da construção civil se dá, historicamente, por meio de processos incrementais e não disruptivos. Os avanços tecnológicos, por sua vez, envolvem o desenvolvimento de novos materiais e processos de produção, mas muitas vezes também podem ser alcançados unindo-se materiais e técnicas já existentes de formas inovadoras.

Aliar o GRC com a fabricação digital é uma proposta de inovação incremental e do encontro da técnica com a tradição. O concreto reforçado com fibra de vidro é um material extremamente avançado, que incorpora tecnologias advindas das pesquisas com materiais compósitos, mas que também conta com a tradição ancestral do uso do cimento, o material de construção mais utilizado pelo homem.

Entretanto, apesar de ser um material avançado, ainda é produzido de forma extremamente artesanal e prejudicial à saúde dos trabalhadores, o que abre as portas para a introdução de mudanças e melhorias no seu processo. As possibilidades aqui levantadas passam pelo uso de novos materiais e técnicas para a construção de fôrmas para a produção de elementos pré-fabricados e a implementação de um processo de automação da produção diretamente conectado com as ferramentas de criação utilizadas pelos arquitetos.

A fabricação digital, em especial a robótica, vem sendo desenvolvida pelos avanços da indústria automobilística e de bens de consumo há quase meio século, alcançando um alto grau de maturidade técnica. Além disso, o crescimento do número de robôs em uso faz com que os custos de implantação desses equipamentos sejam mais acessíveis, o que passa a justificar o seu emprego em uma área onde o baixo valor da mão de obra sempre repeliu altos investimentos em tecnologia.

Propor um novo método de produção automatizada para o GRC vai de encontro a necessidade de se desenvolver o campo da arquitetura industrializada, assunto que vem sendo debatido desde a década de 1970, com poucos avanços. Ao materializarmos formas complexas de uma arquitetura contemporânea como a proposta por Zaha Hadid, criamos o momento necessário para subirmos um degrau no nível de industrialização da área e a construção civil deixe de se basear majoritariamente em processos artesanais, dispendiosos e pouco eficientes.

O próximo capítulo — podemos dizer que o principal nessa pesquisa — trata do embasamento, execução e descrição de um experimento de caráter empírico, em forma de prova de conceito, que visa propor um novo método de produção robotizada de elementos laminares pré-fabricados leves de GRC, pelo processo do *sprayed premix*, utilizando a fabricação digital para a confecção de suas formas e projeção da matriz cimentícia.

4 BASE EMPÍRICA

Conforme descrito nos capítulos anteriores dessa tese, interessa ao trabalho, sobretudo, explorar formas de materializar a arquitetura criada por meio de ferramentas digitais e analisar se a fabricação digital pode ser definida como um catalizador em direção à industrialização da construção civil.

Se, por um lado, trata-se de uma pesquisa sobre o que há de mais avançado no campo da concepção arquitetônica (uso de programas de modelagem tridimensional paramétrica baseados em superfícies NURBS), procurou-se fazer uma conexão com a tradição dos meios de produção⁶⁶, de modo que esse trabalho represente um incremento — e não uma ruptura — no desenvolvimento dessa indústria.

Para isso, foi desenhada uma experiência utilizando o estado-da-arte das ferramentas de concepção e produção, para testar a validade de princípios teóricos como o do continuum digital e da customização em massa — apresentados anteriormente nessa tese — além de verificar a sua viabilidade dentro de um contexto técnico e cultural que é muito distinto daqueles onde esse tipo de trabalho é realizado nos dias de hoje.

Com a realização desse experimento, em caráter de prova de conceito, espera-se demonstrar que a digitalização de processos de produção tradicionalmente artesanais nos permite materializar geometrias mais complexas demandadas pela arquitetura contemporânea e também que todas essas ferramentas já estão disponíveis aos arquitetos, a quem cabe liderar os avanços na industrialização da arquitetura.

A descrição dos ensaios e seus resultados práticos serão apresentados na sequência desse capítulo, porém acredita-se ser importante pormenorizar as fontes primárias de informação que subsidiaram a realização do experimento, como a

⁶⁶ A tradição é justificada pela escolha do concreto e dos braços robóticos. O primeiro é um material de construção de uso ancestral e os robôs são ferramentas consolidadas na manufatura há mais de trinta anos.

entrevista feita com o Prof. Carlos Balaguer e o período de estudos práticos em fabricação digital robótica realizado na ETH em 2012.

4.1 Entrevista Prof. Carlos Balaguer

Para tentar esclarecer por que a pesquisa sobre fabricação robotizada de painéis de GRC, realizada na Espanha na década de 1990, foi descontinuada (apesar dos resultados positivos), e também para conhecer a opinião do Professor Balaguer sobre o uso da impressão 3D em concreto, foi realizada uma entrevista com o pesquisador espanhol por meio de videoconferência, em fevereiro de 2017. As perguntas foram previamente enviadas por e-mail e a transcrição integral da entrevista é encontrada nos apêndices desse trabalho.

4.1.1 Principais pontos

Em um primeiro momento, o Prof. Balaguer respondeu às perguntas sobre por que o grau de automação na construção ainda ser baixo, apesar de todos os avanços em materiais e do advento de novas tecnologias de fabricação, após mais de vinte anos do término da pesquisa que liderou. Segundo a opinião do Prof. Balaguer, ele acredita que a principal razão pela qual a automação não evoluiu muito no setor de construção civil nos dias de hoje é o custo, principalmente o custo humano envolvido. É uma indústria muito sensível aos custos, como todas elas, mas a construção civil, por sua escala, tem uma sensibilidade orçamentária particular. Desenvolvendo seu argumento, ele cita o fato de que apesar da queda nos preços dos equipamentos, o valor da mão-de-obra da construção ainda é muito baixo, mesmo na Europa (onde a crescente onda de imigração tem aumentado a oferta de empregos menos qualificados), em comparação com o nível de complexidade envolvido na automação de processos. Com exceção de alguns trabalhos e pesquisas realizados no Japão, que é o país historicamente mais avançado nesse campo, ele acredita que o baixo custo da mão de obra é o que ainda impede que a automação seja amplamente aceita na indústria da construção civil.

Prosseguindo com a entrevista, o pesquisador questionou o Prof. Balaguer acerca das diferenças críticas entre o momento em que a pesquisa foi realizada e hoje, com a profusão de soluções de software e *hardware* de baixo custo para o controle

de robôs industriais. De acordo com sua opinião, inquestionavelmente, o cenário atual mudou muito em relação ao momento em que o estudo foi desenvolvido, no início da década de 1990. Hoje há um grande número de ferramentas, programas e numerosas bibliotecas de software que nos permitiriam fazer o sistema mais fácil de implementar. Naquela época, o software adotado era extremamente personalizado e totalmente "escrito à mão", já que não havia soluções de prateleira para a integração. Além disso, agora há uma comunidade crescente de usuários desses dispositivos e até mesmo um sistema operacional de código aberto para a operação de robôs, como o ROS (Robot Operation System), que era impensável na época. Ele atestou que, de fato, a maior dificuldade da pesquisa era implementar as interfaces entre os sistemas CAD, CAM e o braço robótico. A maior parte do tempo e disponibilidade da pesquisa foi no desenvolvimento dessa integração.

Outra questão que se considerou pertinente pedir a opinião do pesquisador espanhol foi sobre o grau de personalização que o sistema permitia na época e sua comparação com as condições técnicas reais. Segundo o Prof. Balaguer, em termos de implementação dos processos de automação na planta, a solução foi extremamente flexível, permitindo executar qualquer tipo de painel, dentro de certas restrições impostas pelas condições de espaço e a fim de evitar colisões do braço robótico com seu entorno, mas um dos limites mais significativos foi realmente a produção de moldes. Como disse o Prof. Balaguer ao pesquisador, os moldes eram feitos manualmente com madeira, e esse era o principal obstáculo para uma flexibilização completa do formato do painel, ou seja, era inevitável seguir esses modelos predeterminados para atingir um nível satisfatório de produtividade em uma fábrica.

Quanto ao caso da produção automatizada de GRC, ele considera que, se a intenção é adquirir um alto grau de personalização, é essencial melhorar a forma como os moldes são produzidos. Muito do esforço e dos limites apresentados por esta tecnologia reside na fabricação, transporte e manuseio dos moldes. De acordo com uma informação que o Prof. Balaguer trouxe, hoje há algum progresso no desenvolvimento de sistemas digitais flexíveis de fundição sob pressão, como o trabalho desenvolvido na TU Delft, que pode contribuir para muitos avanços nesta área.

Uma das questões centrais da entrevista diz respeito às razões pelas quais a pesquisa e a automação dos processos de produção de GRC não se tornaram um padrão na indústria da construção, apesar dos números muito favoráveis apresentados nos resultados conclusivos. Surpreendentemente, o líder da equipe espanhola nos disse, como um fato curioso, que o problema mais considerável era que o sistema era muito produtivo. A planta automatizada alcançou um nível de produtividade tão avançado que não havia espaço suficiente para os painéis serem armazenados e a produção foi solicitada a ser mais lenta para dar conta do transporte e armazenamento na fábrica. Outra questão que influencia este fato, de acordo com a sua opinião, é que existem atualmente materiais compósitos mais baratos do que o GRC para a produção de fachadas, tais como alguns plásticos e cerâmicas.

Migrando para os temas da educação, formação de arquitetos e novas experiências com o uso da fabricação digital robótica na construção, em particular as pesquisas realizadas com a extrusão de materiais cimentícios, o Prof. Balaguer argumentou que a maior dificuldade é, no entanto, o início do processo, pois o arquiteto tem que pensar e iniciar seu projeto em três dimensões se quiser realizar uma integração com a fabricação digital. Se o projeto inicial é em 2D e tem que ser "traduzido", isso requer um grau avançado de complexidade, bem como o gasto de tempo e recursos muito consideráveis, o que por sua vez impede uma integração completa dos processos de criação e execução digitais. O pesquisador espanhol pensa que o BIM é uma grande ferramenta e possivelmente uma parte desta solução, uma vez que promoveria a inclusão de todos os participantes - designers, arquitetos, engenheiros e outros stakeholders - com uma planta automatizada ou com o conceito de Computer Integrated Manufacturing (CIM), que naturalmente envolve a fabricação robótica digital.

Em resumo, sobre o recente desenvolvimento de pesquisas de fabricação de aditivos à base de cimento, o Prof. Balaguer acredita que, no caso da projeção GRC ou da impressão 3D em concreto, o desafio substancial é a rota e os cálculos para evitar colisões necessários para o robô, que permanecem complexos e difíceis de resolver problemas matemáticos, mesmo com o estágio atual de desenvolvimento de ferramentas de software e *hardware*. Ele observou que isso não é para dizer que não

é possível. Agora tornou-se mais fácil, mas ainda é um problema importante. Ele vê progressos na utilização da impressão 3D como um processo de construção de moldes para posterior concretagem, por exemplo, o que possibilita a aplicação desta tecnologia para a execução de estruturas autoportantes, com a inserção de pilares ou vigas, ao contrário da projeção GRC, que está sempre focada na produção de peças leves ou fachadas. Em geral, ele acredita que vale a pena pensar na impressão 3D para edifícios inteiros ou parte deles, mas provavelmente, em sua opinião, a qualidade ainda não é suficiente para fins comerciais. É relativamente fácil erguer um barracão ou um edifício não residencial, ou uma peça de mobiliário urbano com este tipo de tecnologia, mas se precisamos de um alto padrão, a impressão 3D não é, no entanto, uma solução adequada. Conclusivamente, ele comentou que a tendência é que a qualidade melhore no futuro, mas na sua opinião, ainda não é a melhor maneira de construir.

4.2 Trabalhos preliminares de campo

Em dezembro de 2012, o pesquisador participou presencialmente em uma oficina prática na ETH, que fez parte da primeira conferência internacional sobre robótica aplicada a arquitetura, arte e design (RobArch2012⁶⁷), realizada em Viena, Áustria. O workshop abordava detalhadamente o uso e as funções principais do programa de computador e a prototipagem digital de modelos em escala, mas teve como objetivo principal a construção de um elemento de vedação em escala real, fazendo uso de um braço robótico industrial de sete DOF existente na Keller AG, fabricante local de elementos cerâmicos e parceira dos arquitetos em seus trabalhos de pesquisa.

4.2.1 Workshop Brick Design

Após uma palestra presencial realizada pelo arquiteto Fabio Gramazio sobre alguns projetos selecionados e a exploração das possibilidades trazidas pelo uso da fabricação digital em arquitetura, o grupo de participantes foi introduzido ao programa

⁶⁷ Maiores informações sobre o evento e as séries de oficinas são encontradas no site www.robarch2012.org.

de computador *Brick Design*. O *plug-in* consiste em um programa que opera dentro do software de modelagem Rhinoceros3D e que adiciona ao programa principal, comandos específicos para a criação de elementos constituídos de tijolos cerâmicos. A necessidade de se utilizar um programa específico para essas operações com tijolos provém do fato que, utilizando um programa comum, é muito difícil trabalhar com uma quantidade muito grande de elementos geométricos tridimensionais. Uma simples parede ou um elemento de fachada é formado por milhares ou dezenas de milhares de elementos únicos, cada um carregando uma grande quantidade de informação e acarretando uma alta necessidade de poder de processamento computacional, o que torna praticamente impossível a sua manipulação direta. O que o *plug-in* criado realmente faz é trabalhar o painel de vedação como um único elemento geométrico, simplificando a quantidade de cálculos necessários para a manipulação de uma grande quantidade de elementos distintos (BONWETSCH; BÄRTSCHI; HELMREICH, 2012). Além disso, o programa acrescenta outras capacidades e possibilidades de criação (atratores, deformações, aplicação de padrões) específicas, voltadas especialmente para o material a ser utilizado, respeitando as suas características físicas e introduzindo questões pertencentes à sua fabricação⁶⁸.

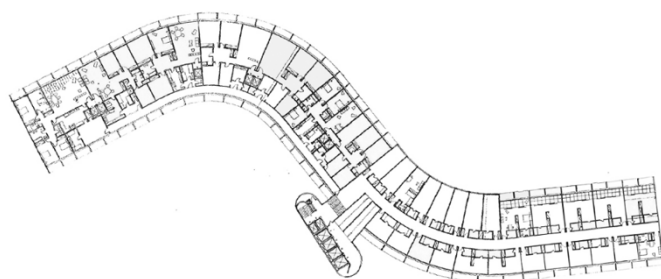
A primeira tarefa na oficina foi realizar o exercício individual de criação de um elemento de fachada genérico, sem limites ou dimensões específicas. A intenção foi a de introduzir os comandos básicos do programa de forma a que todo o grupo pudesse conhecer as funcionalidades e a lógica de criação do programa, um pouco diferente da que se está habituado no uso direto de ferramentas digitais de modelagem, como o Rhino3D.

A proposta desse pesquisador foi a criação de uma parede com curvatura simples, com aproximadamente dois metros e cinquenta de largura por um metro e setenta de altura. A intenção foi a de explorar algumas possibilidades mais avançadas do programa, como a definição de linhas de influência, conhecidas como atratores.

⁶⁸A intenção aqui não é descrever minuciosamente a utilização do programa — que pode ser obtido gratuitamente no site <http://www.food4rhino.com/project/brickdesign> — e que já contém o manual de instruções detalhado.

Atratores são linhas (ou pontos) que atuam indiretamente sobre uma determinada geometria, fazendo que a mesma obtenha uma configuração de posição única, dependendo de sua proximidade ou afastamento dessas linhas de influência. No caso desse autor, para o desenho inicial da parede curva, foi escolhido como ponto de partida a planta do pavimento-tipo do edifício Copan, obra de Oscar Niemeyer em São Paulo⁶⁹.

Figura 49 - Planta pavimento-tipo Edifício Copan



Fonte: Arquitectos (Vitruvius)⁷⁰

Após a definição dessa primeira premissa, diretamente ligada a geometria geral do elemento proposto, era necessário definir o desenho da linha de influência ou atrator que iria atuar na modificação da posição de cada um dos tijolos individualmente. Como a intenção era a de testar a maior quantidade de possibilidades de projeto possíveis, foi escrito um pequeno algoritmo utilizando-se um outro programa acessório ao modelador principal, o Grasshopper 3D⁷¹. Com isso, o desenho da linha de influência passou a ter características paramétricas, ou seja, era

⁶⁹O arquiteto brasileiro havia acabado de falecer à época e a sua menção em meu trabalho foi uma maneira de poder mostrar ao grupo presente na oficina, composto por quinze pessoas de diferentes países, uma das suas obras mais emblemáticas em nossa cidade.

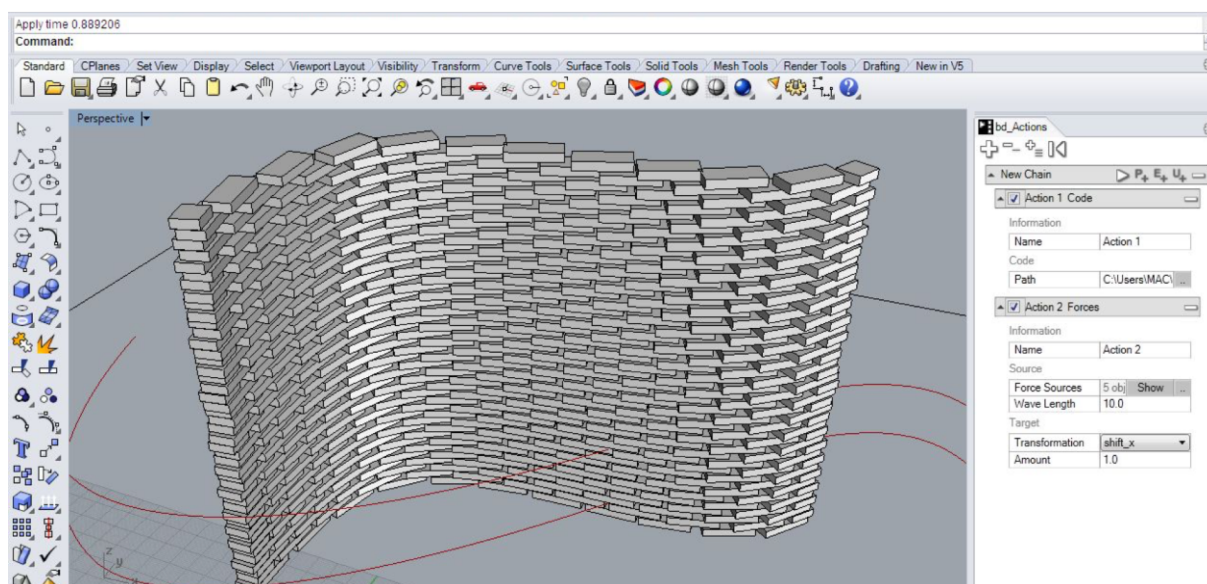
⁷⁰ Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitectos/13.151/4630>. Acesso em: 01/03/2020.

⁷¹Grasshopper 3D é um plugin para o Rhino que permite a criação de formas (complexas ou não) por meio da programação visual de algoritmos geométricos, ao invés da manipulação direta das mesmas. Com isso as entidades criadas ganham características paramétricas, ou seja, é possível manipular a sua forma ou posição alterando-se os parâmetros de entrada dos seus algoritmos, e não mais atuando-se diretamente sobre a sua geometria.

possível alterar a sua geometria alterando apenas os seus parâmetros de construção existentes nos algoritmos.

Observando-se o resultado final, foi possível inferir como a criação de geometrias por meio do programa *Brick Design* torna a manipulação complexa de um número muito grande de elementos individuais uma tarefa mais simples. Além disso, o programa adiciona às geometrias criadas as informações necessárias para a posterior prototipagem ou fabricação digital robótica.

Figura 50 - Uso do plugin *Brick Design*



Fonte: Arquivo do autor.

O segundo dia de trabalhos foi dedicado à experimentação de uma outra característica do programa, que é a aplicação de padrões sobre a malha de tijolos por meio da leitura de imagens bitmap. As informações de luz e sombra de cada pixel da imagem selecionada é transformada em um dado numérico que resulta na alteração (rotação ou translação) da posição dos tijolos do modelo tridimensional. Esse é o mesmo processo que foi utilizado pelos arquitetos Gramazio e Kohler na criação da fachada da vinícola Gantenbein.

Seguindo o mesmo princípio do exercício anterior, o pesquisador procurou buscar uma referência arquitetônica da obra de Oscar Niemeyer que pudesse ser aplicada como um padrão de deformação em um grande muro de tijolos. Para tal

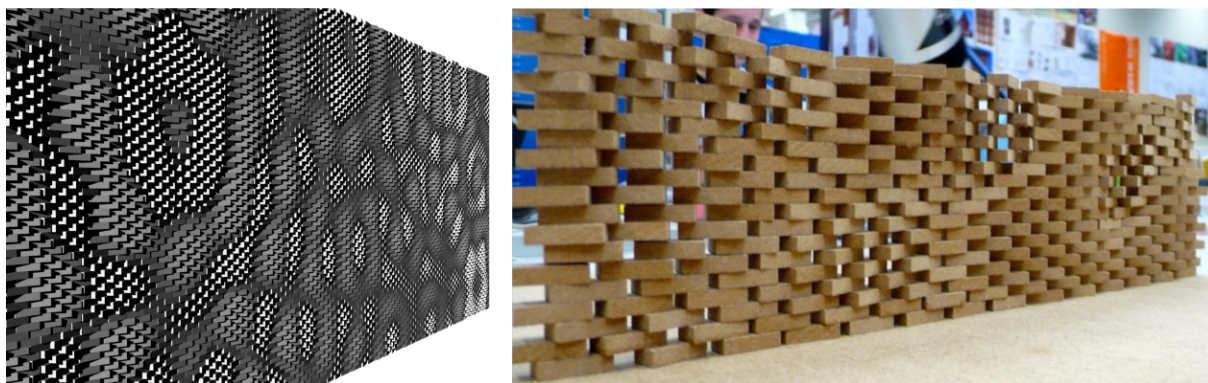
selecionou-se uma imagem fotográfica da tradicional coluna do palácio da Alvorada em Brasília, ainda durante época de sua construção.

A coluna foi redesenhada no computador e distribuída em um padrão aleatório definido pelo pesquisador, de maneira que ocupasse toda a superfície do muro proposto e criasse um elemento visual interessante⁷². A maior intenção aqui era a de se experimentar as funcionalidades do programa, sobressaindo-se sobre o projeto arquitetônico do elemento em si.

Após a determinação do desenho padrão, foi possível definir no programa cada uma de suas partes como sendo uma geometria que influenciaria a deformação de cada um dos elementos individuais no muro (Fig 51 esquerda).

Agora, com a geometria desejada já definida, o programa efetua a exportação do arquivo com as informações tridimensionais de fabricação para um formato específico de linguagem de programação de robôs, de forma que foi possível realizar a prototipagem do modelo criado pelo pesquisador em escala reduzida (Fig.51 direita).

Figura 51 - Resultados finais do exercício com o programa *Brick Design*



Fonte: Arquivo do autor

⁷²Como consequência do curto tempo disponível para a criação do exercício, o processo de criação do padrão e de sua distribuição sobre o muro foi realizado manualmente. Idealmente teria sido feito com as ferramentas de parametrização disponíveis no programa Grasshopper, o que tornaria possível a geração de infinitas possibilidades de combinação dos padrões, deixando para o arquiteto a decisão da escolha daquele que melhor se adequaria segundo os seus critérios.

Em nossos trabalhos foi utilizado um robô UR5 da fabricante dinamarquesa Universal Robots equipado com um efetuador⁷³ do tipo ventosa a vácuo⁷⁴, capaz de prender um pequeno paralelepípedo de madeira, que é a representação física em escala reduzida do tijolo utilizado na fabricação. As peças de madeira eram alimentadas manualmente (cerca de vinte peças por vez) em um trilho inclinado de alumínio, fazendo com que, a cada unidade retirada pelo robô no início dessa linha de alimentação, a gravidade empurrasse a peça de trás para a posição inicial.

Figura 52 - Prototipagem em escala reduzida com braço robótico UR



Fonte: arquivo do autor.

Após prender a peça no efetuador, a programação do robô incluía, antes do posicionamento da mesma em seu local final, uma rotina de colagem. O braço levava o elemento da maquete até um ponto pré-definido no seu espaço de coordenadas — uma esponja embebida com cola branca — e pressionava a peça contra a mesma, de forma que uma certa quantidade de adesivo fosse depositada na parte inferior do pequeno tijolo. Com isso, garantia-se a fixação de cada parte do modelo.

Depois da apresentação de todos os trabalhos dos participantes, foi eleita pelo grupo uma das propostas de modelo que se apresentava mais interessante do ponto de vista plástico e de viabilidade construtiva, para que o mesmo pudesse ser fabricado pelo robô industrial na fábrica da Keller Ziegeleien AG.

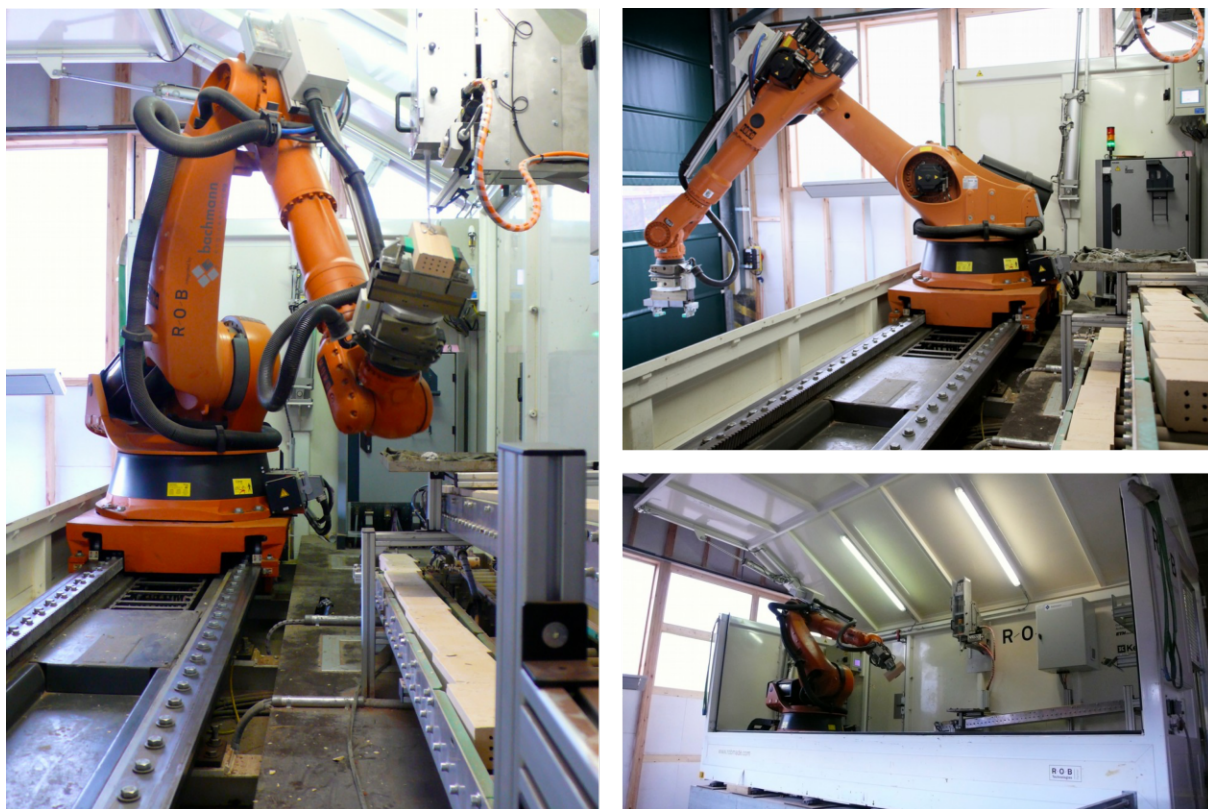
⁷³Efetuator ou end-effector, em inglês, é a palavra utilizada para a descrever a ferramenta presa ao último eixo, ou punho, do robô.

⁷⁴Vácuo produzido através de um tubo de Venturi, com o uso de ar comprimido.

O processo de exportação dos arquivos digitais para a fabricação é feito automaticamente pelo programa, na forma de um arquivo de texto simples contendo as coordenadas posição e deslocamento de cada peça e a sua posição final na parede. A partir desse ponto é feita a tradução desse arquivo para a linguagem de programação proprietária dos braços robóticos industriais Kuka⁷⁵.

A unidade de fabricação é composta por um robô industrial Kuka de 6 DOF, instalado sobre um trilho linear, o que lhe confere um sétimo grau de mobilidade e com um efetuator do tipo garra pneumática. Além do robô, a unidade conta com um dispositivo dispensador de adesivo epóxi, utilizado para a união das peças cerâmicas e uma esteira de roletes inclinada, por onde os tijolos movem-se com a ajuda da ação da gravidade até chegarem a sua posição final, ao alcance da garra.

Figura 53 - Unidade de fabricação robótica móvel (Keller AG)

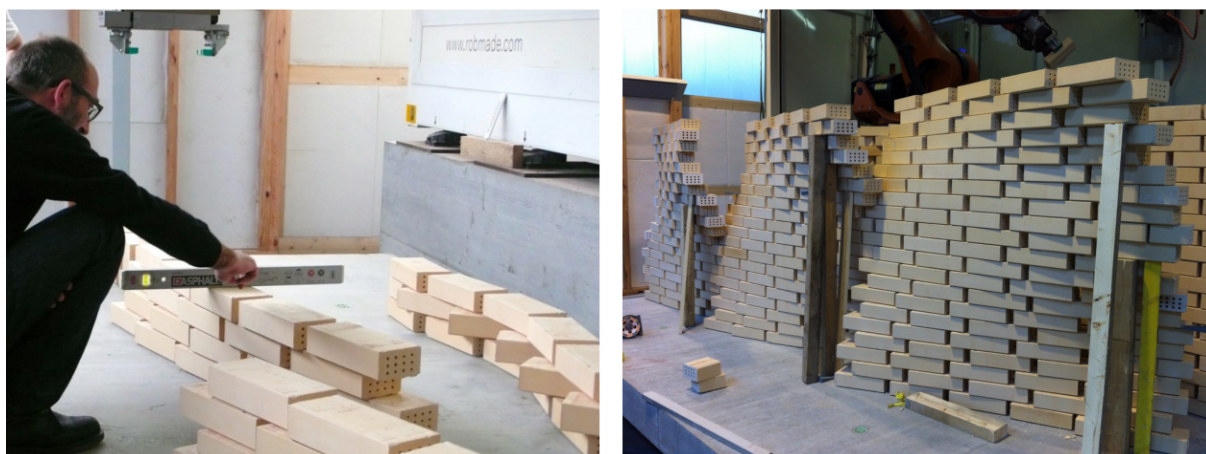


Fonte: Arquivo do autor

⁷⁵Ao final do processo de exportação, era gerado um arquivo com a extensão KRL, ou Kuka Robot Language, formato proprietário específico para o comando de braços robóticos deste fabricante (Kuka).

Os tijolos cerâmicos são dispostos um a um, com extrema precisão (tolerância aproximada de 0,5mm), no local determinado pelo programa de desenho. Após completar cada fiada de tijolos, o robô executa uma rotina de conferência da posição de cada uma das peças, realizando uma varredura e leitura de dados com um sensor laser posicionado junto ao seu punho. Isso tem o intuito de evitar a deposição de uma nova camada de tijolos sobre alguma imperfeição, o que ocasionaria a ruína de todo o trabalho dali em diante. Caso o programa note alguma peça fora da posição programada, o robô para até que o erro seja corrigido manualmente e nova conferência executada.

Figura 54 - Checagem e finalização de parede fabricada pelo robô



Fonte: Arquivo do autor.

O processo de execução do painel de tijolos selecionado — que possuía cerca de 12,0m² — levou cerca de oito horas para ser concluído. Esse tempo relativamente longo se deveu ao fato de que o modelo escolhido possuía elementos com grandes amplitudes de rotação e vãos que nunca haviam sido experimentados anteriormente pelos arquitetos ou pelo fabricante. Isso causou uma série de atrasos para a conferência do prumo entre as fiadas de tijolos e a necessidade de criação de elementos de escoramento, de forma a assegurar a finalização dos trabalhos.

4.3 Constatações

A entrevista com o Prof. Carlos Balaguer e a participação no curso *Brick Design* em Zurique foram determinantes na geração dos principais questionamentos

que nortearam essa pesquisa em direção ao seu caráter empírico-experimental. Os problemas enfrentados por Balaguer já estariam superados pelo atual estágio de desenvolvimento das tecnologias de fabricação digital robótica? Os trabalhos realizados com os robôs industriais na ETH seriam reproduzíveis no contexto acadêmico e industrial nacional?

Muitos dos desafios encarados por Balaguer, tais como o custo dos equipamentos e a disponibilidade de programas de computador capazes de fazer a integração entre CAD e CAM, já foram superados. Como já explicitado anteriormente, o custo de um robô industrial caiu mais de seis vezes no último quarto de século e hoje o uso de programas de CAD e modelagem tridimensional é ubíquo entre arquitetos. Entretanto, segundo as palavras do próprio professor ao comentar com o pesquisador o artigo "*Automatic Robot Path Planning for a GRC Spraying Cell*" (BALAGUER et al., 1994), a criação dos algoritmos de movimentação do robô que definiam a sua trajetória e a projeção do GRC sobre o painel foi o principal e mais difícil problema enfrentado. Todos os cálculos foram realizados e programados pela própria equipe de pesquisadores, uma vez que não existia nenhuma solução de integração entre CAD e CAM de prateleira, pronta para ser usada no sistema. Todos os movimentos do robô eram previstos pelo algoritmo, de forma a respeitar os parâmetros pré determinados (distâncias, angulações e caminhos) e evitar colisões, singularidades e outras situações desfavoráveis, como a tração excessiva do *roving* de fibra de vidro. Esse processamento prévio (*inverse kinematics*) era todo realizado de forma puramente matemática, sem o auxílio de ferramentas gráficas de simulação, e demandava um grande poder de processamento dos computadores e de muitas horas de programação de código pelos engenheiros da equipe.

Além disso, os resultados do trabalho desenvolvido durante a participação na oficina *Brick Design* permitiram ao pesquisador vivenciar na prática o princípio do "*file-to-factory*". Não houve, durante todo processo, a necessidade de geração de representações gráficas em papel, ou documentos com informações específicas necessárias para a construção do objeto projetado. Toda a informação foi transmitida de forma digital, do início ao fim. O mesmo arquivo gerado durante a concepção da forma por meio de programas de modelagem tridimensional foi utilizado para as

etapas de prototipagem, iterações, validação, configuração dos parâmetros de fabricação e, finalmente, a manufatura final pelo braço robótico.

Embora o uso de braços robóticos industriais no ensino de arquitetura e design nas universidades brasileiras ainda não seja comum, o País possui um mercado relativamente avançado nessa área (se comparado com os demais países do hemisfério Sul). Em virtude do grande número de montadoras de automóveis presentes no Brasil, contamos com a presença local dos principais fabricantes de robôs, o que facilitaria a aquisição desses equipamentos pelas Instituições. Ao propor a realização de um experimento prático com o uso de robôs industriais voltado para arquitetura e feito por arquitetos, essa tese também explora as reais possibilidades e problemas enfrentados por um trabalho desse tipo dentro do contexto local, que é muito diferente dos países e instituições que já realizam pesquisas nessa área.

4.4 Prova de conceito

Frequentemente, durante o desenvolvimento de um novo processo ou produto, os termos “prova de conceito” (PoC)⁷⁶ e “protótipo” são utilizados como sinônimos, apesar de ambos possuírem diferentes significados. Não existe uma definição precisa acerca do conceito de protótipo, apesar da vasta literatura produzida acerca do tema, mas alguns autores propuseram modelos para tentar organizar o processo de prototipagem, suas diferentes etapas e características.

Segundo Exner (EXNER et al., 2016) um protótipo representaria as diferentes dimensões de um produto ou processo, dependendo dos objetivos, tamanho e da fidelidade pretendidas pelos diferentes atores envolvidos no seu desenvolvimento.

Tabela 8 - Tipos diferentes de protótipos dentro de um processo de criação

Dimensão	Descrição
Estudo de forma	Protótipos formais são utilizados na tomada de decisões relativas ao aspecto visual dos produtos ou de sua aparência final.
Estudo de material	Para garantir a melhor aparência e sensação do produto, é necessário comparar protótipos executados com diferentes materiais, como um aspecto fundamental na tomada de decisões do processo de desenvolvimento.
Prova de conceito	Protótipos do tipo Prova de Conceito esclarecem questões fundamentais acerca da factibilidade de determinados conceitos, ex. O uso de uma nova tecnologia.
Prova de princípio	Uma prova de princípio fornece evidências sobre a adaptação de princípios existentes aplicados à novos contextos. Por exemplo a transferência de um princípio biológico para um mecânico

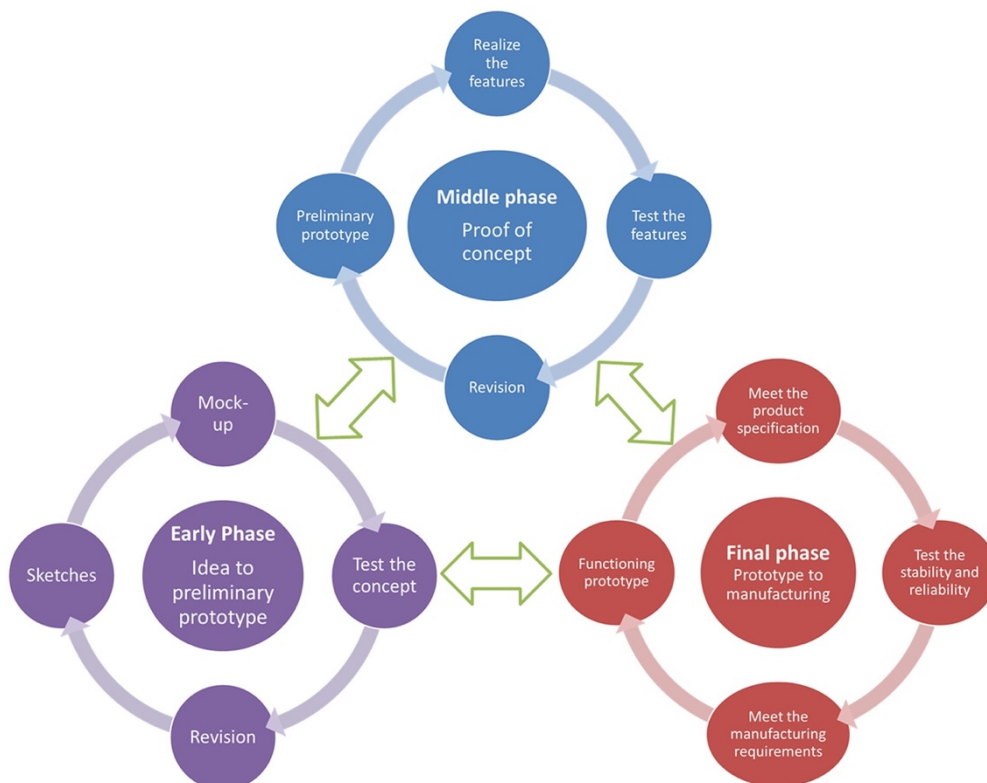
⁷⁶ Do termo em inglês *Proof of Concept*.

Prova de processo	Prova de processos são essenciais no desenvolvimento de serviços, para testar seus procedimentos e identificar todas as suas correlações.
Prova de função	Em momentos chave do desenvolvimento, o protótipo tem que demonstrar se funções ou requerimentos específicos são atendidos.

Fonte: (EXNER et al., 2016)

Em uma definição mais precisa, a PoC é um tipo de protótipo, ou uma etapa do processo de prototipagem, feita para testar certos aspectos do produto ou processo intencionado sem necessariamente simular as suas características finais de aparência, escolha de materiais ou processo de fabricação (CHARTIER; BADEV, 2013). Dentro do processo de prototipagem de um produto, a prova de conceito encontra-se em uma fase intermediária, e possui a função de testar determinadas características ou funcionalidades de maneira prática e já com algum nível de conexão com a realidade do produto projetado (YU; PASINELLI; BREM, 2018).

Figura 55 - Fases do processo de desenvolvimento de um protótipo



Fonte: (YU; PASINELLI; BREM, 2018)

No caso da produção de painéis de GRC utilizando a fabricação robótica, seria possível afirmar que o trabalho realizado pela equipe do Prof. Carlos Balaguer já demonstrou que a ideia é factível, efetivando inclusive as etapas finais de um processo de prototipagem, que envolvem a sua manufatura em escala real.

Entretanto, os objetivos desse trabalho vão além de provar que é possível fabricar peças pré-moldadas por meio da produção robotizada. Em consonância com a proposição apresentada anteriormente, a realização do experimento exploratório intenciona provar que a produção de painéis com geometrias complexas é factível por meio do uso de programas e ferramentas acessíveis — que hoje estão disponíveis aos arquitetos — e que não requer soluções de programação caras e customizadas, desenvolvidas exclusivamente para determinada tarefa.

Por esse motivo, o foco principal da etapa empírica está na exploração e caracterização desse novo processo de fabricação por meio de uma prova de conceito, e não na realização de um protótipo final, como já realizado por Balaguer, indo além da simples transposição de um processo analógico-artesanal de manufatura por seu equivalente digital⁷⁷.

⁷⁷ O que por si já traria grandes ganhos de qualidade no produto final e no ambiente de trabalho das fabricas de GRC.

5 ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE A FABRICAÇÃO ROBOTIZADA COM GRC

O experimento empírico planejado consiste em executar um protótipo do tipo prova de conceito de um elemento laminar (painel) pré-fabricado em GRC, cuja forma complexa é materializada por meio da fabricação digital com braços robóticos industriais. O objetivo da PoC — diferentemente de um protótipo funcional ou final, que seria utilizado para testar a aparência ou desempenho mecânico/estrutural da peça —, é explorar de forma sistematizada o processo de fabricação do objeto, incluindo as suas funcionalidades, potencialidades e limites impostos pelas ferramentas, além de testar, na prática, o paradigma do *continuum* digital e dos processos *file-to-factory*, onde o arquiteto pode exercer um papel de liderança durante as etapas de materialização de suas ideias.

Conforme apresentado no capítulo anterior, a escolha do material de construção dos moldes é uma das principais questões a serem definidas quando se trabalha com a manufatura digital de elementos pré-fabricados cujas formas possuem um baixo grau de repetição. Não é viável, sob o ponto de vista econômico e ambiental, utilizar os materiais tradicionalmente utilizados na confecção das fôrmas, como o metal ou a madeira, devido ao seu alto custo e aos impactos ambientais causados pela sua produção.

Com base nesse fato, diferentes materiais e processos vem sendo pesquisados dentro do campo da fabricação de elementos pré-fabricados com geometrias complexas na arquitetura contemporânea, tais como: fôrmas em cera fresadas roboticamente (ANDERSEN; THRANE; LEAL DA SILVA, 2016; WILLIAMS et al., 2011), polímeros aliados a manufatura aditiva (CASTAÑEDA et al., 2015; CASTAÑEDA VERGARA et al., 2018), moldes digitais adaptativos (BORG COSTANZI et al., 2018; COSTANZI, 2016; HENRIKSEN, 2017; NERELLA et al., 2016; RAUN C., 2015; SCHIPPER, 2015; WANGLER et al., 2016), a utilização de moldes em EPS obtidos por meio da sua usinagem (BRELL-ÇOKCAN et al., 2009; BRELL-ÇOKCAN; BRAUMANN, 2010, 2011) e, por fim, o processo que foi o escolhido para o experimento dessa tese, os moldes em EPS cortados a fio quente, que são embasados nos trabalhos de Brooks (BROOKS, 2009), Feringa e Sondergaard (FERINGA; SONDERGAARD, 2012), Martins, Sousa e Campos (MARTINS et al.,

2015), Petkov e Hattel (PETKOV; HATTEL, 2017) e Karmakar (KARMAKAR; SUBBIAH, 2018).

Não existe na literatura pesquisada um método ou procedimento específico preestabelecido para a realização desse tipo de experimento acerca da fabricação robótica com GRC, logo, o pesquisador adotou a aproximação que lhe pareceu mais adequada para desenvolver o estudo exploratório. O trabalho foi dividido em três etapas distintas. A primeira parte envolve a criação de um painel liso de superfície regradada, sem o uso de abas ou reentrâncias. Essa aproximação nos permite produzir o seu molde em EPS por meio de corte robotizado a fio quente (Robotic Hot Wire Cutting, ou RHWC), utilizando o end-effector existente no laboratório.

A segunda parte do experimento é destinada a simulação da projeção automatizada do GRC sobre o referido molde utilizando o braço robótico industrial. A terceira e última etapa foi direcionada a realizar simulações computacionais para o corte das fôrmas e projeção de GRC em dois novos tipos de painéis, com geometrias mais complexas, como forma de expandir o conhecimento sobre o processo de produção, mesmo sem a realização de ensaios físicos. As etapas principais foram divididas em fases distintas, como é possível observar na sequência descrita abaixo:

Tabela 9 - Etapas e sub-etapas do experimento

Etapas do experimento	
Etapa 1 – Criação da superfície	
1.1	Criação da superfície regradada por meio da modelagem digital
1.2	Projeto da fôrma em EPS
1.3	Corte robotizado e montagem da fôrma em EPS
Etapa 2 - Projeção	
2.1	Definição das restrições e parâmetros para a projeção;
2.2	Definição dos caminhos para a simulação da projeção do GRC sobre a forma em EPS
2.3	Simulação da projeção (spray-up) do GRC
Etapa 3 — Simulações alternativas em ambiente virtual	
3.1	Criação de superfícies por meio da modelagem digital;
3.2	Projeto da fôrma em EPS;
3.3	Simulação de construção da fôrma por processo de fresagem;
3.4	Simulação da projeção do GRC

5.1 Descrição dos materiais e ferramentas utilizados

Antes de adentrarmos na execução do experimento, convém descrever com mais precisão os materiais e as ferramentas utilizados no seu decorrer, separados em três sub-tópicos distintos: materiais, ferramentas de programação (software) e equipamentos (*hardware*).

Materiais

- a. Blocos de poliestireno expandido, densidades 10 a 38 kg/m³, Isorecort;

Tabela 10 - Densidades das amostras de EPS

Sigla	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F
Densidade (kg/m ³)	10	12	15	19	23	28	32	38

- b. Resina acrílica a base de água 180W, viscosidade (25°C) 5.000-10.000 cP, Redelease;

Software

Software modelagem digital (CAD)

- c. Rhinoceros 3D para Windows versão 5.14.1 (educacional), McNeel Associates;
d. Grasshopper 3D versão 0.9.8378, McNeel Associates;

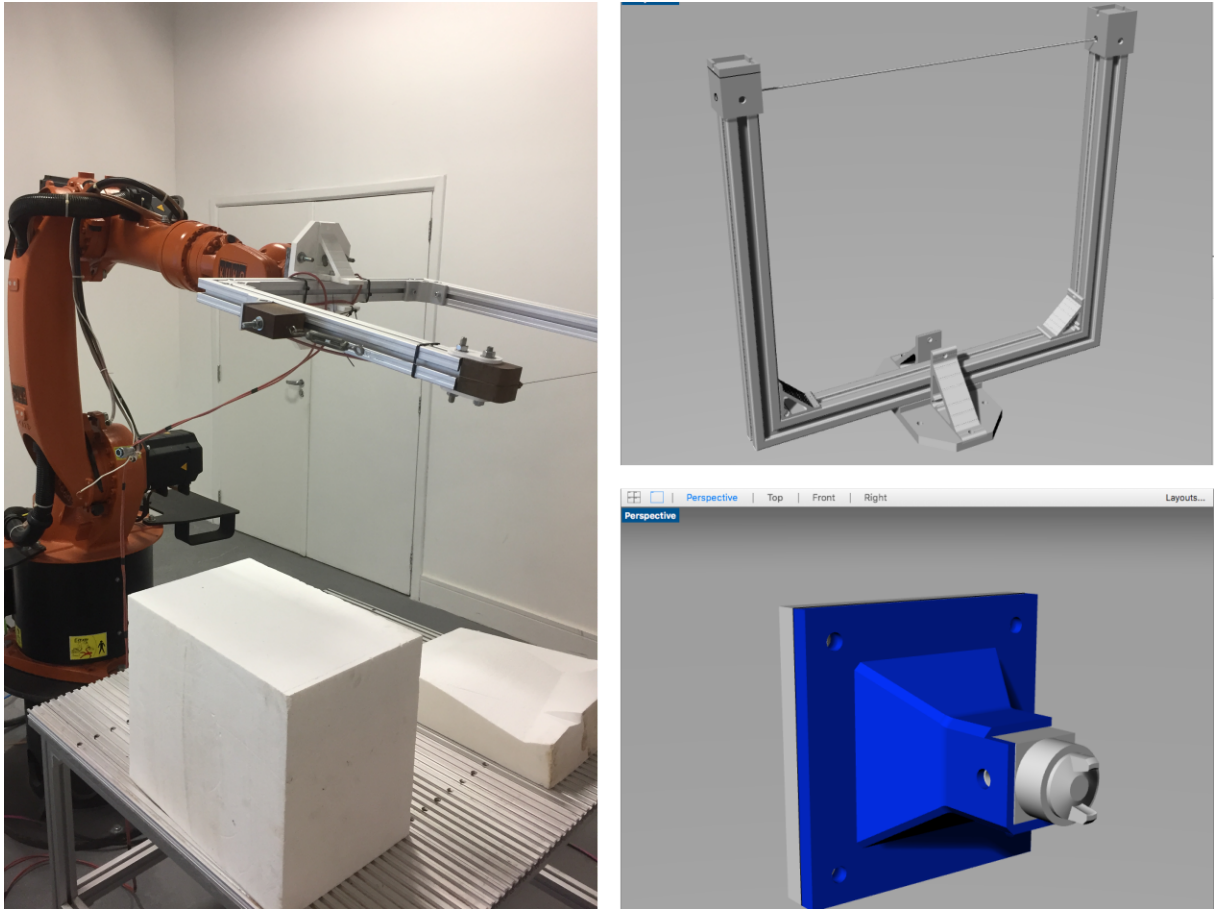
Software manufatura digital (CAM)

- e. Kuka PRC Parametric Robot Control v3 update 20191122 (versão completa disponibilizada para membros da Association for Robots in Architecture);

Hardware

- f. Braço robótico modelo KR16-2, controladora KR C4 equipada com SmartPad, Kuka Roboter GMBH;
g. Cortadora de EPS a fio quente de NiCr (Nichrotal 70®) ø0,15mm, fabricação própria nos laboratórios da PUC-RJ;
h. Suporte para pistola automática, modelado pelo autor e fabricado por meio de impressão 3D FDM no laboratório da PUC-RJ;

Figura 56 - Hardware utilizado no aparato experimental



No sentido horário os itens F, G e H. Fonte: arquivo do autor.

- i. Linha de ar comprimido (4,0 bar);
- j. Mangueiras e conexões pneumáticas, Eurotechniker;
- k. Tanque de pressão PT-2, Eurotechniker;
- l. Pistola automática ar direto modelo A100, LVLP1,5mm, Eurotechniker;
- m. Paquímetro digital 150mm, modelo100.174BL, Digimess
- n. Régua de aço 100cm.

Todos os ensaios com o robô industrial realizados nesse experimento, foram feitos no laboratório de fabricação digital da Faculdade de Arquitetura da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), com o inestimável auxílio da Profa. Verônica Natividade e de seus alunos da graduação.

5.2 Etapa 1 — Molde

Conforme descrito acima, a primeira etapa do experimento consiste na criação de um molde em EPS para posterior simulação da projeção do GRC. Essa fase é dividida em sub-etapas, conforme apresentado a seguir.

5.2.1 Criação da superfície regradada por meio da modelagem digital

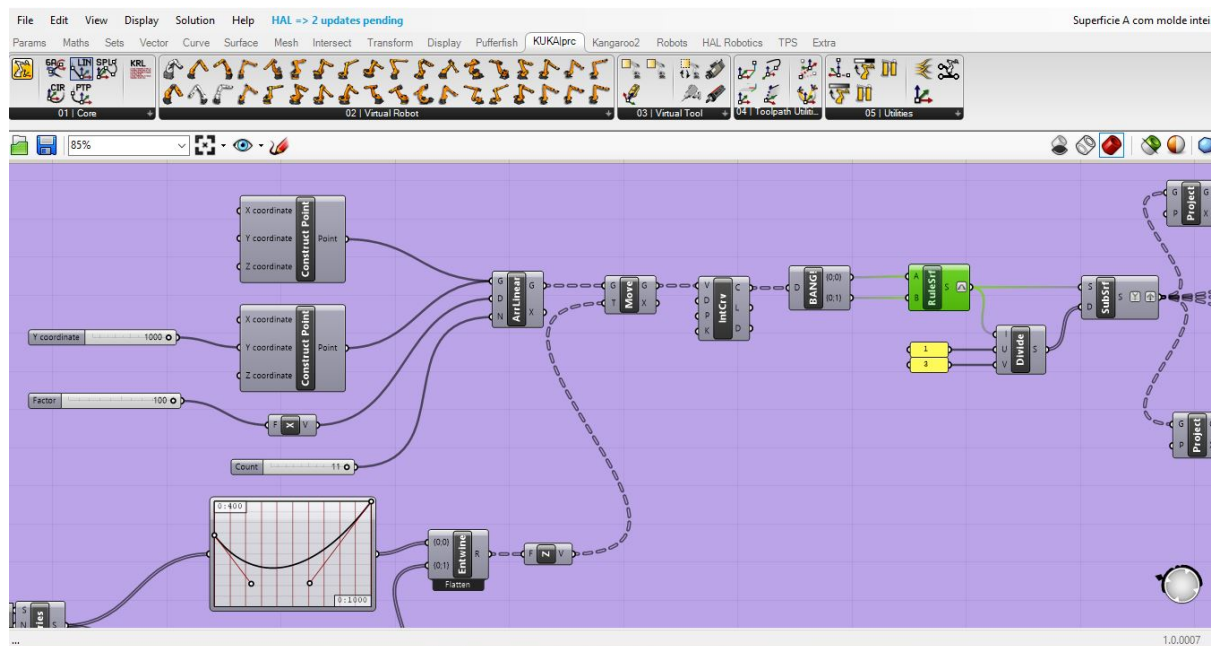
O objeto desse experimento — painéis esbeltos pré-fabricados em GRC — representa um pequeno recorte dentro da complexidade inerente à concepção de um objeto em escala arquitetônica, como um edifício, por exemplo. Ainda assim, mesmo restritos por essa amostra, foi possível verificar como o continuum digital, conceito apresentado anteriormente nessa tese, afeta o processo projetual do arquiteto.

É notável a compressão do espaço existente entre a criação e a construção de um objeto com o uso das tecnologias digitais.

Para dar início a criação da superfície regradada do painel foi preciso levar em consideração, desde o primeiro momento, todas as ferramentas e materiais disponíveis e seus parâmetros de construção e desempenho desejados. O arquiteto ou designer digital, mesmo que não seja o responsável pela construção física de sua obra, deve criar tendo em mente não só a forma, mas sua materialidade.

Partindo dessa constatação, definiu-se que o primeiro painel (tipo A) do experimento teria as dimensões limitadas pelo tamanho do bloco de EPS disponível para a construção de sua fôrma, o que no caso representou 100 x 100 centímetros. A espessura do painel não teria influência no experimento concebido, mas, para fins de visualização, estabeleceu-se o valor de 15mm, que seria algo normal em um painel construído com essas dimensões.

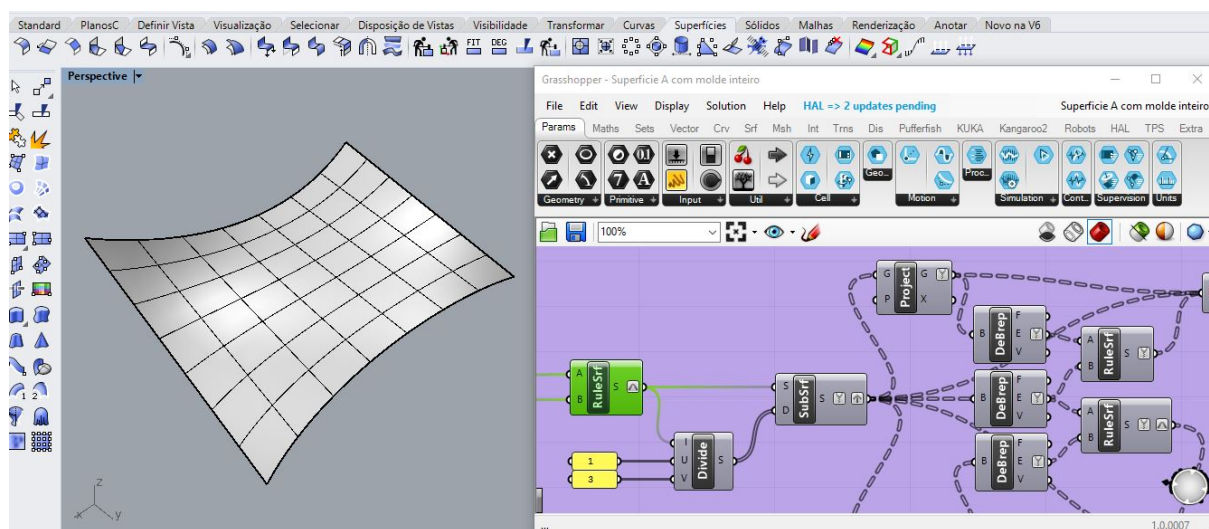
Para a definição da superfície regradada optou-se por criar um algoritmo utilizando o programa Grasshopper, tornando sua geometria parametrizável e, conseqüentemente, facilmente adaptável a qualquer mudança que se fizesse necessária durante a etapa de prototipagem.



O fluxo contínuo e bidirecional de informações entre as etapas de projeto e construção é uma das características da fabricação digital. Protótipos (físicos ou virtuais) realizados de forma barata e rápida nos trazem dados sobre potenciais problemas ou potencialidades não percebidas durante a concepção, que retroalimentam o projeto antes de sua construção final. Isso permite ao criador fazer alterações ou gerar alternativas em um curto período de tempo, trazendo melhorias formais e de performance ao objeto. Em um processo linear e tradicional, essas necessidades só seriam percebidas ao final da construção, quando seria impossível ou economicamente muito desfavorável enfrentá-las.

Por esse motivo, o uso de lógicas paramétricas é vantajoso. Ao criarmos um algoritmo, ou um sistema de instruções encadeadas de forma a gerar uma determinada geometria, ao invés de modelar diretamente o objeto por meio de seus elementos geométricos (pontos, linhas, superfícies e sólidos), conseguimos realizar essas alterações e alternativas no projeto de forma quase instantânea.

Figura 58 – Modelo tridimensional superfície A

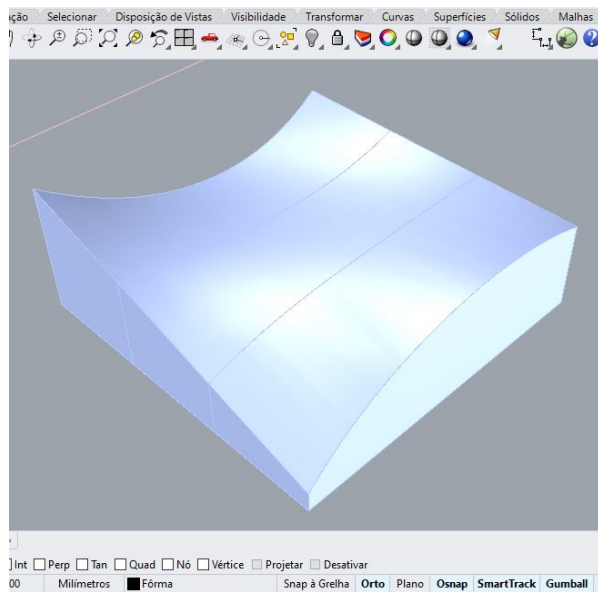


Fonte: Dados do autor.

5.2.2 Projeto da fôrma em EPS

O desenho do molde é extraído da própria geometria do painel, ao projetarmos a sua superfície no bloco de EPS original. No painel simples, a sua face externa é idêntica à face da fôrma onde será realizada a projeção. Após a definição da geometria do molde, foi necessário dividir manualmente a peça em três partes iguais, em virtude do tamanho da ferramenta de corte a fio quente existente no laboratório, que possui uma largura útil de 400 milímetros. Essa operação seria desnecessária caso houvesse um robô com maior capacidade de carga, que suportasse uma ferramenta com maiores dimensões. Empresas europeias especializadas no corte robotizado a fio quente são capazes de trabalhar com blocos inteiros de EPS, com até 4 metros de comprimento.

Figura 59 - Modelo do molde em EPS (superfície A)

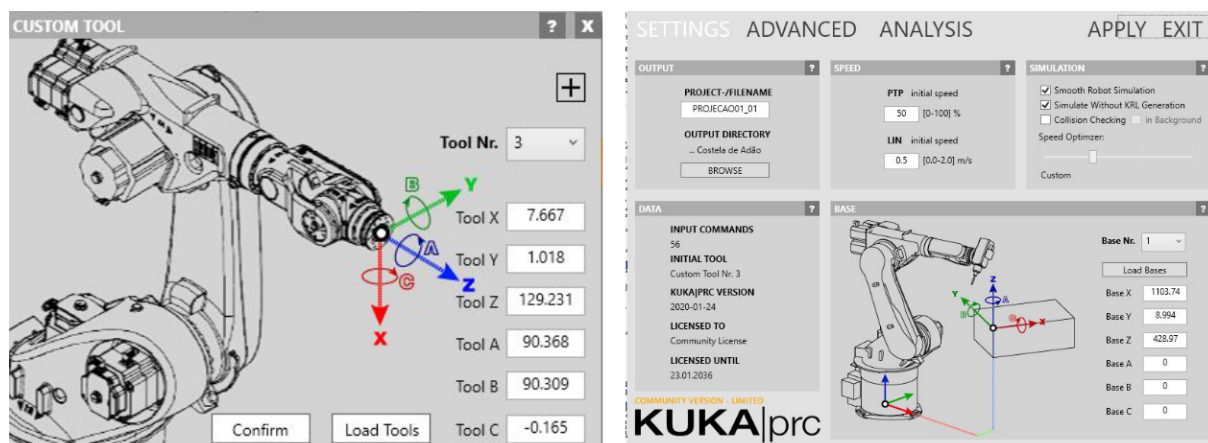


Fonte: Projeto do autor

5.2.3 Corte robotizado e montagem da forma em EPS

A partir do modelo digital da superfície regrada e do projeto do seu molde em EPS, é possível iniciar a fase de corte utilizando o braço robótico. Para tal, a primeira providencia é executar as rotinas de configuração e calibração iniciais do robô, dentro do plugin Kuka|PRC. Como os braços robóticos são ferramentas flexíveis que podem executar diferentes tarefas (o que será o caso estudado nessa tese), cada vez que o seu end-effector é trocado, faz-se necessária a realização de nova calibração, que é dividida em duas etapas. A primeira é a localização do TCP (Tool Center Point, ou Ponto Central da Ferramenta), que é o ponto de referência principal utilizado pelo robô para a definição de todos os seus movimentos programados. Erros, mesmo que pequenos, na calibração no TCP, levam a inconsistências nas peças fabricadas.

Figura 60 - Rotina de calibração do robô no Kuka|prc



Fonte: Dados do autor.

A segunda etapa é a definição da orientação do sistema de coordenadas XYZABC do robô, de forma que a mesma coincida com a orientação das coordenadas cartesianas utilizadas pelo programa utilizado na concepção dos modelos digitais (Fig. 57 esquerda).

Ensaio iniciais com o EPS

Os blocos de EPS encontrados comumente no mercado da construção civil possuem diferentes densidades, cada uma adequada ao seu uso final. Em princípio, adotou-se o critério de utilizar o material com maior densidade possível, pois o mesmo seria mais adequado para a utilização como formas, devido a sua maior resistência mecânica aos esforços de compressão oriundos da projeção do GRC.

Entretanto, no processo de corte a fio quente, a densidade do material é apenas uma das variáveis a serem analisadas para estabelecermos os parâmetros ótimos de configuração dos equipamentos, tendo em vista a obtenção de um corte de maior qualidade no menor tempo possível. Além da escolha do material, os principais fatores determinantes para o resultado do processo são a velocidade do corte, (feed rate), a temperatura inicial e a espessura do fio de NiCromo utilizado.

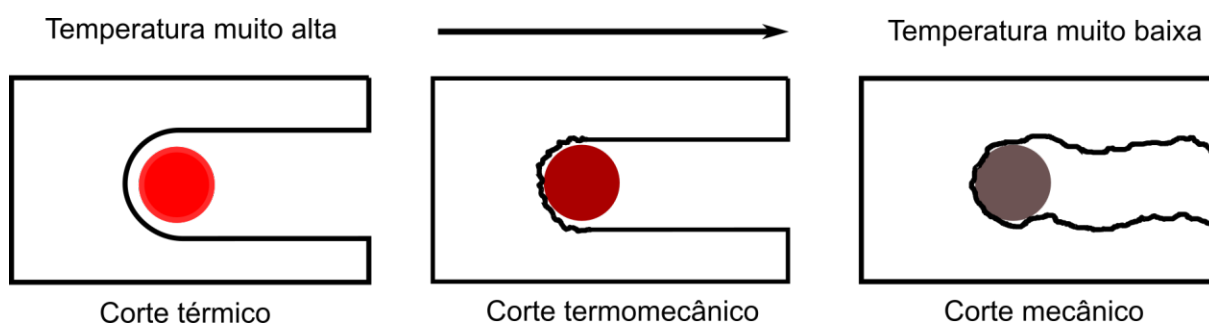
Uma vez que o objetivo do experimento é realizar uma prova de conceito, não cabe nessa etapa um estudo detalhado sobre cada uma dessas variáveis. Entretanto, a partir dos extensos trabalhos realizados por Brooks e Karmakar (BROOKS, 2009; KARMAKAR; SUBBIAH, 2018) e das limitações impostas pelos materiais e

equipamentos disponíveis, definiu-se que seria importante realizar um ensaio expedito para determinar de maneira simples qual a densidade mais apropriadas e os melhores parâmetros de corte a serem utilizados para a confecção de formas em EPS para projeção de GRC.

Entre as quatro variáveis mais importantes no processo de corte a fio quente, que determinam a qualidade final da peça (densidade do EPS, velocidade do corte, temperatura do fio, espessura do fio), temos a possibilidade de intervir em apenas duas: a densidade do material e a velocidade de corte. Nesse primeiro ensaio expedito, a temperatura do corte não é passível de alteração, uma vez que a fonte transformadora utilizada inicialmente para a geração da corrente elétrica aplicada ao fio (que por sua vez gera o aquecimento do mesmo) não é variável e tem sua voltagem de entrada e saída fixas em 110V e 12V, respectivamente. A espessura do fio é determinada em 0,15mm, uma vez que esse foi o único material disponibilizado para o ensaio.

Com base nas informações disponibilizadas pelo fabricante do EPS e na literatura pesquisada (BROOKS, 2009; KARMAKAR; SUBBIAH, 2018), a temperatura ideal para corte a fio quente desse tipo de material é de aproximadamente 300°C. Um dos parâmetros que determina se a temperatura de corte encontra-se na faixa ideal, é o fato de que o EPS deve ser cortado sem exercer um esforço excessivo de tensão no fio. Segundo Brooks (BROOKS, 2009), o corte de EPS a fio quente pode ocorrer de três formas básicas, conforme a temperatura do fio, explicitadas na figura abaixo:

Figura 61 - Efeitos da variação de temperatura no fio durante o corte do EPS



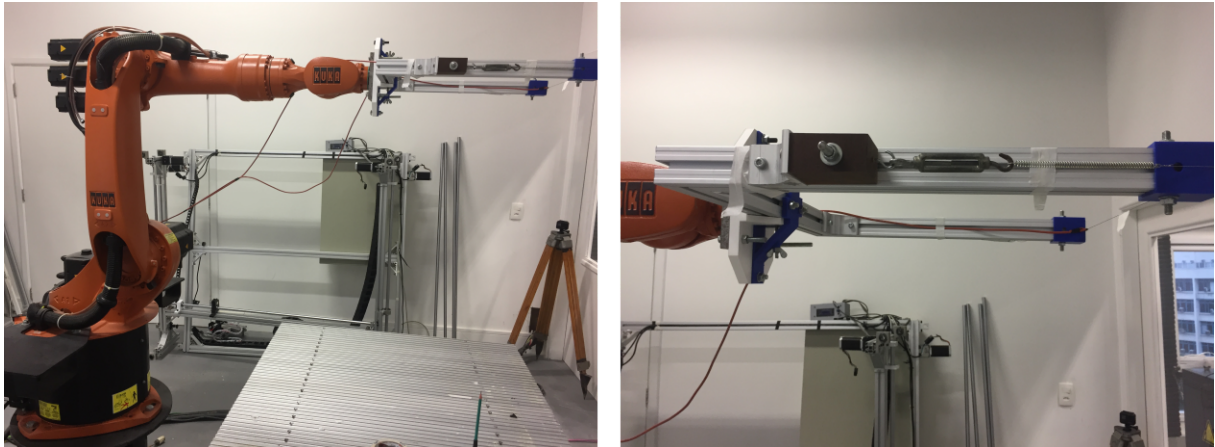
Fonte: Desenho do autor (adaptado de (KARMAKAR; SUBBIAH, 2018).

Se a temperatura da ferramenta de corte encontra-se acima do nível ideal, ocorre o que se denomina de corte térmico (thermal cutting), onde a energia excessiva faz com que o material se vaporize ou derreta antes do contato do fio, causando um aumento da espessura do corte (kerf width), o que leva a um aumento nas tolerâncias dimensionais da peça. No outro extremo, quando a temperatura encontra-se abaixo da ideal, ocorre o corte mecânico, quando o material é seccionado devido a temperatura somada ao contato do fio com a peça, o que causa um aumento na tensão exercida sobre a ferramenta (o que pode causar a sua ruptura) além de efeitos indesejados na superfície de corte, como o aparecimento de ondulações e imperfeições, pois parte do material é removida pela abrasão ou atrito, e não pela sua vaporização. Por fim, quando a temperatura do fio se encontra na faixa ideal (em torno de 300°C), o corte ocorre de forma termomecânica, sem o prejuízo nas tolerâncias dimensionais ou no acabamento superficial da peça.

Para o início da realização dos cortes o aparato experimental foi montado com a fixação do efetuador de corte a fio quente no braço robótico e sua posterior calibração. Ao fio de nicromo foram fixados dois condutores de cobre, com secção nominal de 4mm², um em cada extremidade da ferramenta. Os condutores, por sua vez, foram conectados à fonte transformadora de 24V, responsável por gerar a tensão necessária para o aquecimento do fio. O acionamento da fonte foi feito de forma direta à rede elétrica do laboratório, sem conexão com as portas lógicas do robô. Embora seja perfeitamente possível acionar equipamentos externos ao robô por meio de sua própria programação, isso não foi realizado no experimento para a etapa de corte a fio quente⁷⁸.

⁷⁸ O acionamento de um equipamento externo ao robô por meio da programação de suas portas lógicas foi realizado na etapa de simulação da projeção do GRC, com o acionamento de uma válvula solenóide pneumática, conectada ao compressor de ar, que controlava o fluxo da pistola de projeção.

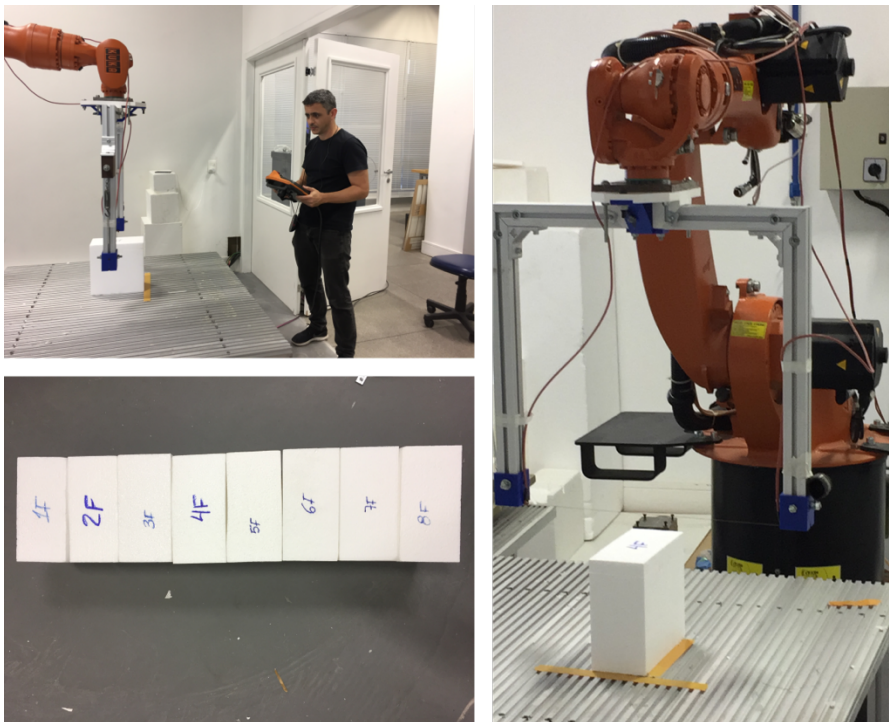
Figura 62 - *End-effector* cortador de EPS a fio quente (PUC-RJ)



Fonte: Arquivo do autor.

Um primeiro ensaio foi realizado sem a aferição da temperatura real do fio utilizado, em virtude da ausência de um equipamento de medição, que ainda se encontrava em processo de aquisição. Oito amostras de EPS com densidades diferentes foram submetidas ao corte em velocidades distintas, com o intuito de descobrir, ainda que de forma visual, qual a melhor relação entre a densidade do material e a velocidade de corte, dadas as condições do experimento no dia.

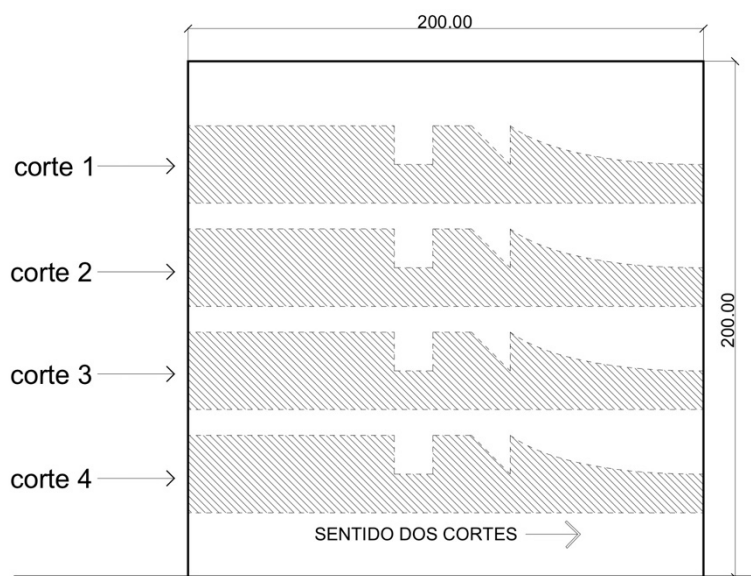
Figura 63 - Cortes robotizados no laboratório da PUC-RJ



Fonte: Arquivo do autor.

Definiu-se o desenho de um perfil de corte que pudesse representar as diferentes condições geométricas que seriam encontradas durante o corte das fôrmas definitivas: segmentos de retas, curvas, ângulos agudos e obtusos. Cada amostra possui as dimensões de 200mm x 100mm x 100mm (C x L x A).

Figura 64 - Perfis de corte para amostras de EPS



Fonte: Desenho do autor.

Para cada uma das amostras com diferentes densidades foram realizados quatro cortes, em velocidades que variaram de 5mm/s a 45mm/s, conforme o diagrama abaixo. As velocidades previstas foram baseadas nas médias encontradas na literatura (BROOKS, 2009) e em experimentos preliminares realizados pela Profa. Ms. Verônica Natividade em uma oficina com os alunos da PUC-RJ ocorrido em 2018.

Tabela 11 - Velocidades de corte do EPS para testes das amostras

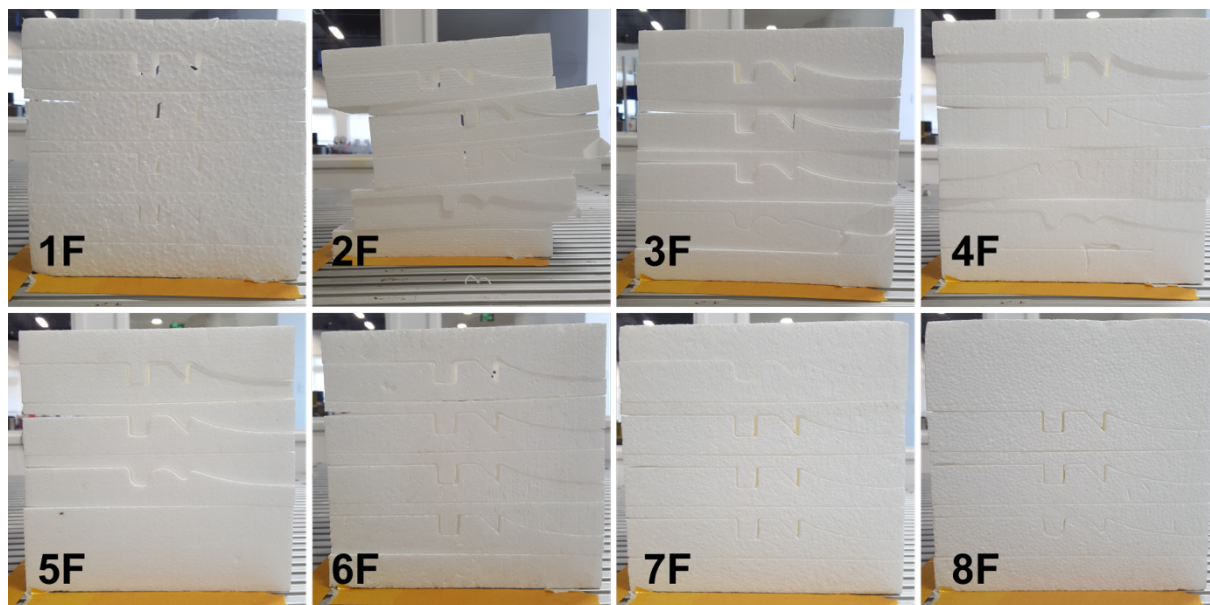
	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F
corte 1	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	13 ³	5
corte 2	15	15	15	15	15	15	5	7
corte 3	30	30	20	20	20	20	7	9
corte 4	45	45 ¹	25	25	25 ²	—	9	—

1 e 2: cortes com velocidades elevadas, onde ocorreu a ruptura do fio pelo excesso de tensão.

Fonte: Autor.

As imagens abaixo apresentam os resultados obtidos nesse primeiro teste.

Figura 65 - Resultados testes cortes EPS com diferentes densidades



Fonte: Arquivo do autor.

Os resultados indicaram que a temperatura do fio não estava dentro da faixa ideal, pois observou-se todos os cortes ocorreram de forma mecânica, mesmo a baixas velocidades. A experimentação com velocidades mais elevadas acarretou erros e distorções significativas que impediriam a realização do corte das fôrmas finais.

Utilizando os dados disponibilizados ao pesquisador pelo Prof. Dr. Hadley Brooks, autor da principal pesquisa utilizada como referência nessa etapa (BROOKS, 2009), foi possível aferir que o corte só poderia ocorrer de forma satisfatória, com base nas condições nas quais o experimento foi montado (tensão, amperagem e resistência do fio utilizado), se adotássemos uma velocidade de 3mm/s, o que pode ser considerada extremamente baixa, subutilizando a capacidade da ferramenta. Esse resultado foi obtido segundo a equação abaixo, elaborada por Brooks:

$$F = \frac{I^2 \cdot R}{MQ_{eff} \cdot \rho \cdot \left(\frac{\eta}{1000}\right)}$$

Onde:

F = velocidade de corte (mm/s)

I = corrente (A)

R = resistência (Ω/m)

M_{Qeff} = calor efetivo acrescido ao material (J/kg)

ρ = densidade do material (kg/m^3)

η = kerf width (mm)

Segundo a primeira Lei de Ohm, para definirmos a corrente I do circuito montado para o experimento, basta dividirmos a sua tensão (V) pelo valor da resistência do condutor (Ω). A resistência é obtida por meio da medição direta utilizando-se um multímetro ou, no nosso caso, referindo-se aos dados fornecidos pelo fabricante do fio de Nicromo, onde encontramos o valor de $61,7\Omega/m$ para um fio de $0,15mm\phi$. Lembrando que o comprimento do fio utilizado é de $0,5m$, temos:

$$U = R \cdot I \rightarrow I = \frac{U}{R} \therefore I = \frac{12}{30,86} = 0,39A$$

Voltando para equação principal, temos os seguintes dados:

$$I = 0,39 A$$

$R = 61,7 \Omega/m$ (valores fornecidos pelo fabricante do fio de nicromo)

$M_{qeff} = 297.000 J/kg$ (valores para EPS, segundo dados de Brooks)

$\rho = 19 kg/m^3$ (densidade da amostra F4, que possui valor médio)

$\eta = 0,5 mm$ (kerf estimado para fio de $\phi 0,15mm$, segundo dados de Brooks)

Substituindo os valores na equação, temos:

$$F = \frac{I^2 \cdot R}{M_{Qeff} \cdot \rho \cdot \left(\frac{\eta}{1000}\right)} = \frac{0,39^2 \cdot 61,7}{297000 \cdot 19 \cdot \left(\frac{0,5}{1000}\right)} \therefore F = 0,003 m/s$$

A confirmação matemática desse valor indicou que seria necessário aumentar a quantidade de calor transmitida pela ferramenta de corte ao material, de forma que o corte pudesse ocorrer de forma termomecânica, segundo a melhor prática encontrada na literatura pesquisada. Admitindo o fato que a resistência (R) do aparato (um fio de Nicromo 70 com $\phi 0,15mm$ e $0,5m$ de comprimento) seria mantida, segundo a Lei de Joule sabemos que a potência dissipada em forma de calor por um resistor pode ser calculada pela equação:

$$P = I^2 \cdot R$$

Se, segundo a Lei de Ohm, a resistência de um condutor pode ser encontrada pela divisão da tensão aplicada no circuito (U em Volts) sobre a sua corrente (I em Ampere), temos:

$$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{U}{I} \therefore P = U \cdot I$$

Embora seja possível calcular a quantidade de energia dissipada em forma de calor pelo fio em um determinado período de tempo, a questão que se apresentou ao pesquisador foi: qual a tensão que deve ser aplicada ao circuito de forma a aquecer a ferramenta até a temperatura ideal de 300°C? Embora pareça uma pergunta simples, verificou-se que, para respondê-la com alguma precisão, seria necessário adicionar à equação não só a quantidade de calor gerada pelo fio aquecido, como também a quantidade de calor perdido para o meio (ar e material) antes e durante a operação de corte. Analisando a literatura, percebeu-se que prever a temperatura de um fio de forma precisa é um problema de alta complexidade e que envolveria a modelagem do experimento por meio do método de elementos finitos (FEM), o que não caberia no escopo dessa tese, tampouco no conhecimento atual do pesquisador. Entretanto, na literatura pesquisada ainda não havia descrita uma forma simplificada de cálculo, que fosse capaz de gerar um resultado com precisão suficiente para a tarefa do corte de EPS a fio quente, sem o uso de modelos matemáticos complexos.

A partir desse desafio, o pesquisador procurou calcular matematicamente (sem medição direta) qual seria a temperatura que o fio utilizado no aparato experimental estaria atingindo de fato, segundo as condições atuais. Por meio da utilização de uma ferramenta disponibilizada no site de um revendedor de fio de Nicromo, foi possível aferir que o aparato experimental utilizado estaria alcançando a temperatura aproximada de 160°C, o que validou o fato do corte estar ocorrendo mecanicamente.

Figura 66 - Tabela de configuração dos parâmetros para corte do EPS (Jacobs Online)

JACOBS ONLINE

NICHROME WIRE APPLICATION CALCULATOR

VERSION 2.0

Select what you want to Calculate

☒ Temperature

☐ Length

☐ Gauge (dia)

☐ Volts

Select Volt and Length Range

☒ 0-28 volts

☐ 0-280 volts

☐ 0\" - 350"

☒ 0\" - 35"

☐ 0\" - 3.5"

Current Required (Amps)

0.4322103

POWER REQUIRED (WATTS)

5.2297457

RESISTANCE PER FOOT (OHMS)

17.01

TOTAL RESISTANCE (OHMS)

27.995625

Fonte: Jacobs Online

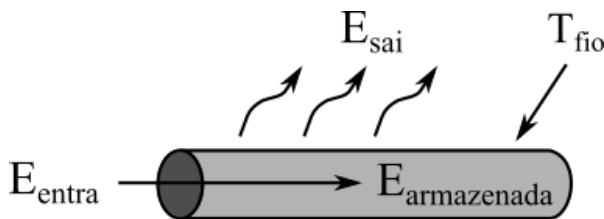
Observa-se que, adicionando os dados existentes (comprimento do fio 50cm, $\varnothing 0,15\text{mm}$ e tensão aplicada de 12V), obtém-se a temperatura máxima de 160°C . Os demais resultados aproximam-se dos utilizados no experimento, tais como: a resistência total ($56,0\ \Omega/\text{m}$ na tabela contra $61,7\ \Omega/\text{m}$ no experimento), a corrente (0,43 A na tabela contra 0,39 A no experimento) e a potência dissipada (5,23W na tabela contra 4,68W no experimento). Embora fosse possível chegar facilmente ao valor da tensão necessária para alcançar os 300°C por meio de tentativa e erro, o pesquisador procurou encontrar meios matemáticos para fazê-lo, de forma a contribuir no campo de pesquisa do corte de EPS a fio quente.

A partir dos trabalhos de Whiteside (WHITESIDE, 2018), desenvolvidos primariamente para o cálculo de temperatura de resistências dentro de válvulas utilizadas em amplificadores de som, foi possível extrapolar o mesmo método para a ferramenta utilizada no experimento, conforme descrito nos parágrafos seguintes.

Todos os cálculos a seguir baseiam-se na Lei Zero da Termodinâmica e no conceito de equilíbrio térmico, que por sua vez é fundamentado no postulado do

Equilíbrio Termodinâmico entre sistemas. De forma simplificada, podemos assumir que a energia que entra em determinado sistema é igual a energia que sai do mesmo sistema. Considerando que os cálculos serão direcionados para encontrar a temperatura de um elemento em forma de fio (secção transversal circular), temos:

Figura 67 - Ilustração equilíbrio térmico



Fonte: (WHITESIDE, 2018)

Observamos que a energia requerida para aquecer o fio (E_{entra}) menos a energia necessária para resfriá-lo (E_{sai}) é igual a energia armazenada no mesmo ($E_{armazenada}$). Uma vez que o sistema encontra seu equilíbrio térmico é possível aferir a temperatura do fio (T_{fio}).

Ampliando-se as definições, temos:

$$E_{entra} - E_{sai} = E_{armazenada}$$

$$E_{entra} = \text{Tensão aplicada ao fio}$$

$$E_{sai} = \text{Condução} + \text{Convecção} + \text{Radiação}$$

$$E_{armazenada} = \text{massa} \cdot C_p \cdot (T_{fio} - T_{ar})$$

A energia necessária para aquecer o fio é igual à potência total aplicada ao mesmo, enquanto a energia de resfriamento é igual ao calor conduzido pelos efeitos da transmissão de calor (condução, convecção e radiação). Devido ao fato de a fixação das extremidades do fio no aparato ocorrer por meio de um contato superficial desprezível com outros elementos (ganchos de fixação), a transmissão de calor por condução será ignorada na equação.

Por fim, a energia armazenada no fio pode ser encontrada pela multiplicação entre a massa do corpo (m), o seu calor específico (C_p) e a diferença de temperatura

entre o fio (T_{fio} , variável que buscamos) e a temperatura inicial do sistema, adotada como sendo a temperatura do ar ambiente (T_{ar}) no início do experimento (T_0).

Dessa forma, concluímos que, para encontrar a temperatura do fio submetido a uma determinada tensão elétrica, em um determinado momento (n), temos a seguinte definição geral:

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sai (convecção)}} - E_{\text{sai (radiação)}} = m \cdot C_p \cdot (T_n - T_0)$$

Detalhando cada uma das equações da definição acima, obtemos:

$$E_{\text{entra}} = I^2 \cdot R \cdot dt$$

Onde:

I = corrente (Ampere)

R = resistência (Ohms)

dt = intervalo de tempo (segundos)

$$E_{\text{sai (convecção)}} = h \cdot A \cdot (T_{n-1} - T_0) \cdot dt$$

Onde :

h = coeficiente de transferência térmica $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

A = superfície do condutor (m^2)

T_{n-1} = temperatura do fio ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura do ar no momento inicial ($^{\circ}\text{C}$)

dt = intervalo de tempo (segundos)

$$E_{\text{sai (radiação)}} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot ((T_{n-1})^4 - (T_0)^4) \cdot dt$$

Onde:

ε = emissividade

A = superfície do condutor (m^2)

σ = constante de Stefan Boltzmann $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right) = 5,67036713 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

T_{n-1} = temperatura do fio (K) \rightarrow Temperatura em Kelvin = $^{\circ}\text{C} + 273,15$

T_0 = temperatura do ar no momento inicial ($^{\circ}\text{C}$)

dt = intervalo de tempo (segundos)

$$E_{armazenada} = m \cdot C_p \cdot (T_{n-1} - T_0)$$

Onde:

m = massa (gramas)

C_p = coeficiente de calor específico do fio $\left(\frac{J}{g}\right)$

T_{n-1} = temperatura do fio ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura do ar no momento inicial ($^{\circ}\text{C}$)

dt = intervalo de tempo (segundos)

Sabendo que a variável procurada é a temperatura do fio (T_n) podemos rebalancear a equação principal, obtendo:

$$T_n = T_{n-1} + \left(\frac{E_{entra} - E_{sai}(\text{convecção}) - E_{sai}(\text{radiação})}{m \cdot C_p} \right)$$

$$T_n = T_{n-1} + \left(\frac{I^2 \cdot R \cdot dt - h \cdot A \cdot (T_{n-1} - T_0) \cdot dt - (\varepsilon \cdot A \cdot \sigma ((T_{n-1})^4 - (T_0)^4)) \cdot dt}{m \cdot C_p} \right)$$

Onde:

$$I = 0,39 \text{ A}$$

$$R = 61,7 (\Omega/\text{m})$$

$$dt = 0,01\text{s} \text{ (intervalo escolhido entre medições)}$$

Para definirmos a variável h :

$$\text{Se } T_n \leq 200^{\circ}\text{C} \Rightarrow h = 1,198 + 0,778T_n$$

$$\text{Se } T_n \geq 200^{\circ}\text{C} \Rightarrow h = 145,084 + 0,073T_n$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot 0,00075 \cdot 0,5 = 0,0002356\text{m}^2$$

$$\varepsilon = 0,8 \text{ (dado tabela)}$$

$$m = \text{densidade} \left(\rho \text{ em } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \cdot \text{Volume}_{\text{fio}} (V \text{ em } \text{cm}^3) \Rightarrow$$

$$\rho = 8,03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$V = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L \Rightarrow 2 \cdot 3,1416 \cdot 0,0075^2 \cdot 50 = 0,00883575\text{cm}^3$$

$$m = 8,03 \cdot 0,00883575 = 0,073367\text{g}$$

$$C_p = 0,460548 \left(\frac{J}{\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right) \text{ (dado tabela)}$$

Dadas as equações necessárias para calcularmos os valores da temperatura do fio durante a passagem do tempo até o ponto de seu equilíbrio térmico, temos condições de lançar os dados em uma tabela:

Tabela 12 - Projeção temperatura do fio de Nicromo vs tensão aplicada (V)

Δt	$E_{sai} (convecção)$	$E_{sai} (radiação)$	$E_{sai} (total)$	$E_{líq} (E_{entra} - E_{sai})$	Temp
0,0	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	30,00
0,1	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,4667747	38,82
0,2	0,0102248	0,0016783	0,0119030	0,4548717	52,29
0,3	0,0269256	0,0035431	0,0304686	0,4363061	65,21
0,4	0,0491929	0,0055630	0,0547559	0,4120188	77,40
...
9,1	0,4353220	0,0314527	0,4667747	0,0000000	166,40

Fonte: Dados obtidos pelo autor.

Observando os dados na planilha de cálculo⁷⁹ foi possível aferir que a partir do momento 9,1s a temperatura do fio não se altera mais, confirmando o equilíbrio do sistema.

Conforme queríamos demonstrar, ao aplicar uma tensão de 12V sobre o fio de Nicromo montado no aparato, não era possível alcançar a temperatura de corte ideal de 300°C, preconizada pela literatura. Uma vez que a ferramenta de cálculo desenvolvida é parametrizável, é possível conferir por meio de aproximações sucessivas que a tensão necessária seria de aproximadamente 19,2V. Uma vez que não dispomos de uma fonte de tensão variável, buscamos no mercado uma que pudesse fornecer o valor mais próximos da tensão calculada, o que acabou se verificando como uma fonte de 24V com capacidade de carga de 2A.

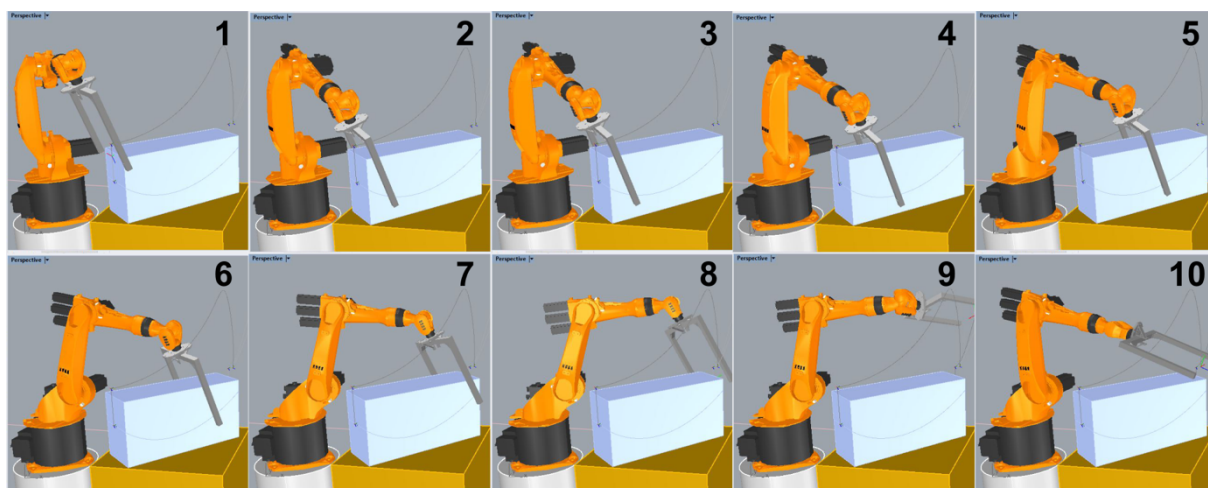
Voltando a planilha, ao aplicarmos uma tensão de 24V, a temperatura do fio alcançaria cerca de 418,5°C em aproximadamente 5,5 segundos. Apesar desse valor ser maior do que o estimado como sendo o ideal para corte, verificou-se por meio de novos testes expeditos que o corte passou a ocorrer de forma termomecânica a

⁷⁹ As planilhas com os cálculos completos encontram-se nos apêndices desse trabalho

velocidades consideradas adequadas para o propósito inicial, sendo possível assim dar continuidade ao experimento com o corte da fôrma em EPS.

Com base nos dados obtidos foi feita a programação dos algoritmos com a movimentação do braço robótico, definindo os cortes de cada uma das três partes que constituem o molde em EPS. Para cada uma das três seções de dimensão 1000 x 300 x 500 mm foram programadas duas operações de corte nas faces superior e inferior, nessa ordem, conforme é possível observar nas imagens das simulações realizadas pelo computador.

Figura 68 - Simulação do robô para corte do molde final em EPS



Fonte: Dados do autor.

Após as simulações, foi executado o corte efetivo dos blocos de EPS e as três partes foram unidas por meio de um adesivo para formar o molde completo do painel, preparado para a simulação da projeção do GRC.

5.3 Etapa 2 — Projeção

No experimento idealizado, a etapa de projeção do GRC será simulada fisicamente por meio da projeção de uma resina acrílica a base de água contra o molde em EPS. A aplicação da resina por meio de uma pistola de projeção automática possibilita a programação do braço robótico da mesma forma que seria realizada com o GRC, mas a uma fração do seu custo e com um maior controle da qualidade do

ambiente onde se encontra o equipamento, que não será exposto aos materiais cimentícios ou a fibra de vidro.

5.3.1 Definição das restrições e parâmetros para a projeção

Como exposto anteriormente, a definição dos caminhos da ferramenta (toolpath) por meio da programação do braço robótico foi um dos principais desafios enfrentados pela equipe de Balaguer, fato confirmado pelo próprio em sua entrevista ao autor. Em todas as etapas desse experimento foi utilizado o programa Kuka|PRC, desenvolvido por uma equipe de arquitetos e programadores da Association for Robots in Architecture e disponibilizado de forma gratuita aos membros de sua comunidade.

O software (na verdade um *plugin*, que roda dentro do software de modelagem Rhino3D) permite que toda a movimentação do robô seja programada de forma paramétrica e visual, baseada nas geometrias modeladas pelo designer no próprio programa. Isso possibilita a programação de um braço robótico industrial sem a necessidade da digitação de uma única linha de código, o que é uma grande vantagem para arquitetos e designers que, assim, não precisam dominar linguagens de programação mais abstratas e menos relacionadas ao fazer projetual⁸⁰.

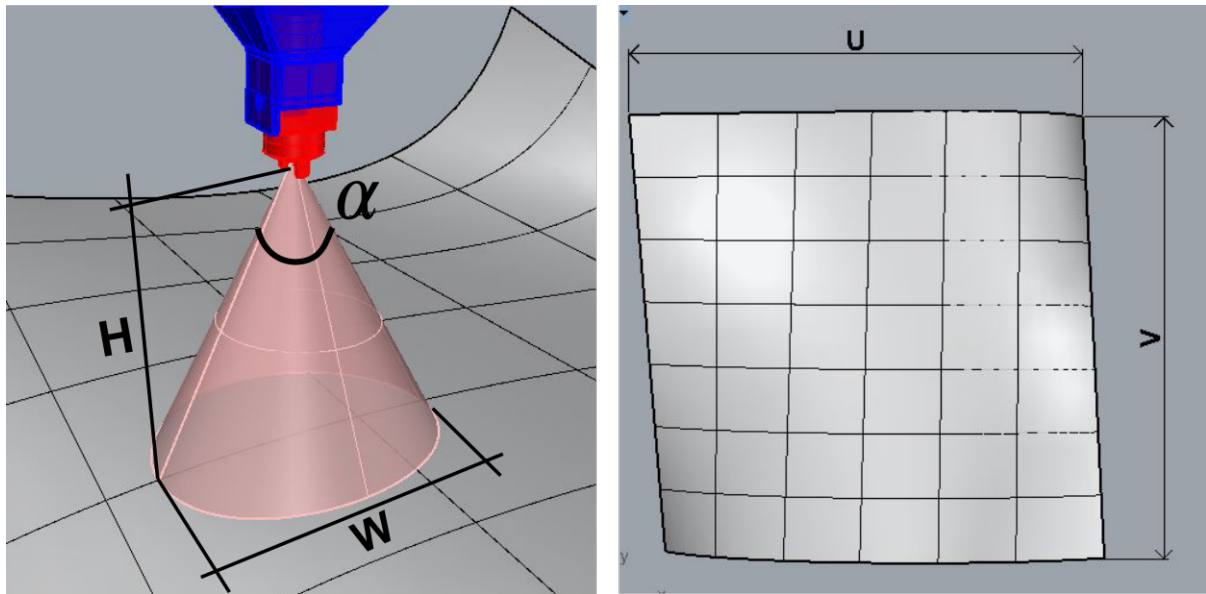
Antes de realizar a programação dos *toolpaths* do robô para a projeção do material é preciso definir as restrições e parâmetros de desempenho necessários para a tarefa. Da mesma forma que ocorreria com a projeção do GRC, para a aplicação da resina acrílica, faz-se necessário definir:

- as dimensões do cone de projeção;
- a distância do equipamento de projeção até a superfície do molde;
- a velocidade de movimentação;

⁸⁰ Obviamente, existem arquitetos e designers que se interessam cada vez mais por linguagens de programação, o que lhes permitem desenvolver as próprias ferramentas de modelagem digital customizadas. Entretanto, para o foco dessa pesquisa, interessa muito mais a acessibilidade trazida pelos novos programas, que possibilitam a pessoas com pouco ou nenhum conhecimento em programação trabalhar com robôs industriais no contexto da arquitetura, arte e design.

A definição da largura e altura do cone de projeção foi baseada em dados propostos por Balaguer no artigo “Automatic Robot Path Planning for a GRC Spraying Cell” (BALAGUER et al., 1994). O algoritmo criado define que a largura e o comprimento da superfície do molde (D) sejam divididos por um número (W) de forma que o resultado (P) seja sempre um valor inteiro, de forma que não haja áreas sem projeção ou despejo do material para fora do molde.

Figura 69 - Cone de projeção e divisões U e V na superfície de projeção



Fonte: Dados do autor.

A tradução da operação realizada pelo algoritmo pode ser definida pela fórmula:

$$\{P \in \mathbb{N} | P \neq 0\} = \frac{D}{\{W \in \mathbb{Q}_+^* | l \leq W \leq L\}}$$

Onde

P = número de passadas da ferramenta

D = dimensão do painel na direção de U ou V (mm)

W = base do cone de projeção (mm)

l = limite mínimo da base do cone de projeção (mm)

L = limite máximo da base do cone de projeção (mm)

A programação é definida dividindo o valor de D pelo limite máximo da base do cone de projeção (L), de forma que o número de passadas seja otimizado. Caso o

valor resultante (P) não seja um número inteiro, o sistema arredonda o valor para o seu inteiro imediatamente superior. Dividindo novamente a distância D pelo valor arredondado de (P) temos o valor final da base do cone de projeção (W).

No caso específico do molde projetado, suas dimensões no sentido U ou V da superfície são iguais e valem 1000mm. Adotando-se o valor do limite máximo da base do cone de projeção de 200mm, obtemos o valor de P como sendo igual a 5.

Nesse caso, a largura final da base do cone (W) é igual ao limite máximo, pois 1000 é múltiplo de 200.

Com base nos dados obtidos acima e do ângulo do cone de projeção (α , que é fornecido pelo fabricante da pistola automática) é possível definir a distância (H) que o braço robótico deve manter da superfície do molde, de modo a tornar a projeção o mais uniforme possível. Esse valor é obtido por meio da fórmula:

$$H = \frac{\left(\frac{W}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)}{2}\right)}$$

Onde:

H = distância da ferramenta até a superfície do molde (mm)

W = base do cone de projeção

α = ângulo do cone de projeção (graus)

$\pi = pi = 3,1416$

Substituindo as variáveis acima pelos valores obtidos, temos:

$$H = \frac{\left(\frac{200}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\left(\frac{30 \cdot 3,1416}{180}\right)}{2}\right)}$$

$$H = \frac{100}{\tan 0,2618}$$

$$H = \frac{100}{0,26794} = 373,21 \text{ mm}$$

Sabemos que no molde projetado, a distância H será a mesma em ambos os sentidos da projeção, uma vez que o molde é um quadrado de lado 1000mm. O algoritmo proposto é completamente paramétrico, logo, funcionará para qualquer dimensão de molde projetado, desde que o mesmo tenha um formato retangular, o que é o caso mais comum na fabricação de painéis esbeltos de fachada.

O cálculo da velocidade de movimentação do braço (feed rate) foi baseada na equação proposta por Balaguer (BALAGUER et al., 1994), adaptada abaixo:

$$V = \frac{F}{e \cdot W}$$

Onde:

V = velocidade (mm/s)

F = fluxo de projeção (mm³/s)

e = espessura da camada

W = base do cone de projeção (mm)

A espessura da camada e o fluxo de projeção médios foram estimados com base em manuais de fabricação de GRC (GRCA (GLASS FIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION), 2010; JONES et al., 2005) e catálogos de fornecedores de equipamentos de projeção, respectivamente.

$e = 5\text{mm}$

$F = 10\text{ kg/min} = 83.333\text{ mm}^3/\text{s}$ (adotando uma densidade de 2000kg/m^3)

logo:

$$V = \frac{83.333}{5 \cdot 200} = \sim 83\text{ mm/s}$$

Em nosso experimento será realizada a projeção da resina acrílica sobre o molde, logo, é preciso definir a sua velocidade específica, devido à diferença do fluxo de projeção do material e da espessura da camada. Substituindo os valores na fórmula acima, temos:

$e = 0,05\text{mm}(50,0\mu\text{m}, \text{dado fornecido pelo fabricante})$

$F = 160\text{ ml/min} = 2.430,00\text{ mm}^3/\text{s}$ (adotando a densidade de $0,913\text{g/cm}^3$)

logo:

$$V = \frac{2.430}{0,05 \cdot 200} = 243,00\text{ mm/s}$$

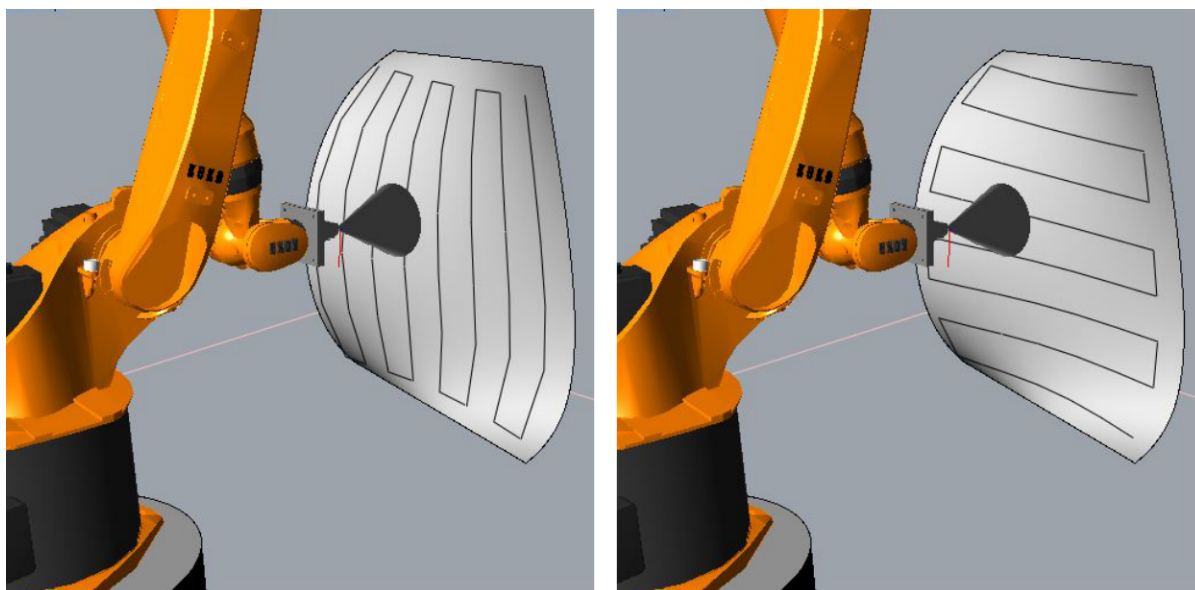
Os valores obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura disponível sobre o planejamento de caminhos para robôs de pintura (CHEN; THOMAS; XIONGZI, 2008). Novamente, assim como todos os demais algoritmos criados para essa pesquisa, a programação para a definição da velocidade é parametrizável e serve para a simulação da projeção de qualquer tipo de material, da resina acrílica ao GRC.

Outros parâmetros importantes como o fluxo e a pressão da projeção são regulados diretamente, de forma manual, no compressor de ar, sem a necessidade de intervir no código do robô e seguindo as recomendações dos fabricantes dos equipamentos utilizados no aparato.

5.3.2 Definição dos caminhos para a simulação da projeção do GRC sobre a forma em EPS

Para criarmos um parâmetro real de comparação com o intuito de definir os pré-requisitos de desempenho na simulação da projeção, estimou-se com base na literatura existente (GRCA (GLASS FIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION), 2010; JONES et al., 2005) que um painel de GRC simples possui uma espessura típica que pode variar entre 12 a 15mm. Por sua vez, cada camada fabricada manualmente possui entre 4 e 5mm de espessura após a sua compactação, o que significa que, para uma peça típica, são realizadas três etapas de projeção do compósito. As camadas sucessivas são projetadas nos sentidos horizontal e vertical, de forma intercalada, para que haja uma distribuição uniforme das fibras de vidro no painel. Para validar a prova de conceito, os toolpaths foram programados exatamente da mesma maneira que seriam realizados caso a projeção fosse em GRC, em ambos os sentidos, de forma intercalada.

Figura 70 - Definição dos caminhos de projeção horizontal e vertical (U e V)



Fonte: Dados do autor.

Uma das principais vantagens da proposição de um sistema robotizado de produção de GRC é a uniformidade na projeção da matriz. Um robô industrial tem a capacidade de realizar a tarefa mantendo a pistola sempre na distância pré-determinada e perfeitamente perpendicular à superfície do painel. Essa precisão é impossível de ser alcançada na projeção manual, mesmo que por operadores qualificados, e isso culmina na produção de peças com maior qualidade final.

Com base nas definições anteriores (tamanho do cone de projeção, distância da pistola ao painel, velocidade e sentido de projeção), foi possível programar um algoritmo de forma que essas variáveis fossem parametrizáveis. Isso significa que a programação feita para essa prova de conceito, com a aplicação de uma resina acrílica sobre o molde, **é exatamente a mesma** que será utilizada no caso da projeção do GRC pelo método do Spray-up premix, em um possível desdobramento dessa pesquisa. Para adequarmos a programação do robô aos diferentes tipos de materiais e características de fabricação, basta alterar os parâmetros numéricos e os *toolpaths* são automaticamente recalculados, sem a necessidade de efetuar mudanças no algoritmo ou no código.

5.3.3 Simulação da projeção (*spray-up*) do GRC

Para a simulação da projeção do GRC por meio da deposição da resina sobre o molde de EPS, o aparato experimental foi modificado com a troca do seu efetuator (do corte a fio quente para pistola de projeção automática), a recalibração do robô e sua conexão com o sistema de ar comprimido do laboratório.

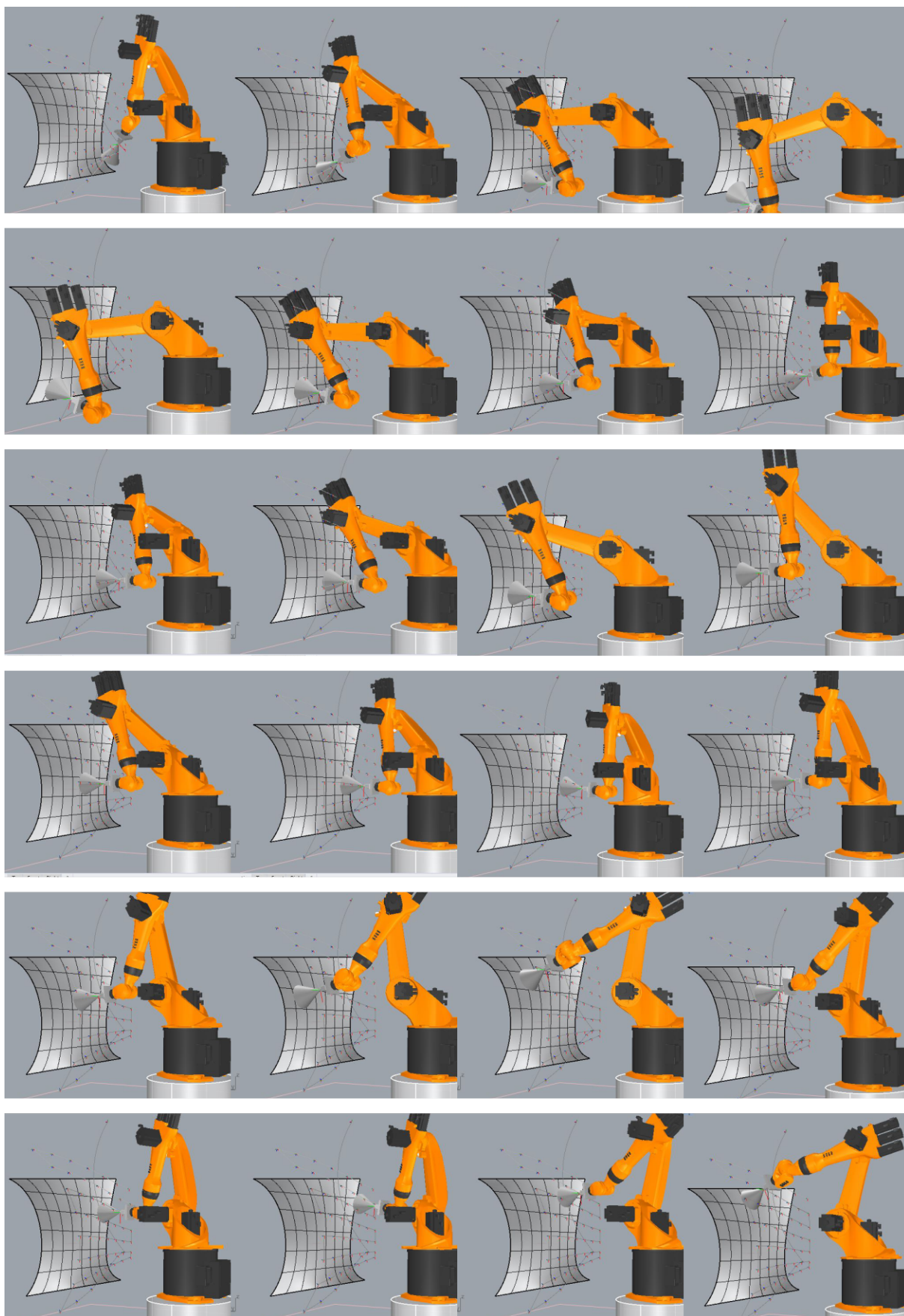
Além da troca, foi instalado um tanque de pressão com capacidade nominal de dois litros e um manômetro, para regular a pressão do ar entre o compressor e o tanque. Entre o compressor e o sistema do tanque de pressão (onde a resina é depositada para a projeção) foi instalada uma válvula solenoide pneumática de três saídas, controlada eletronicamente pela porta lógica do robô. Dessa forma, o acionamento da pistola automática é determinado dentro da própria programação do braço robótico.

O esquema do aparato montado para a projeção pode ser mais bem observado no diagrama e nas imagens abaixo.

ESQUEMA E IMAGENS APARATO PROJEÇÃO ROBO

Feita a programação final do algoritmo, foi realizada uma verificação virtual, utilizando a ferramenta de simulação presente no Kuka|PRC. Aqui, todos os movimentos do braço robótico são simulados ainda no ambiente virtual, de modo que é possível conferir se há alguma condição de colisão ou singularidade que poderiam arruinar o experimento.

Figura 71 - Simulação da projeção (*Spray-up*) do GRC sobre o painel (sentido U)



Fonte: Dados do autor

Confirmada a ausência de potenciais problemas, é gerado um código do tipo G-Code, que é salvo em um dispositivo de armazenamento externo (drive USB) e transferido fisicamente para o robô por meio de uma porta USB existente em sua controladora.

Após o arquivo ser carregado no sistema operacional do robô foi realizada uma última checagem de segurança, executando manualmente passo a passo a programação do robô em baixa velocidade, ainda sem o posicionamento do bloco de EPS na mesa de corte. Essa etapa não é obrigatória no fluxo do trabalho, mas foi adotada como um padrão de segurança a ser seguido para se evitar danos ao equipamento. Após essa última checagem, o bloco de EPS foi enfim instalado em sua posição e os códigos de projeção executados automaticamente na velocidade programada.

Figura 72 - Braço robótico projetando resina acrílica sobre molde de EPS

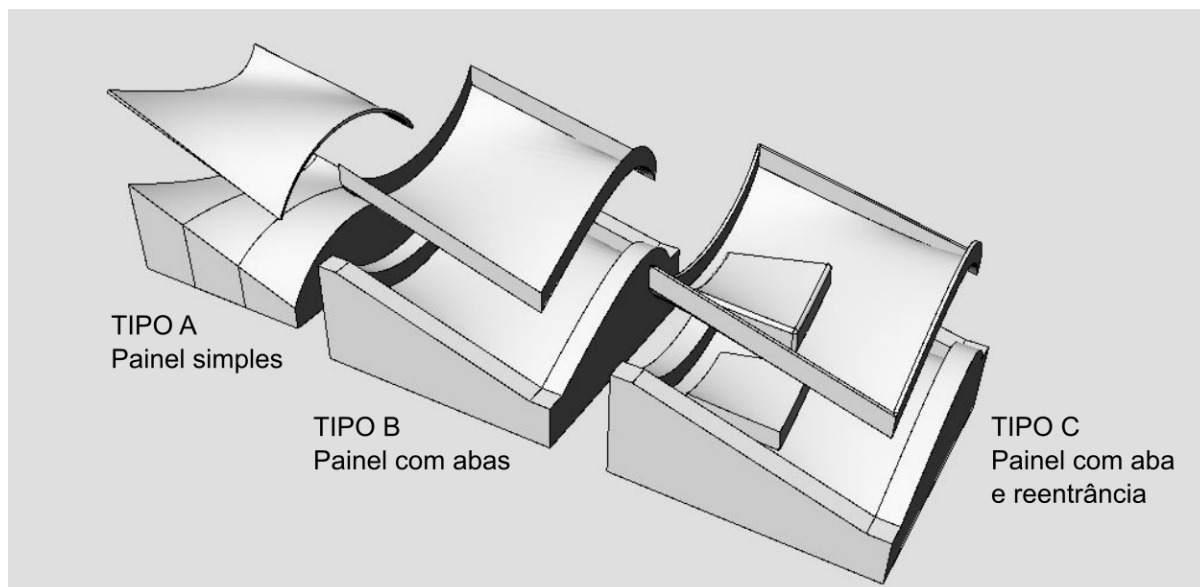


Fonte: Dados do autor

5.4 Etapa 3 — Simulações alternativas em ambiente virtual

Como forma de ampliar o conhecimento sobre os limites do novo processo de manufatura proposto no experimento, decidiu-se realizar a simulação da fabricação de dois diferentes tipos de painéis de GRC, com formas mais complexas. As dimensões e a geometria da superfície regradada foram mantidas, mas em ambos os novos painéis (tipo B e tipo C) foram acrescentadas abas laterais de fixação e, em um deles (tipo C), uma abertura em forma de reentrância, que poderia servir para a instalação de um elemento de caixilharia, por exemplo.

Figura 73 - Tipologias dos painéis utilizados no experimento

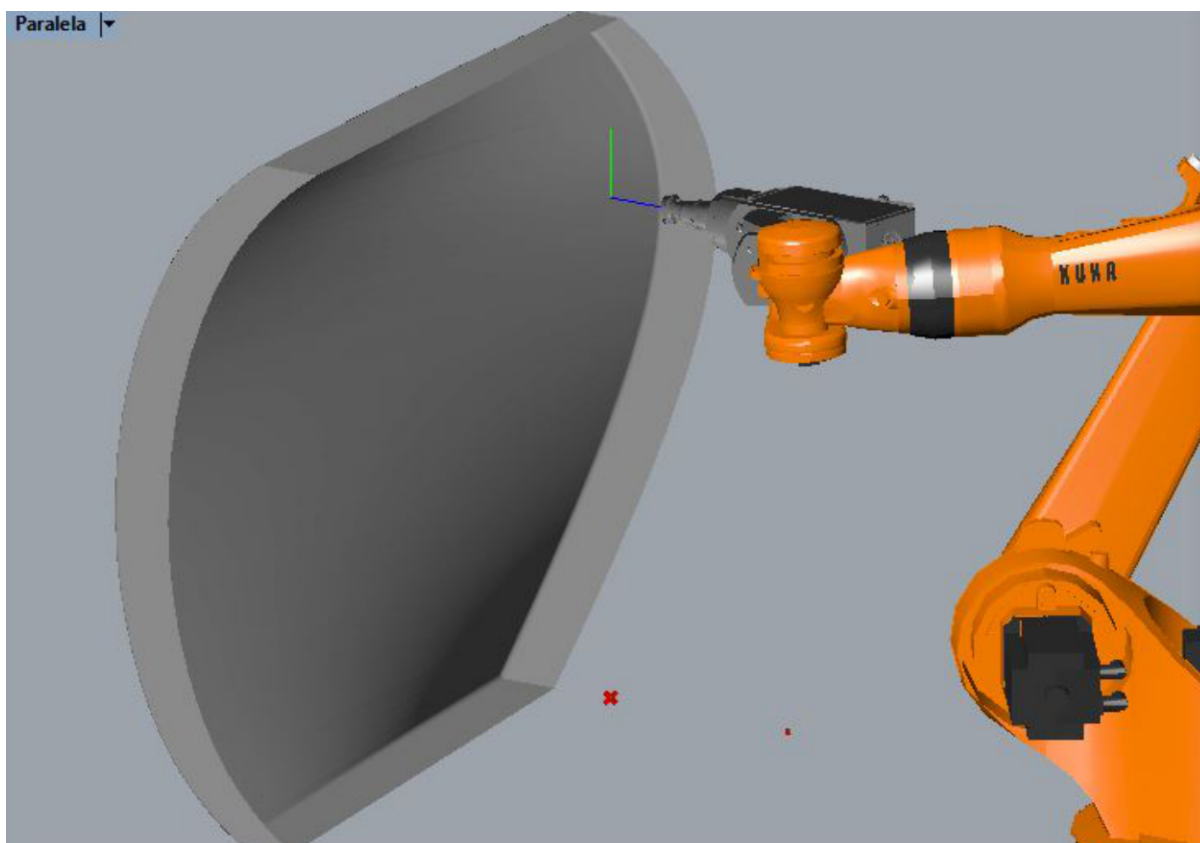


Fonte: Dados do autor.

Nas etapas anteriores dessa fase, após a programação dos algoritmos foram executadas com o robô as operações físicas de corte e aplicação de resina sobre o molde em EPS. No caso dos novos painéis não seria possível realizar o corte por meio do fio quente, pois o acréscimo das abas e reentrâncias no desenho do painel faz com que a sua superfície total deixe de ser regrada.

A solução proposta nesse caso foi realizar a simulação virtual da fabricação do molde em EPS por meio do processo de fresagem com spindle. Fôrmas de EPS fresadas por equipamentos de fabricação digital são utilizadas na produção de peças únicas em concreto há quase duas décadas, como é possível aferir nos exemplos da Neuer Zollhof (Frank O. Gehry, Dusseldorf, 1999) e da Big Belt House (Bill Massie, EUA, 2000).

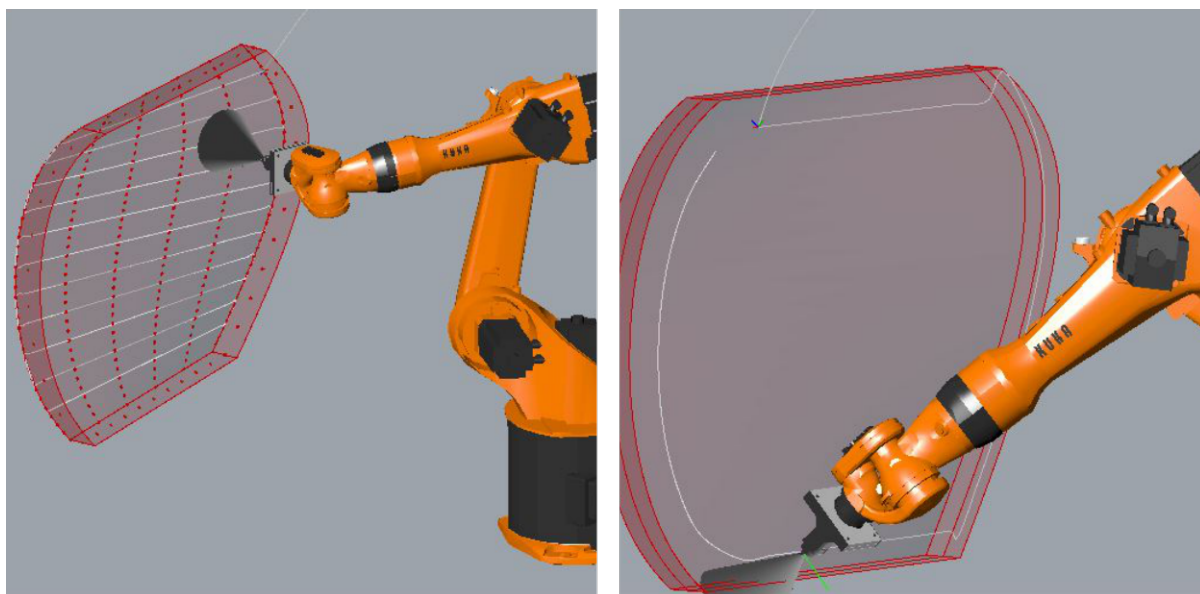
Figura 74 - Simulação da usinagem robotizada da forma em EPS (tipo B)



Fonte: Dados do autor.

A abordagem para a criação do algoritmo de fresagem das fôrmas é completamente diferente do corte a fio quente, portanto essa etapa foi criada sem o aproveitamento dos códigos gerados anteriormente. Entretanto, a programação do processo de projeção do GRC para os novos tipos de painéis — que é o foco principal da proposição dessa pesquisa — é idêntica ao do modelo simples executado na fase anterior.

Figura 75 - Simulação da projeção no sentido U (esq.) e nas abas (dir.) painel tipo B



Fonte: Dados do autor.

5.5 Resumo e principais resultados dos ensaios

Todas as etapas do experimento realizado resultaram em dados concretos, obtidos principalmente no trabalho prático com o braço robótico, mas também serviram de pano de fundo para reflexões mais amplas, que serão abordadas de forma detalhada no próximo capítulo dessa tese.

Cabe nesse sub item relacionar os principais aspectos objetivos dos resultados alcançados em cada uma de suas fases.

5.5.1 Modelagem das superfícies

Na literatura consultada nessa tese, existe um grande número de pesquisas cujo tema principal é a racionalização e modelagem de superfícies regradas voltadas para a construção arquitetônica, com especial destaque aos trabalhos realizados por Pottmann (CHEN; POTTMANN, 1999; EIGENSATZ et al., 2010; FLÖRY; POTTMANN, 2010; PETERNELL; POTTMANN; RAVANI, 1999; POTTMANN et al., 2007; POTTMANN; LÜ; RAVANI, 1996).

A etapa de modelagem das superfícies dos painéis — e consequentemente dos seus moldes — não tinha como objetivo trazer contribuições significativas ao

campo de estudo, mas era um passo necessário para o desenvolvimento dos estágios posteriores. Criou-se por meio de modelagem tridimensional paramétrica uma superfície genérica, cujo único pré-requisito formal era o de ser uma superfície regrada, de maneira que o experimento pudesse ser executado por meio do corte a fio quente, processo escolhido para a fabricação dos moldes de EPS.

Embora a criação das superfícies não fosse o objeto principal desse estudo, todos os algoritmos utilizados estão disponibilizados nos apêndices desse trabalho, como forma de garantir a reprodutibilidade do experimento.

5.5.2 Produção das fôrmas em EPS

Com relação à produção dos moldes, ainda nos primeiros ensaios com o corte a fio quente, foi possível avançar no conhecimento sobre o processo, com a criação de uma ferramenta para estabelecer a tensão correta a ser aplicada no fio de nicromo, de forma que o corte pudesse ocorrer na temperatura correta. Mesmo no trabalho seminal de Brooks acerca do tema (BROOKS, 2009), não havia sido descrito um método de aferição da temperatura do fio que não fosse a sua medição direta por meio de instrumentos (a posteriori) ou sua predição através de cálculos complexos pelo método de elementos finitos (FEM). A solução foi encontrada ao criarmos uma forma de adaptarmos um método inventado originalmente por Whiteside (WHITESIDE, 2018) para medir de temperatura de filamentos no interior de tubos valvulados. A planilha de cálculo originalmente criada e utilizada pelo pesquisador encontra-se pormenorizada nos apêndices desse trabalho.

Após a resolução da questão da temperatura do fio, foi possível aferir por meio de ensaios expeditos a densidade dos blocos de EPS que melhor se adaptou a ferramenta. Inicialmente acreditava-se que quanto maior a densidade, melhor o resultado final, mas os ensaios mostraram que densidades muito altas não eram as mais adequadas para o corte a fio quente. Para cortar o poliestireno com densidade de 38Kg/m^3 (8F) foi necessário programar a ferramenta com uma velocidade muito baixa (5mm/s) de forma que o corte não ocorresse de forma mecânica. Testes realizados com velocidades acima desse valor causaram o surgimento de escamas visíveis na superfície do molde por conta da tensão aplicada no fio pelo contato físico

com o bloco de EPS ou até mesmo a ruptura do fio de nicromo, confirmando o resultado verificado nos trabalhos de Karmakar e Subbiah (KARMAKAR; SUBBIAH, 2018). O problema encontrado ao se executar o corte utilizando velocidades muito baixas (abaixo de 5mm/s) é o fato de que a transferência de calor do fio para o EPS cresce consideravelmente, causando o aumento da kerf width e consequente diminuição da precisão dimensional

Após a continuidade dos testes em amostras de EPS com oito densidades diferentes concluiu-se, por meio de análise visual da superfície do molde e da medição das tolerâncias (kerf width), que a densidade mais adequada para os trabalhos era de 19Kg/m³ (4F) e a velocidade de corte ideal de 20mm/s.

5.5.3 Simulação da projeção do GRC

A etapa seguinte do experimento consistiu na programação dos movimentos do braço robótico e na simulação da projeção do GRC sobre os moldes fabricados em EPS. Na primeira parte dessa etapa foram parametrizadas as definições e pré-requisitos de desempenho necessários para a criação das toolpaths, unindo os dados conhecidos da fabricação do GRC tradicional, com outros específicos referentes ao processo da manufatura digital.

Como explicado no capítulo anterior, a simulação da projeção do GRC se deu pela projeção de outro material sobre o molde de EPS, no caso uma resina acrílica a base de água. Para a finalidade do experimento — que foi produzir um protótipo do tipo prova de conceito — a substituição se mostrou adequada por dois motivos principais. O primeiro deles é que a projeção da resina permite um melhor controle do ambiente no laboratório onde o braço robótico se encontra instalado. A projeção do GRC tradicional requereria a disponibilidade de um espaço maior do que o disponível, com ventilação adequada (em função da contaminação do ar pela fibra de vidro) e com proteção do ambiente e dos equipamentos contra o derramamento da matriz cimentícia. O segundo, e mais importante motivo, é o fato de que foi possível empregar uma nova tecnologia de fabricação digital em um processo de manufatura existente, pois o algoritmo programado para a projeção da resina serve também para a projeção do GRC.

Todos os algoritmos criados nessa pesquisa estão disponíveis em seus anexos, porém, no caso específico da programação da projeção do GRC

Segundo Exner, “os protótipos do tipo PoC esclarecem questões fundamentais acerca da factibilidade de determinados conceitos, como por exemplo, o uso de uma nova tecnologia”(EXNER et al., 2016). O experimento formulado nessa pesquisa tratou exatamente do exemplo citado por Exner, com o uso de uma nova tecnologia (fabricação digital robótica) aplicada a um processo já existente (manufatura de elementos em GRC).

Dessa maneira, o pesquisador acredita que a experiência mostrou resultados positivos, uma vez que, com base no que foi demonstrado durante a sua realização, foi possível alcançar todos os objetivos propostos e responder aos questionamentos colocados ao longo da formulação da tese.

Entretanto, é importante lembrar que a intenção primordial dessa PoC vai além de provar que é possível utilizar um robô industrial para a produção de painéis de GRC, pois isso já fora realizado por Balaguer na década de 1990, como visto anteriormente. Todo o trabalho experimental foi realizado com a intenção de demonstrar que existe a possibilidade de implementar novos usos para tecnologias existentes utilizando ferramentas acessíveis e abertas, mais adequadas ao contexto local, como será apontado agora, no capítulo final.

6 CONCLUSÕES

A palavra “concreto” — no português brasileiro — possui dois significados distintos. Segundo os dicionários, o concreto pode ser entendido como:

[1] Aquilo que designa coisas ou seres perceptíveis pelos sentidos, por oposição a abstrato.

[2] Um aglomerado artificial de pedras, cascalho e areia, unidos por um ligante hidráulico.

Esse caráter de “dupla-personalidade” do concreto permeou o desenvolvimento dessa pesquisa durante todo seu processo.

Em sua base empírica, lidou-se com o concreto em seu sentido mais objetivo e utilitário, por meio do estudo de seus componentes e na exploração de novas formas de utilização para o mais antigo material usado na construção. No entanto, os principais questionamentos que originaram esse trabalho partem de inquietações onde o termo “concreto” é colocado como contraponto ao conceito de “digital” — aqui entendido como sinônimo de imaterial.

Voltando ao primeiro parágrafo dessa tese, e parafraseando Lúcio Costa, assumimos que arquitetura é antes de mais nada construção. Isso posto, fica a pergunta: como materializar, concretizar, dar concretude às criações tridimensionais virtuais — cujas geometrias tornam-se cada vez mais complexas — realizadas pelos arquitetos em meio digital?

6.1 Futuros desdobramentos e questões em aberto

O autor considera que o protótipo do tipo PoC realizado durante essa tese é a primeira etapa da formulação de um processo de produção realmente inovador. A fabricação de um elemento por meio da deposição de um material em camadas sucessivas é o que configura por definição os processos de manufatura aditiva. Partindo desse princípio, a projeção automatizada do GRC também poderia ser caracterizada como sendo pertencente a essa área de manufatura, ampliando o leque das pesquisas nessa área para além dos processos de extrusão que ganharam destaque nos últimos cinco anos.

Um excelente artigo escrito pela equipe⁸¹ liderada por Buswell e publicado recentemente no *Cement and Concrete Research Journal* (BUSWELL et al., 2018) mostra com clareza os enormes desafios a serem enfrentados para efetivar a 3DCP como um processo de produção realmente viável. Existem ainda inúmeras questões em aberto referentes ao processo, ao design dos componentes e principalmente ao material utilizado na fabricação por extrusão de concreto que inviabilizam seu uso comercial. Pode-se argumentar que já existem diversas iniciativas de construção de casas e até edifícios inteiros fabricados por essa técnica, mas o autor responde com uma pergunta: qual deles está inserido e regulamentado em um contexto onde existem leis, códigos e normas técnicas bem consolidadas? Pelo que se sabe, ainda nenhum. Em tempos de comunicação instantânea por meio de mídias sociais, parece que vale mais a foto publicada no *feed* do que o aprofundamento e a publicação de aplicações concretas, o que garantiria a reprodutibilidade das pesquisas e a sua disseminação, com um real impacto social.

Posto isso, percebe-se que existe um grande espaço para o avanço em pesquisa e desenvolvimento de um processo de produção artesanal, mas cujo material já é utilizado, testado e provado há mais de meio século, como o GRC.

Durante a conclusão desse trabalho o autor submeteu para dois eventos importantes na área da construção industrializada⁸² o resumo de um artigo intitulado “Pré-fabricação robotizada de painéis esbeltos de GRC por meio da manufatura aditiva: uma prova de conceito”. Em ambos os casos, o resumo foi aceito para envio do artigo completo, o que sinaliza o interesse em conhecer mais sobre o trabalho desenvolvido durante a tese e seus futuros desdobramentos

A proposta do pesquisador é avançar no processo de prototipagem desse novo método de manufatura aditiva por meio da confecção de um protótipo funcional, com o qual poderiam ser analisadas outras características intrínsecas ao processo

⁸¹ Que possui um pesquisador brasileiro radicado na Dinamarca, Wilson R. Leal da Silva, com o qual o autor trocou correspondências acerca do projeto *TailorCrete*, desenvolvido em 2012.

⁸² 62º Congresso Brasileiro do Concreto (setembro/2020, Santa Catarina) e o 18th International Glassfibre Reinforced Concrete Association Congress GRC2020 (setembro/2020, Londres).

automatizado e realizar a comparação com o método manual, executando ensaios de resistência e outras características da performance do produto.

6.2 Novas materialidades

A escolha do GRC como objeto de pesquisa foi fundamentada no estudo da produção recente de arquitetos contemporâneos consagrados, tais como Zaha Hadid, Frank Gehry, Jean Nouvel, Diller + Scofidio, entre outros. Em diversas obras projetadas pelos “starchitects”, especialmente na última década, o GRC foi amplamente utilizado como meio de expressão da intenção arquitetônica e não apenas como mais um material que compõe o revestimento de suas fachadas.

O GRC, assim como o concreto armado, é um material fluido, capaz de assumir formas complexas, como as projetadas por meio de algoritmos paramétricos pelos designers digitais. A obra contemporânea que talvez melhor represente esse novo paradigma é o centro cultural Heydar Aliyev (Baku, 2014) projetado por Zaha Hadid Architects.

A forma de produção atual do GRC apresenta, de modo geral, níveis de industrialização maiores do que os encontrados comumente na manufatura do concreto armado in loco, entretanto, ela carrega consigo um paradoxo. No capítulo V pudemos analisar a evolução desse processo construtivo desde a sua criação (há quase cinquenta anos) e foi possível constatar que houve um grande descasamento entre o desenvolvimento do material e de sua manufatura. Se, enquanto compósito, o GRC se enquadra na vanguarda da ciência do desenvolvimento dos materiais, seu processo produtivo continua extremamente artesanal, pouco qualificado e insalubre, ou seja, o oposto do *avant-garde* representado pelas grandes obras de renomados arquitetos.

Os resultados desse trabalho demonstram que é possível introduzir a automação da projeção do GRC por meio da fabricação digital robotizada, com o potencial de trazer melhorias para a sua cadeia produtiva e colaborar para o aumento do nível de industrialização na construção civil como um todo.

A pesquisa mostra que a automação da produção do GRC em painéis leves de superfícies complexas é um conceito factível, mas atualmente não há no país empresas com produção comercial do GRC para esse tipo de aplicação. A única empresa especializada na fabricação e venda de produtos pré-fabricados em GRC, a Pavi do Brasil, declarou falência e fechou as suas operações em 2014. Uma empresa do ramo de pré-fabricados de concreto (Leonardi pré-fabricados), arrematou os seus equipamentos, mas, segundo contato do autor com responsáveis pela empresa, eles não fazem uso comercial dos mesmos, apenas testes e pequenas peças para uso interno. Vimos no capítulo 3 alguns dos motivos pelos quais a industrialização da construção civil ainda não se desenvolveu plenamente no país, mas a cultura da pré-fabricação no Brasil ainda é voltada para a produção pesada, voltada a shoppings, indústrias e galpões. Segundo dados recolhidos no anuário da ABCIC (Associação Brasileira da Construção Industrializada em Concreto) esses três segmentos representam juntos mais de 80% de todo o mercado local de elementos pré-fabricados. Edifícios comerciais, residenciais e de serviços continuam sendo historicamente uma minoria.

Além das questões da cultura construtiva e industrial local, outro fato importante que freou o desenvolvimento do mercado do GRC no país, segundo Fonseca de Campos, foi a desvalorização da moeda nacional frente ao dólar. Entre 2014 e 2020 o Real se desvalorizou quase 200%, o que fez disparar o custo do *roving* de fibra de vidro AR — que é fabricada exclusivamente pela empresa OwensCorning — inviabilizando a produção de painéis e outros elementos de alto valor agregado, como módulos e banheiros prontos, que utilizam o processo de produção de GRC via *spray-up*. Por esse motivo acredita-se que é promissor o caminho tomado por essa pesquisa, ao propor a automação da projeção do GRC pelo *sprayed premix*, que não utiliza a fibra em forma de *roving*. Isso diminui o capital necessário para a aquisição dos equipamentos e, principalmente o da fibra de vidro AR.

Mesmo com tantos obstáculos, o autor acredita que o que tem impedido o desenvolvimento da indústria do GRC no País são questões majoritariamente conjunturais e que o avanço — e não o recuo, como está acontecendo atualmente no Brasil — no investimento em pesquisa e ciência na área poderiam ser catalizadores de um processo de industrialização em uma área historicamente defasada.

Com relação ao sistema de fôrmas em EPS abordados na pesquisa, provou-se que os moldes fabricados por meio do corte a fio quente ou fresagem permite que se alcance uma alta flexibilidade em sua produção, possibilitando a criação de geometrias complexas e únicas de forma barata e rápida, sem a necessidade de amortizar o alto investimento em moldes por meio da produção seriada em grande escala.

Pode-se argumentar que o EPS é um material prejudicial ao meio ambiente, pois apesar de ser 100% reciclável, estima-se que apenas cerca de 15% de sua produção retorna às fábricas para reutilização, e o restante acaba sendo depositado de forma inadequada em aterros ou mesmo na natureza. Isso se deve ao fato de o EPS ser composto por 98% de ar, o que faz dele um produto com alto volume e baixo peso, praticamente inviabilizando a logística reversa do material destinado à reciclagem. Entretanto, o percentual de material reciclado vem aumentando pouco a pouco e, nos últimos anos, surgiram empresas especializadas na reciclagem do EPS, que solucionam o problema logístico instalando máquinas compactadoras no local da geração dos resíduos e coletando o material para destiná-los aos fabricantes. Além disso, é possível reutilizar o material descartado como agregado em outros processos de manufatura, o que é uma alternativa ao estabelecimento de um ciclo fechado de produção.

Embora o panorama da reciclagem desse tipo de termoplástico venha melhorando, acredita-se que no caso da produção de moldes para a manufatura de peças de GRC com geometrias complexas e com baixo número de reutilizações, outra tecnologia poderia ser mais adequada, como as fôrmas digitais flexíveis. Existem estudos acadêmicos que produziram protótipos funcionais de sistemas de moldes que adaptam a sua forma de acordo com a geometria da peça a ser fabricada (HENRIKSEN, 2017; JANSSEN et al., 1999; SCHIPPER; JANSSEN, 2011). Ainda é um campo de estudos em desenvolvimento, mas já existe ao menos uma empresa — a dinamarquesa ADAPA — que comercializa moldes adaptativos para a fabricação de peças de termoplástico, compósitos, vidro e GRC (RAUN C., 2015). Esse tipo de solução elimina o desperdício de material com fôrmas que seriam utilizadas poucas vezes e ainda agrega a vantagem de não ter limites com relação a dupla curvatura nas geometrias, que não precisam ser necessariamente superfícies regradadas.

Enquanto os moldes digitais não evoluem, outras aproximações que visam atacar esse problema — o rejeito das fôrmas após poucas reutilizações — com o uso de fabricação digital vem sendo testadas. A queda das patentes e consequente disseminação das impressoras 3D de baixo custo, que trabalham por meio da extrusão de filamentos termoplásticos, permitiu que um grande número de pesquisas envolvendo esses equipamentos pudessem ser realizadas (CASTAÑEDA VERGARA et al., 2018; NABONI; BRESEGHELLO, 2019). Em uma delas, desenvolvida na Universidad Politecnica de Madrid, o protótipo de uma impressora FDM de grande formato foi utilizado para fabricar uma superfície de dupla curvatura feita com ABS, que posteriormente serviu de forma para a projeção do GRC, de forma manual (CASTAÑEDA VERGARA et al., 2018). Após o término dessa tese — e da descoberta que existem outras possibilidades que poderiam eliminar o uso e descarte do EPS — o autor iniciou o projeto de construção de um equipamento de extrusão de FDM de grande volume, capaz de imprimir peças com até 1m^3 . Um dos desdobramentos possíveis dessa pesquisa seria utilizar essa impressora para a produção de moldes de superfícies de dupla curvatura, posteriormente fabricados com GRC projetado por um braço robótico. No caso dos termoplásticos utilizados na deposição de material fundido, a sua reciclagem é um processo muito mais simples e passível de ser feita in loco, com a transformação dos rejeitos em novos filamentos. Atualmente o equipamento já se encontra em funcionamento e pronto para efetuar os primeiros testes em maior escala.

Figura 76 - Impressora 3D FFF de grande volume (1m^3)



Fonte: Arquivo do autor.

6.3 Os artesãos e os “Master Builders” digitais

Na década de 1990 — ou na primeira revolução digital, segundo Carpo (CARPO, 2017)— nos apoderamos das ferramentas de criação digital baseadas em modelos matemáticos de NURBS (criados ainda nos anos 1950), proporcionando uma espécie de renascimento do estilo streamline (CARPO, 2017), o que Lynn viria chamar mais tarde de blobitecture, ou blob architecture (LYNN, 2004). Não é por coincidência que as ferramentas encontradas para materializar esse tipo de arquitetura foram as máquinas de comando numérico computadorizado, também inventadas no final da década de 1950. As formas, embora complexas, eram passíveis de serem traduzidas nas equações matemáticas criadas por Pierre Bézier e, assim, reproduzíveis no universo dos planos cartesianos X, Y e Z.

Porém, a questão da materialidade fica ainda mais importante nos dias de hoje, quando vivemos a transição para uma segunda revolução dentro do campo da arquitetura e design puramente digitais (CARPO, 2017). Com o avanço do universo do Big Data e do alto poder de processamento dos computadores a um custo a cada dia mais baixo, surgem novas formas de criar espaços tridimensionais cada vez mais complexos e semelhantes à natureza.

Um exemplo disso são os programas de modelagem paramétricos, nos quais não se desenhavam diretamente as geometrias, mas elas são o resultado de operações com listas, conjuntos e árvores de dados. Formas nunca antes vistas surgem dessa nova lógica, onde cada voxel (que pode ser entendido como sendo a versão tridimensional do pixel) no espaço pode ser discretizado e materializado em uma impressora 3D ou por uma extrusora de concreto acoplada a um braço robótico. Devido ao alto poder computacional, cada vez mais acessível, podemos associar a modelagem paramétrica a algoritmos generativos, como autômatos celulares, ou a métodos de form finding baseados em cálculos complexos de modelos de elementos finitos. Projetar dessa maneira pode ser comparado com o processo de produção artesanal, onde o artesão qualificado exerce seu ofício por meio da tentativa e erro. A diferença é que, como bem nota Carpo, hoje é possível em poucas horas, tentar e errar mais vezes do que um artesão tradicional faria em toda sua vida (CARPO, 2017).

O desenvolvimento de novos meios de fabricação — especialmente os que envolvem o uso de novas tecnologias — proporciona avanços indiscutíveis, mas muitas vezes somos tomados pelo fetiche cultural da máquina, tratando a tecnologia *per se* como uma solução benéfica para todos os problemas (NOBLE, 2011). É importante lançar um olhar mais atento, que envolve a história do desenvolvimento da indústria do concreto na construção civil, para que não se repitam as experiências negativas com sistemas fechados de construção ocorrida no período pós-guerra.

Esse é um dos motivos pelos quais, nesse trabalho de pesquisa, a premissa básica foi a de encontrar meios de criação e produção que fossem os mais acessíveis e abertos possíveis, propondo novos usos para tecnologias existentes, adequados ao contexto e ao grau de desenvolvimento local.

Toda a programação das funções desempenhadas pelo braço robótico no processo foi realizada apenas utilizando-se programas de computador de custo acessível⁸³ e “de prateleira”. Isso significa que não houve a necessidade de desenvolver nenhum código de programação customizado para a simulação do processo de projeção do GRC sobre os painéis, como ocorreu com o trabalho de Balaguer na Espanha. Hoje, os programas de modelagem tridimensional associados a alguns *plug-ins* de programação visual paramétrica como o Grasshopper, permitem a integração entre CAD e CAM de uma forma fluida — em uma mesma interface, sem a necessidade da utilização de programas distintos.

Essa característica assume um papel importante, pois é comum que, na aquisição de um braço robótico, os pacotes de software proprietários e necessários para o funcionamento do equipamento possuam um custo superior ao da ferramenta em si. No decorrer dos trabalhos o autor manteve contato com engenheiros, professores e fabricantes de braços robóticos industriais que desconheciam o fato que

⁸³ A licença comercial do software Rhino3D utilizado na modelagem e programação dos algoritmos geométricos tem um custo estimado de USD 1.000,00 (pesquisa realizada em 23/02/2020 no site do fabricante - www.rhino3d.com/shop), enquanto plugin Kuka|PRC, utilizado para a programação do robô é gratuito para membros da Association for Robots in Architecture, cuja anuidade em 2019 foi de €300,00.

é possível programar seus produtos de uma forma tão simplificada e manifestaram seu interesse em conhecer mais sobre a pesquisa.

6.4 Novos paradigmas

Outro aspecto importante abordado nessa pesquisa e experimentado em sua etapa empírica, foi o uso de uma mesma ferramenta de fabricação digital, no caso o braço robótico industrial de 6 DOF, para desempenhar duas funções distintas dentro do processo produtivo proposto: a produção do molde e a projeção do GRC. Apesar de serem ferramentas extremamente flexíveis, seu uso ainda está muito relacionado com a produção industrial em alta escala, onde os robôs são programados para repetir a mesma tarefa indefinidamente, da forma mais otimizada possível.

Esse fato de certa forma justifica as barreiras encontradas atualmente por usuários sem conhecimentos especializados em programar esse tipo de equipamento. Quando um robô é adquirido, sua programação é definida por especialistas, muitas vezes ainda no próprio ambiente do seu fabricante, onde as células de produção são montadas e testadas. Uma vez instalado em seu local de produção final, o propósito é não alterar as configurações e deixar o equipamento trabalhar o maior tempo possível, de forma a otimizar o retorno do investimento. Essa (ainda) é a realidade na maior parte dos casos.

Quase 90% da produção de robôs é voltada para a indústria automobilística e de bens de consumo, mas as conclusões de um estudo da principal entidade do setor indicam que o uso dos robôs industriais sofrerá modificações significativas em um futuro próximo (VERL, 2016). Além do aumento da aplicação de robôs na indústria criativa (arquitetura, design, cinema, fotografia, artes visuais), outras tendências que vem ganhando corpo no caso da produção industrial seriam:

- **Maior flexibilidade e adaptabilidade**

Estruturas fixas e voltadas para a execução de uma única tarefa serão substituídas por redes adaptáveis de robôs, onde é possível a reconfiguração da célula para diferentes tipos de operações.

- Maior modularidade e autonomia

Granularidade e customização da produção ajustada para a necessidade dos mercados (*mass customization*), apoiados na flexibilidade natural dos braços robóticos industriais, passíveis de serem adaptados para a produção em pequena escala.

- Novos modelos de negócio

Modelos voltados para o mercado dos “*prosumers*”⁸⁴;

Lotes de produção de uma única peça serão possíveis;

Big Data se tornará um novo paradigma;

Iniciativas *Open Source* proporcionarão novas oportunidades de mercado.

No que toca o último item acima, convém salientar que hoje existe um *framework* de programação altamente desenvolvido, completamente aberto e livre, o ROS (Robot Operating System). Essa plataforma, que já existe há mais de dez anos, possui uma comunidade altamente ativa e que contribui constantemente com suas melhorias e implementação de novos recursos. Desde a sua versão 2.0, lançada em 2017, o sistema tem capacidade de operar com aplicações em tempo real, o que permite o seu uso no controle e programação de braços robóticos industriais, independente de qual seja o seu fabricante. Se analisarmos o que aconteceu após a queda das patentes e abertura dos projetos das impressoras 3D, que em pouco mais de uma década passaram de equipamentos industriais caríssimos para as prateleiras das lojas de departamento, podemos predizer que o amadurecimento de iniciativas de código aberto como o ROS, também contribuirão muito para o desenvolvimento de novas aplicações e a disseminação do uso de robôs em novas áreas, como a construção civil.

Enquanto as previsões sobre os novos modelos de produção adaptáveis não se tornam o novo padrão na indústria, o exercício demonstrado nessa pesquisa prova

⁸⁴ Prosumer é um neologismo surgido da união das palavras produtor e consumidor. Conforme a definição encontrada na Wikipedia “...o termo é utilizado para qualificar produtos que apesar de serem vendidos para o consumidor final, são destinados a usuários avançados. Trata-se, portanto, de um segmento de clientes com foco em produtos de tecnologia de ponta cujos recursos são mais extensos que os disponibilizados ao restante do mercado de massa”. (<https://pt.wikipedia.org/wiki/Prosumer>, acessado em 15/02/2020, editada pela última vez em 24/10/2018).

que robôs industriais podem ser utilizados facilmente de forma flexível, com o intercâmbio constante de seus end-effectors. Essa talvez não seja a prática mais adequada da ferramenta em uma célula industrial — que visa a alta produtividade —, mas provar essa possibilidade é importante para o desenvolvimento (e o encorajamento) de novas pesquisas acadêmicas em arquitetura e design, lugar onde se pode explorar novos limites de utilização da ferramenta. Embora esse tipo de uso já seja trivial nas universidades em diversos países da Ásia, América do Norte e Europa, pode-se dizer que o experimento aqui realizado foi um dos primeiros documentados dentro de uma pesquisa acadêmica na área de arquitetura e design no País.

Por fim, e mais importante, todo o processo — da criação das geometrias até a confecção dos moldes e simulação da fabricação dos painéis — foi realizado apenas por arquitetos. O autor não pretende com essa afirmação fazer uma apologia à hermetização da profissão, muito pelo contrário. A cadeia produtiva da construção civil tende a ser cada vez mais aberta e segmentada, envolvendo um número cada vez maior de profissionais especializados durante todo o processo de construção.

Ao provar que dominamos um processo de manufatura digital file-to-factory, podemos (re)assumir um papel de liderança na construção, transitando entre os diversos atores envolvidos na produção do objeto final, (especialmente os engenheiros e fornecedores/fabricantes) e coordenando a sua troca de informações. Ao nos aproximarmos da materialidade do objeto, melhoramos a qualidade do projeto e garantimos que as suas intenções originais se mantenham no produto final.

As etapas finais dessa pesquisa e a sua defesa foram realizadas já sob os efeitos da pandemia de COVID-19 que assola o planeta desde o início deste ano. Mesmo sendo um evento recente (e pelo qual ainda estamos sofrendo as consequências), as condições impostas pelo isolamento social causaram um aumento na discussão e no interesse sobre as tecnologias que permitem a automação do trabalho. Não se trata aqui apenas o trabalho remoto dos escritórios, mas, e principalmente, do trabalho de manufatura que pode ser automatizado.

A substituição do trabalho artesanal por novas tecnologias é um fato inevitável, porém, nos interessa observar esse processo de forma mais abrangente, incluindo nessa complexa equação a sua dimensão humana. As ilusões apresentadas pelos pontos de vista tecnicistas são fundamentadas no determinismo tecnológico imposto pelos atores que produzem essas tecnologias, como forma de manter o status quo, e de normalizar uma situação que nada tem de normal. Estimativas apontam que, em menos de duas décadas, mais de 40% dos postos de trabalho existentes hoje no mundo serão eliminados, substituídos por novas tecnologias (FORD, 2015).

Obviamente, esse trabalho não tem a ambição e tampouco a capacidade de solucionar o complexo problema que se aproxima. Entretanto, ao propormos a inserção de arquitetos e designers — profissionais com formação e cultura humanística — na liderança de processos dominados pelas frias ciências exatas, esperamos poder ampliar a diversidade de pontos de vista e inserir uma matriz mais humana no desenho das novas tecnologias que virão e que podem nos levar ao progresso — ou à extinção.

7 REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 544. **544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009)**. [s.l: s.n.].
- ALBERTI, L. B. **Da Arte Edificatória**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.
- ALEXANDER, C. **Notes on the Synthesis of Form**. [s.l.] Harvard University Press, 1964.
- ANDERSEN, T. J.; THRANE, L. N.; LEAL DA SILVA, W. R. Lessons from the TailorCrete Project. **Concrete International**, v. 38, n. 3, p. 54–61, 2016.
- ANDRES, J. et al. First Results of the Development of the Masonry Robot System ROCCO: a Fault Tolerant Assembly Tool. **Automation and Robotics in Construction Xi**, p. 87–93, 1994.
- ANDRIOLO, F. R. **Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução**. 1a Edição ed. São Paulo: Editora Pini, 1984.
- ARABI, N.; MOLEZ, L.; RANGEARD, D. Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: Microstructural observations of degradation. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 62, n. 3, 2018.
- BALAGUER, C. et al. Robotized system of GRC panels for construction industry. **Automation in Construction**, 1993.
- BALAGUER, C. et al. Automatic Robot Path Planning for a GRC Spraying Cell. **Automation and Robotics in Construction**, p. 579–586, 1994.
- BALAGUER, C. et al. Evaluation and Comparative Study of Robotics vs . Manual Spraying of GRC Panels . **Automation and Robotics in Construction**, p. 489–497, 1995.
- BALAGUER, C. **Entrevista concedida à Eduardo Lopes em 28/02/2017 via Skype**São Paulo, 2017.
- BALL, H. 35 year review of the GRC Technology , Equipment and Markets. **Grc2011**, p. 1–36, 2011.
- BENDER, R. **Una visión de la construcción industrializada**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1976.
- BOCK, T. **Automation And Robotics In Building Construction**, 1999.
- BOCK, T. Construction Automation and Robotics. **Robotics and Automation in Construction**, 2008.
- BOCK, T. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. **Automation in Construction**, v. 59, p. 113–121, 2015.

BONSIEPE, G. **Metodologia experimental: Desenho Industrial**. Brasília: CNPq / Coordenação editorial, 1986.

BONWETSCH, T.; BÄRTSCHI, R.; HELMREICH, M. **BrickDesign**. [s.l.: s.n.].

BONWETSCH, T.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. Digitally Fabricating Non-standardised Brick Walls. **Manu Build**, p. 1–6, 2004.

BORG COSTANZI, C. et al. 3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure. **Automation in Construction**, v. 94, n. May, p. 395–404, 2018.

BRELL-ÇOKCAN, S. et al. Digital Design to Digital Production: Flank Milling with a 7-Axis CNC-Milling Robot and Parametric Design. **27th eCAADe Conference Proceedings**, p. 323–330, 2009.

BRELL-ÇOKCAN, S.; BRAUMANN, J. A New Parametric Design Tool for Robot Milling. **Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)**, p. 357–363, 2010.

BRELL-ÇOKCAN, S.; BRAUMANN, J. Computer Numeric Controlled Manufacturing for Freeform Surfaces in Architecture. **New York**, p. 20–25, 2011.

BROOKS, H. **Foam cutting mechanics for rapid prototyping and manufacturing purposes**. [s.l.] University of Canterbury, New Zealand, 2009.

BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, industrialização e desenvolvimento**. [s.l.] Editora Perspectiva, 1976.

BUSWELL, R. et al. **Investigation of the potential for applying freeform processes to construction**. Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC). **Anais...Rotterdam**: 2005

BUSWELL, R. et al. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37–49, 1 out. 2018.

CARPO, M. **The second digital turn: design beyond intelligence**. Cambridge: MIT Press, 2017.

CASTAÑEDA, E. et al. Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price. **Journal of Facade Design and Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–13, 23 maio 2015.

CASTAÑEDA VERGARA, E. et al. Innovative free-form glass fiber reinforced concrete (GRC) panel. **Revista de la construcción**, v. 16, n. 3, p. 479–488, 2018.

CELANI, M. G. C.; PUPO, R. T. Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para Arquitetura e Construção: Definições e Estado da Arte no Brasil. **Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**, v. 8, n. 1, 30 jun. 2008.

CHARTIER, T.; BADEV, A. Rapid Prototyping of Ceramics. In: **Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties: Second Edition**. Second Edition. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 489–524.

CHEN, H.; THOMAS, F.; XIONGZI, L. Automated industrial robot path planning for spray painting a process: A review. **4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2008**, p. 522–527, 2008.

CHEN, H. Y.; POTTMANN, H. Approximation by ruled surfaces. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 102, n. 1, p. 143–156, 1999.

COLLINS, P. **Concrete: The Vision of a New Architecture**. [s.l.] McGill-Queen's University Press, 2004.

CORBUSIER, L. **Por uma arquitetura**. 5a Edição ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1998.

CORRÊA, D. et al. **Perspectivas e desafios para inovar na construção civil**. [s.l.: s.n.].

COSTA, L. Considerações sobre arte contemporânea (1940). In: **Lúcio Costa, Registro de uma vivência**. São Paulo: Empresa das Artes, 1995. p. 608.

COSTANZI, C. B. **3d printing concrete onto flexible surfaces**. [s.l.] TU Delft, 2016.

CRUMP, S. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**, 1992. **CW@50: Data storage goes from \$1M to 2 cents per gigabyte (+video) | Computerworld**. Disponível em: <<https://www.computerworld.com/article/3182207/cw50-data-storage-goes-from-1m-to-2-cents-per-gigabyte.html>>. Acesso em: 17 jun. 2019.

DIZON, J. R. C. et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, v. 20, n. January 2018, p. 44–67, 2018.

DUARTE, J. P. **Personalizar a habitação em série: uma gramática discursiva para as casas da Malagueira do Siza**. [s.l.] Fundacion Calouste Gulbenkian, 2007.

ECKERT, J. **The evolution of the power workstation**. Disponível em: <https://triosdevelopers.com/jason.eckert/blog/Entries/2015/2/18_The_evolution_of_the_power_workstation.html>. Acesso em: 7 dez. 2019.

EDISON, T. A. **Apparatus for the production of concrete structures** United States, 1917.

EIGENSATZ, M. et al. Paneling Architectural Freeform Surfaces. **ACM Transactions on Graphics**, v. 29, n. 4, p. 1, 2010.

EISENMAN, P. The End of the Classical. In: **Catálogo da Exposição Malhas, Escalas e Dobras na Obra de Peter Eisenmann**. São Paulo: Museu de Arte de São Paulo, MASP, 1993.

ERCAN, S. et al. Automated localization of a mobile construction robot with an external measurement device. **Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019**, p. 929–936, 2019.

EXNER, K. et al. A transdisciplinary perspective on prototyping. **2015 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation/ International Technology Management Conference, ICE/ITMC 2015**, 2016.

FAJERSZTAJN, H. **Formas para concreto armado : aplicação para o caso do edifício**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1987.

FEBVRE, L.; MARTIN, H. J. **The Coming of the Book: The Impact of Printing 1450-1800**. [s.l.] Verso, 1997.

FERINGA, J.; SONDERGAARD, A. Design and Fabrication of Topologically Optimized Structures; An Integral Approach A close coupling form generation and fabrication. **Physical Digitality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference, Prague, Czech Republic, 12-14 September 2012**, v. 2, p. 495–500, 2012.

FLÖRY, S.; POTTMANN, H. Ruled Surfaces for Rationalization and Design in Architecture. **LIFE in:formation. On Responsive Information and Variations in Architecture**, p. 103–109, 2010.

FONSECA DE CAMPOS, P. E. **Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: Perspectivas de desenvolvimento para a pré-fabricação leve**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2002.

FONTANINI, J. I. C.; CARVALHO, H. G. DE. As Inovações Incrementais em Processos e seus Fatores Contribuintes em um Ambiente Industrial. **XXV Encontro Nacional de Eng. de Produção**, p. 8, 2005.

FORD, M. **The Rise of the Robots: Technology and the threat of mass unemployment**. London: Oneworld Publications, 2015.

FULLER, B. **Grunch of Giants**. [s.l.] The Estate of R. Buckminster Fuller, 2016.

GAMBAO, E. et al. A ROBOTIC SYSTEM FOR AUTOMATED MASONRY Universidad Carlos III of Madrid , C / Butarque , 15 , E-28911 Leganes (Madrid), Spain balagu 1 INTRODUCTION. p. 2–5, 1999.

GANE, V. **Parametric design : a paradigm shift?** [s.l.] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Architecture., 2004.

GEHRY, F. O. **Frank Gehry on the Architecture of LA's Disney Concert Hall**. Disponível em: <<https://youtu.be/zZoR6SpmqSQ>>. Acesso em: 12 out. 2019.

GERSHENFELD, N. **Fab: The coming revolution on your desktop - From personal computers to personal fabrication**. First Edit ed. New York: Basic Books, 2005.

GIBBONS, G. et al. 3D Printing of cement composites. **Advances in Applied Ceramics**, v. 109, n. 5, 2010.

GILBERT, G. T. GFRC – 30 Years of High Fiber Cement Composite Applications Worldwide. **American Concrete Institute (ACI)**, v. 224, p. 1–20, 2004.

GRCA (GLASS FIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION). **Specification for the Manufacture, Curing and Testing of GRC Products**. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Specification+for+the+manufacture+,+curing+and+testing+of+GRC+products#0>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

GROPIUS, W. **Bauhaus: Novarquitetura**. São Paulo: Editora Perspectiva, 2015.

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 215–243, 2013.

HAMBACH, M.; VOLKMER, D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, 2017.

HAUSCHILD, M.; KARZEL, R. **Digital Processes: Planning, Designing, Production**. [s.l.: s.n.].

HELENE, P.; MEDEIROS, M. H. DE. **Estudo da influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. São Paulo: [s.n.].

HELM, V. et al. Mobile robotic fabrication on construction sites: DimRob. **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**, p. 4335–4341, 2012.

HENRIKSEN, T. **Advancing the manufacture of complex geometry GFRC for today's building envelopes**. [s.l.: TU Delft, 2017.

HENRIKSEN, T.; LO, S.; KNAACK, U. An innovative approach to manufacture thin-walled glass fibre reinforced concrete for tomorrow's architectural buildings envelopes with complex geometries. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 189–199, 2015.

HODSON, H. Digital construction lets robots and 3D printing onto the building site. **New Scientist**, v. 218, n. 2913, p. 22–23, 2013.

HORSLEY, F. W. **Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels**. [s.l.: s.n.].

HWANG, D.; KHOSHNEVIS, B. CONCRETE WALL FABRICATION BY CONTOUR CRAFTING Dooil Hwang and Behrokh Khoshnevis. 2004.

IFR. **Executive Summary of World Robotics 2016 Service Robots**. [s.l.: s.n.].

JANSSEN, B. et al. 12 Deliberate deformation of concrete after casting. 1999.

JOHNSON, S. **Where good ideas come from : the natural history of innovation**. 1. ed. Nova Iorque: Riverhead Books, 2010.

JONES, G. et al. **Practical Design Guide for Glass Reinforced Concrete** International GRCA Technical Committee. [s.l: s.n.].

JONES, R. et al. RepRap – the replicating rapid prototyper. **Robotica**, v. 29, n. January 2011, p. 177–191, 2011.

KARMAKAR, N.; SUBBIAH, S. Investigating Bowing of Hot Wire during cutting of EPS. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 671–680, 2018.

KATINSKY, J. R. **A perspectiva exata florentina e o desenvolvimento da ciência moderna**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1990.

KAZEMIAN, A. et al. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639–647, ago. 2017.

KEATING, S. et al. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. **Science Robotics**, v. 2, n. 5, 26 abr. 2017.

KHOSHNEVIS, B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. **Int. J. Industrial and Systems Engineering**, v. 1, n. 3, p. 301–320, 2006.

KOLAREVIC, B. Digital Fabrication : Manufacturing Architecture in the Information Age. **Reinventing the Discourse - How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture [Proceedings of the Twenty First Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture / ISBN 1-880250-10-1]** , p. 268–278, 2001.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age : design and manufacturing**. 1st Editio ed. New York: Taylor&Francis, 2005.

KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **PERFORMATIVE ARCHITECTURE**. Primeira E ed. Nova Iorque: Spon Press, 2005.

KURODA, A. **Entrevista concedida à Eduardo Lopes** São Paulo, 2019.

LE, T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**, v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012.

LEE, G.; KIM, S. Case study of mass customization of double-curved metal façade panels using a new hybrid sheet metal processing technique. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 138, n. 11, p. 1322–1330, 2012.

LIMA, J. F. **CTRS, Centro de Tecnologia da Rede SARAH**. [s.l.] Sarah/Letras, 1999.

LYNN, G. **Animate Form**. [s.l.] Princeton Architectural Press, 1999.

LYNN, G. **Folds, Bodies & Blobs: Collected Essays**. [s.l.] La Lettre vol{é}e, 2004.

MA, G.; WANG, L. **A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing** *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2017.

MAJUMDAR, A. J.; NURSE, R. W. Glass Fibre Reinforced Cement. **Materials Science and Engineering**, v. 15, p. 107–127, 1974.

MARTINS, P. F. et al. **Expanding the Material Possibilities of Lightweight Prefabrication in Concrete Through Robotic Hot-Wire Cutting**. eCAADe 33. [s.l.: s.n.].

MARTINS, P.; SOUSA, J. P. **The Robotic Production of the GRC Panels in the CorkCrete Arch Project - A stratified strategy for the fabrication of customized molds**. eCAADe 34. *Anais...*2016

MITCHELL, W.; MACCULLOUGH, M. **Digital Design Media : Online**. [s.l.: s.n.].

MUNARI, B. **Das coisas nascem coisas**. [s.l.] Martins Fontes, 2002.

NABONI, R.; BRESEGHELLO, L. **Additive Formwork for Concrete Shell Constructions**. Form and Force IAAS Symposium. *Anais...*Barcelona: 2019

NERELLA, V. N. et al. Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology technology (CONPrint3D). **Rheologische Messungen an Baustoffen**, n. March, p. 236–246, 2016.

NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, 2018.

NOBLE, D. **Forces of Production: A Social History of Industrial Automation**. First Edit ed. [s.l.] Routledge, 2011.

OECD. **Oslo Manual**. [s.l.] OECD Publishing, 2005.

ORDOÑEZ, J. A. F. **Prefabricacion: teoria y pratica**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1974.

PASSARO, A.; ROHDE, C. Casa Revista: arquitetura de fonte aberta. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 11, n. 2, p. 25, 2016.

PEASE, W. An Automatic Machine Tool. **Scientific American Magazine**, p. 101–115, 1952.

PETER, I. D. Sprayed premix - The new GRC. **Concrete (London)**, v. 42, n. 1, p. 13–14, 2008.

PETERNELL, M.; POTTMANN, H.; RAVANI, B. On the computational geometry of ruled surfaces. **CAD Computer Aided Design**, v. 31, n. 1, p. 17–32, jan. 1999.

PETKOV, K. P.; HATTEL, J. H. Hot-blade cutting of EPS foam for double-curved surfaces—numerical simulation and experiments. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 9–12, p. 4253–4264, 4 dez. 2017.

PIEDMONT-PALLADINO, S. **Tools of the Imagination: Drawing Tools and Technologies from the Eighteenth Century to the Present**. [s.l.] Princeton Architectural Press, 2007.

POTTMANN, H. et al. **Architectural geometry, Volume 10**. [s.l.] Bentley Institute Press, 2007.

POTTMANN, H. et al. **Advances in Architectural Geometry**. 2010

POTTMANN, H.; LÜ, W.; RAVANI, B. Rational Ruled Surfaces and Their Offsets. **Graphical Models and Image Processing**, v. 58, n. 6, p. 544–552, 1996.

PRAGER, F. D.; SCAGLIA, G. **Brunelleschi: Studies of His Technology and Inventions**. [s.l.] Dover Publications, 2012.

PRITSCHOW, G. et al. Technological aspects in the development of a mobile bricklaying robot. **Automation in Construction**, v. 5, n. 1, p. 3–13, 1996.

RAUN C., K. P. H. **Adaptive mould - A cost-effective mould system linking design and manufacturing of double-curved GFRC panels**. The 17th International Congress of the GRCA. **Anais...**Dubai: 2015

ROHDE, C. **Design computacional e fabricação robótica**. [s.l.] Unversidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

SALAS, J. De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico. **Informes de la Construcción**, v. 60, n. 512, p. 19–34, 2008.

SCHIPPER, R. **Double-curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method**. [s.l.] TU Delft, 2015.

SCHIPPER, R.; JANSSEN, B. Curving Concrete – A Method for Manufacturing Double Curved Precast Concrete Panels using a Flexible Mould. **Joint Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) and the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)**, 2011.

SCHUMACHER, P. **The Autopoiesis of Architecture, Volume II: A New Agenda for Architecture**. [s.l.] Wiley, 2012.

SCHUMACHER, P. **The Miraculous Zaha Hadid: A Tribute by Patrik Schumacher**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/868022/the-miraculous-zaha-hadid-a-tribute-by-patrik-schumacher>>. Acesso em: 9 set. 2019.

SCHURR, S. et al. **Electricity in american economy: agent of technological progress**. First ed. Westport: Greenwood Press, 1990.

SELLS, E. et al. RepRap: The Replicating Rapid Prototyper: Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production. **SSRN eLibrary**, 2010.

SENNETT, R.; MARQUES, C. **O artífice**. [s.l.] Record, 2009.

SERRA, G. G. **Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo: guia prático para o trabalho de pesquisadores em pós-graduação**. 1a Edição ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.

SUTHERLAND, I. E. Sketchpad a Man-Machine Graphical Communication System. **Simulation**, v. 2, n. 5, p. R-3-R-20, 1964.

VASCONCELOS, A. C. DE. **O Concreto No Brasil: Pré-Fabricação, Monumentos, Fundações**. 1a Edição ed. São Paulo: Studio Nobel, 2002.

VERL, A. **Robotics & Industrie 4.0**. [s.l: s.n.].

VETROTEX. **Cem-FIL ® GRC Technical Data**, [s.d.].

WANGLER, T. et al. Digital Concrete: Opportunities and Challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, n. October, p. 67, 31 out. 2016.

WHITE, I.; CHE, Y. **3 Is GRC a “ Green ” Building Material ?** The 16th International Congress of the GRCath International Congress of the GRCA. **Anais...**Istanbul: 2011

WHITESIDE, J. **Calculating Wire Temperature is Not Complicated (nichrome example)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/user/deepblueharp>>.

WILLIAMS, N. et al. A Case Study of a Collaborative Digital Workflow in the Design and Production of Formwork for ‘Non-Standard’ Concrete Structures. **International Journal of Architectural Computing**, v. 9, n. 3, p. 223–240, set. 2011.

WOHLERS, T. Additive Manufacturing: The State of the Industry. **Advanced Manufacturing**, p. 42–58, 2016.

YU, F.; PASINELLI, M.; BREM, A. Prototyping in theory and in practice: A study of the similarities and differences between engineers and designers. **Creativity and Innovation Management**, v. 27, n. 2, p. 121–132, 2018.

ZHOU, X. et al. Rheology of semi-solid fresh cement pastes and mortars in orifice extrusion. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, 2013.