

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

KYLE BUSSINGUER SPÍNOLA DE ANDRADE

**PRODUÇÃO DA HABITAÇÃO NO CONTEXTO DA FABRICAÇÃO DIGITAL:
MAPEAMENTO DO POTENCIAL INDUSTRIAL NA REGIÃO METROPOLITANA
DA GRANDE VITÓRIA**

**VITÓRIA
2023**

KYLE BUSSINGUER SPÍNOLA DE ANDRADE

**PRODUÇÃO DA HABITAÇÃO NO CONTEXTO DA FABRICAÇÃO DIGITAL:
MAPEAMENTO DO POTENCIAL INDUSTRIAL NA REGIÃO METROPOLITANA
DA GRANDE VITÓRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Artes da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na área de concentração Cidade e Impactos no Território.

Orientador: Jarryer Andrade De Martino

VITÓRIA
2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A553p Andrade, Kyle Bussinguer Spínola de, 1987-
 Produção da habitação no contexto da fabricação digital :
 mapeamento do potencial industrial na Região Metropolitana da
 Grande Vitória / Kyle Bussinguer Spínola de Andrade. - 2023.
 168 f. : il.

 Orientador: Jarryer Andrade De Martino.
 Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -
 Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes.

 1. Fabricação Digital. 2. Customização em Massa. 3. Habitação.
 4. File to Factory. I. Martino, Jarryer Andrade De. II.
 Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Artes. III.
 Título.

CDU: 72

KYLE BUSSINGUER SPÍNOLA DE ANDRADE

“PRODUÇÃO DA HABITAÇÃO NO CONTEXTO DA FABRICAÇÃO DIGITAL:
MAPEAMENTO DO POTENCIAL INDUSTRIAL NA REGIÃO METROPOLITANA DA
GRANDE VITÓRIA”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Artes da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na área de concentração Cidade e Impactos no Território.

Aprovada em 22 de março de 2023.

Comissão Examinadora

Professor Dr. Jarryer Andrade De Martino
(orientador - PPGAU-UFES)

Professora Dra. Marcela Alves de Almeida
(membro interno - PPGAU-UFES)

Professor Dr. Marcus Vinícius Augustus Fernandes Rocha Bernardo
(membro externo - PPGAU-UFBA)



FOLHA DE APROVAÇÃO defesa Kyle

Data e Hora de Criação: 31/03/2023 às 16:45:49

Documentos que originaram esse envelope:

- FOLHA DE APROVAÇÃO.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)



Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 874ab4749f2baf55d7814ff9dd131f13bfada8efb6d16eb0bfdb91a9ab68b9d

[SHA512]: 989740f7928f9f21a8ceace8f678af71e1311657405cdbfffd4b221420b2cda069556d24c2ba9c33ea31b805131d448bd54c6de17857733f1e9bb3d45987531e

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



ASSINADO - Jarryer Andrade De Martino (jarryer.martino@ufes.br)

Data/Hora: 31/03/2023 - 16:52:22, IP: 200.137.65.106

[SHA256]: 1f35d867450a0301c5e6b611c30f6b19ccba5e2a2d66e55855d5b3fabbb39a58



ASSINADO - Marcela Alves de Almeida, 088.683.867-39 (marcela.almeida@ufes.br)

Data/Hora: 31/03/2023 - 17:39:49, IP: 187.36.171.66

[SHA256]: 855077440c6ec113a1b476e58237b1667065b1cad72ab13318b4bf7b8ee73b56



ASSINADO - Marcus Vinicius Rocha Bernardo, 010.995.161-10 (mv.augustus@gmail.com)

Data/Hora: 31/03/2023 - 17:34:35, IP: 179.105.128.84, Geolocalização: [-13.007445, -38.493906]

[SHA256]: cec45cf4c49e1a1e357e364397833bb4f0b65ed0d15368adc2fd5072163927c5

Histórico de eventos registrados neste envelope

31/03/2023 17:39:49 - Envelope finalizado por marcela.almeida@ufes.br, IP 187.36.171.66
31/03/2023 17:39:49 - Assinatura realizada por marcela.almeida@ufes.br, IP 187.36.171.66
31/03/2023 17:39:44 - Envelope visualizado por marcela.almeida@ufes.br, IP 187.36.171.66
31/03/2023 17:39:41 - Envelope autenticado com Dados de Identificação por marcela.almeida@ufes.br, IP 187.36.171.66
31/03/2023 17:34:35 - Assinatura realizada por mv.augustus@gmail.com, IP 179.105.128.84
31/03/2023 17:34:34 - Envelope visualizado por mv.augustus@gmail.com, IP 179.105.128.84
31/03/2023 17:34:30 - Envelope autenticado com Dados de Identificação por mv.augustus@gmail.com, IP 179.105.128.84
31/03/2023 16:52:22 - Assinatura realizada por jarryer.martino@ufes.br, IP 200.137.65.106
31/03/2023 16:52:19 - Envelope visualizado por jarryer.martino@ufes.br, IP 200.137.65.106
31/03/2023 16:47:00 - Envelope registrado na Blockchain por jarryer.martino@ufes.br, IP 200.137.65.106
31/03/2023 16:46:58 - Envelope encaminhado para assinaturas por jarryer.martino@ufes.br, IP 200.137.65.106
31/03/2023 16:45:50 - Envelope criado por jarryer.martino@ufes.br, IP 200.137.65.106

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pela saúde e oportunidade para realizar esta pesquisa.

Sou grato também à família, em especial aos meus pais, Athos e Denise, os quais amo profundamente e sempre me incentivaram a persistir nos estudos.

Ao querido orientador, professor Jarryer, pela incessante dedicação e pelo seu dom de ensino, que fez esta trajetória muito mais tênue.

Às empresas e instituições que abriram suas portas à visitação e prontamente cooperaram com o desenvolvimento desta pesquisa, sendo essas a Q'arte, Imagiton, Cemaço, ISTEIO, SENAI campus Vitória e FINDESLAB.

Ao companheirismo e dedica o de todos os colegas, funcionários e professores do PPGAU da UFES que de algum modo contrib iram com a minha trajetória acadêmica.

  Nathália, meu eterno amor, pela constante motiva o e colabora o durante todo o desenvolvimento desta disserta o.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo pesquisar as tecnologias vinculadas à fabricação digital da arquitetura capazes de serem aplicadas na produção de edificações habitacionais na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), que poderiam contribuir para a personalização em massa. Para tanto, a pesquisa analisa as potencialidades dos equipamentos, dos meios de produção relacionados à fabricação digital e da customização em massa em prol da diversidade formal e da customização da produção de arquitetura habitacional no Brasil. A hipótese levantada é que os meios de produção relacionados à fabricação digital estão disponíveis no comércio de serviços e são capazes de contribuir para a produção dessas habitações, como é o caso do estudo de campo desenvolvido na Região Metropolitana da Grande Vitória/ES. Esse estudo de campo tem como premissa identificar e delimitar as empresas e os equipamentos predisponentes na indústria da região analisada para catalogar aquelas que poderiam ser utilizadas para a fabricação de habitações no respectivo estado. Isso foi realizado por meio da identificação, mapeamento e desenvolvimento de uma tabela síntese a qual contém as tecnologias, seus respectivos usos, as dimensões das áreas de trabalho, os municípios onde se encontram e a área de atuação dos estabelecimentos detentores dos equipamentos CAD/CAM¹ na RMGV. Como complementação, foi realizada uma análise dos meios de produção e dos equipamentos do rol da fabricação digital para a construção de casas no mundo e no Brasil, com exemplos de casos de habitações produzidas com essa abordagem. No entanto, a pesquisa revelou que a fabricação digital é pouco utilizada para a produção de habitações, apesar das indústrias e do comércio de serviços disponibilizarem equipamentos que utilizam a tecnologia CAD/CAM, como demonstrados no caso da RMGV.

Palavras-Chave: Fabricação Digital; Customização em Massa; Habitação; *File to Factory*; Tecnologia de Arquitetura.

¹ *Computer-aided Design/Computer-aided Manufacturing.*

ABSTRACT

This research scrutinizes the technologies linked to the digital fabrication of architecture capable of being applied in the production of houses in the Metropolitan Region of Greater Vitória (RMGV), which could contribute to mass customization. To this end, the research analyzes the potential of equipment, means of production in favor of formal diversity and customization of the production of housing architecture in Brazil. The hypothesis raised is that the means of production related to digital fabrication are available in the service trade and could contribute to the production of these dwellings, as in the case of the field study developed in the Metropolitan Region of Greater Vitória, Espírito Santo. This field study has the premise of identifying and delimiting the predisposing companies and equipment in the industry of the investigated region to catalog those that could be used for the manufacture of housing in the respective state. This was done through the identification, mapping and development of a summary table which contains the technologies, their respective uses, the dimensions of the work areas, the municipalities where they are located and the area of operation of the establishments that own the CAD/CAM² equipment at RMGV. As a complement, an analysis was carried out of the means of production and equipment regarding digital fabrication for the construction of houses in the world and in Brazil, with examples of housing produced with this approach. However, the research revealed that digital fabrication isn't used for the production of housing as it could've, even though industries and services trade provide equipment that uses CAD/CAM technology, as demonstrated in the case of RMGV.

Keywords: Digital Fabrication; Mass Customization; Housing; File to Factory; Architecture Technology.

² Computer-aided Design/Computer-aided Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figuras do Capítulo 1:

Figura 1.01 – Fotografia da Minha Casa, Minha Vida em São Julião, Piauí.....25

Figuras do Capítulo 2:

Figura 2.01 – Croqui demonstrando o processo de design tradicional.....40

Figura 2.02 – Croqui representando o processo de design com a utilização de um sistema generativo.....40

Figura 2.03 – Representação gráfica de um ambiente virtual com a programação de um script (imagem à direita), com o respectivo resultado de sua codificação, duas esferas tangenciadas por um ponto (imagem à esquerda).....41

Figura 2.04 – Perspectiva 3D da implantação de unidades habitacionais de maneira aleatória.....42

Figura 2.05 – Representação gráfica de um círculo (número 1 na imagem), utilizado como forma de referência, sendo sobreposto por formas geradas com a deformação da forma inicial (números 2 a 8 na imagem).....43

Figura 2.06 – Representação 3D de um edifício gerado por meio das deformações a partir da forma inicial de um círculo.....43

Figura 2.07 – Fotografias da casa para Nova Orleans produzida com chapas de MDF e *routers CNC*: À esquerda - fotografia aérea -; À direita - Fotografia da fachada principal -.....44

Figura 2.08 – Fotografia de pangolim.....46

Figura 2.09 – Perspectiva 3D de população de pontos paramétricos em um ambiente virtual.....47

Figura 2.10 – Perspectiva 3D de superfície análoga ao pangolim.....47

Figura 2.11 – Fotografia da superfície da fachada de igreja que remete ao pangolim.....48

Figura 2.12: Fotografia de equipamento de corte com fresadora com tecnologia CNC, que pode ser de proporções das mais variadas, dependendo dos propósitos e dos materiais a serem trabalhados.....49

Figura 2.13 – Fotografia da *Disney Concert Hall*.....49

Figura 2.14 – Ilustração gráfica da indústria 4.0: Esquema da primeira à quarta revoluções industriais.....52

Figura 2.15 – Fotografia de braço robótico da KUKA - modelo KR IONTEC -.....53

Figura 2.16 – Fotografia do protótipo de molde de malha para concreto fabricado por braço robótico móvel.....55

Figura 2.17 – Ilustração gráfica do canteiro de obras com o uso *in loco* de fresadora CNC....57

Figuras do Capítulo 3:

Figura 3.01 – Diagrama dos métodos de produção automatizada para arquitetura e construção.....58

Figura 3.02 – Diagrama da maneira que os objetos são produzidos na arquitetura e construção.....59

Figura 3.03 – Fotografia do recorte de painel OSB com o uso de fresadora CNC.....60

Figura 3.04 – Fotografia de fresadora CNC de metais.....61

Figura 3.05 – Fotografia de equipamento de corte CNC cortando metal de chapa grossa.....61

Figura 3.06 – Fotografia de equipamento torno CNC da Romi S.A.....62

Figura 3.07 – Fotografia de máquina a *laser* CNC gravando sobre um material cilíndrico na RMGV.....63

Figura 3.08 – Modelo 3D da ‘*Instant House*’(a), modelo 3D da estrutura da ‘*Instant House*’(b) e modelo 3D das chapas padrão de OSB com todos os desenhos dos componentes construtivos da casa prontas para serem recortadas na *router* CNC.....65

Figura 3.09 – Representação 3D da estrutura da ‘*Instant House*’.....66

Figura 3.10 – Representações 3D das conexões adotadas no projeto da ‘*Instant House*’: encaixe entre chapas a 90 graus (a), estrutura de encaixe transversal (b) e encaixe entre peças paralelamente.....66

Figura 3.11 – Fotografia do transporte das peças prontas para o uso (imagem à esquerda) e fotografia da montagem da estrutura do telhado (imagem à direita).....67

Figura 3.12 – Fotografias da ‘*Instant House*’: com a estrutura das paredes instaladas (imagem à esquerda), com as estruturas das paredes e do telhado concluídas (imagem central) e após o seu término (imagem à direita).....67

Figura 3.13 – Fotografia da fachada do pavilhão *Landesgartenschau Exhibition Hall*.....68

Figura 3.14 – Modelo tridimensional do pavilhão *Landesgartenschau Exhibition Hall* com a planificação dos componentes construtivos.....69

Figura 3.15 – Fotografia do processo de fabricação robotizada de componentes construtivos com <i>router</i> CNC.....	70
Figura 3.16 – Fotografia do processo de montagem do pavilhão <i>Landesgartenschau Exhibition Hall</i>	71
Figura 3.17 – Fotografia interna do pavilhão <i>Landesgartenschau Exhibition Hall</i>	72
Figura 3.18 – Ilustrações gráficas de soluções técnicas para a impressão 3D: Sistema de portais (a), cabos suspensos (b), enxame (c), robótica (d) e combinado com dobradura (e).....	73
Figura 3.19 – Perspectivas 3D: Fôrmas de concreto em processo convencional (à esquerda); Método de molde treliçado com o uso de braço robótico (à direita).....	75
Figura 3.20 – Fotografia de treliças e o sistema de aplicação do concreto em obra.....	75
Figura 3.21 – Perspectiva 3D da construção de uma edificação com adobe e extrusão por camadas.....	76
Figura 3.22 – Fotografias: Superior - Adição de concreto com a técnica ‘ <i>contour crafting</i> ’; Inferior - Casa em concreto da WinSun montada com peças extrudadas em impressoras 3D.....	77
Figura 3.23 – Fotografia de impressora 3D imprimindo com concreto.....	78
Figura 3.24 – Fotografia da casa flutuante ‘ <i>Prvok</i> ’ em concreto digitalmente extrudado.....	79
Figura 3.25 – Fotografia da área externa da ‘ <i>Prvok</i> ’	80
Figura 3.26 – Fotografia do interior da ‘ <i>Prvok</i> ’	80
Figura 3.27 – Fotografia do processo produtivo da casa ‘ <i>Prvok</i> ’	80
Figura 3.28 – Diagrama de desvio da passagem da extrusão de concreto (imagem à esquerda) e fotografia da execução da extrusão do concreto representando o diagrama da imagem ao lado (imagem à direita).....	81
Figura 3.29 – Fotografias da casa de campo concluída: (a) Perspectiva oeste; (b) Sala de estar; (c) Grande angular da cobertura.....	81
Figura 3.30 – Perspectiva tridimensional do sistema robótico móvel de extrusão 3D.....	82
Figura 3.31 – Figura 3.31: Planta baixa esquemática do fluxo de trabalho no sítio de construção da casa de campo WJZ.....	83
Figura 3.32 – Ilustração gráfica dos componentes construtivos da casa de campo: Vala de fundação; Parede estrutural; Parede decorativa; Cobertura em arco; Cobertura Plana.....	83

Figura 3.33 – (a) Corte 2D da solução construtiva da fundação e seu respectivo encontro com paredes; (b) Fotografia do processo de impressão 3D da vala da fundação; (c) Fotografia do canteiro de obras com três braços robóticos em operação e as bases das paredes edificadas.....	84
Figura 3.34 – Fotografia noturna da obra acabada.....	84
Figura 3.35 – Fotografia interna da cozinha.....	84
Figura 3.36 – Fotografia do processo construtivo.....	85
Figura 3.37 – Fotografia da parede em produção.....	85
Figura 3.38 – Ilustração gráfica do conceito do canteiro de obras e do método construtivo.....	85
Figura 3.39 – Perspectiva 3D do projeto <i>AI Space Factory</i>	87
Figura 3.40 – Fotografia do protótipo fabricado por impressora 3D durante a terceira etapa da 3DPH.....	87
Figura 3.41 – Perspectiva 3D do projeto ‘ <i>Tera</i> ’.....	88
Figura 3.42 – Perspectiva 3D do interior do projeto ‘ <i>Tera</i> ’.....	89
Figura 3.43 – Fotografia externa da ‘ <i>3D-Printed Micro Home</i> ’.....	90
Figura 3.44 – Fotografia - Fachada frontal.....	90
Figura 3.45 – Fotografia - Detalhe da fachada.....	90
Figura 3.46 – Perspectivas 3D: Detalhes de encaixes de vigotas de madeira adicionadas por braço robótico: Adição da braçadeira à vigota (a); remoção da braçadeira do braço robótico (b); duas braçadeiras a espera de uma vigota (c); garra acoplada ao braço robótico adicionando uma vigota (d); pressão simultânea exercida pelas duas braçadeiras (e); remoção das braçadeiras pelo braço robótico (f).....	91
Figura 3.47 – Ilustração gráfica da sequência de ações desempenhadas por um braço robótico para a adição de 40 vigotas de madeira.....	92
Figura 3.48 – Perspectiva 3D de braçadeira robotizada utilizada para pressionar as vigotas.....	92
Figura 3.49 – Fotografia de parede de tijolos de barro.....	93
Figura 3.50 – Fotografia de braço robótico e parede.....	93

Figura 3.51 – Fotografias de um robô caseiro feito a partir de 5 mini servo motores SG90 Tower Pro, <i>jumpers</i> , cabos, um microcontrolador Arduino UNO, uma placa de ensaio para realizar as ligações e um computador.....	94
Figura 3.52 – Fotografia de equipamento da <i>Adapa Moulds</i> para a conformação de materiais a base de pistões.....	95
Figura 3.53 – Representação gráfica da linha de equipamentos de moldes adaptativos da <i>Adapa Moulds</i> para conformar materiais com dupla curvatura.....	95
Figura 3.54 – Fotografia de abrigo em concreto moldado pela <i>Adapa Moulds</i>	96
Figura 3.55 – Fotografia do pavilhão da BMW, ‘ <i>The Bubble</i> ’	96
Figura 3.56 – Perspectiva da estrutura digital em 3D do ‘ <i>The Bubble</i> ’	97
Figura 3.57 – Fotografia do processo de corte do isopor que serviu de molde para a fabricação dos vidros curvos do pavilhão da BMW, ‘ <i>The Bubble</i> ’	97
Figura 3.58 – Fotografia dos vidros encurvados por calor e a partir de fôrmas recortadas em <i>router</i> CNC.....	98
Figura 3.59 – Fotografia da porta de acesso do projeto da BMW, ‘ <i>The Bubble</i> ’	98
Figura 3.60 – Fotografia de dois braços robóticos conformando metais simultaneamente...	99
Figura 3.61 – Fotografia de peças de metal conformadas e unidas - juntas formam uma pele porosa autoportante.....	100
Figura 3.62 – Perspectiva 3D do scanner a <i>laser</i> verificando o trajeto percorrido pelo braço robótico após a formação de chapas metálicas, comparando o desvio desse trajeto com o original a partir do modelo tridimensional.....	100
Figura 3.63 – Fotografia da fachada lateral da ‘ <i>Ashin Cabin</i> ’	101
Figura 3.64 – Fotografia aérea da ‘ <i>Ashin Cabin</i> ’	101
Figura 3.65 – Fotografia interna da ‘ <i>Ashin Cabin</i> ’	102
Figura 3.66 – Perspectiva do corte da tora de madeira como processo construtivo da ‘ <i>Ashin Cabin</i> ’	103
Figura 3.67 – Fotografia externa do pavilhão de Chai et al. (2021) concluído.....	104
Figura 3.68 – Imagens da planta da estrutura do telhado: Área de trabalho com pilares (1), eixos dos vigamentos do telhado (2) e estrutura espacial do telhado representada a partir de seus eixos (3).....	104

Figura 3.69 – Ilustrações gráficas dos adesivos codificados para informar ao robô a sua localização.....	105
Figura 3.70 – Fachada do pavilhão com marcadores para referenciar o posicionamento do equipamento robótico.....	105
Figura 3.71 – Ilustrações gráficas: Braço robótico, estação de trabalho e veículo de transporte (figura à esquerda) e alcance do braço robótico (figura à direita).....	106
Figura 3.72 – Estação de trabalho multiuso (1): aplicação de cola (2) furo com broca (3), corte com serra circular (4) e serviços de tupia (5).....	106
Figura 3.73 – Fotografia do equipamento com ampliação à esquerda do ‘fator final’ do braço robótico, composto por câmera (<i>camera</i>), garra (<i>gripper</i>) e pistola de pregos (<i>nail gun</i>)....	107
Figura 3.74 – O equipamento em fase de execução da estrutura da cobertura.....	108
Figura 3.75 – Fotografias do equipamento durante a execução da estrutura: vista inferior da cobertura com os pontos de referência (à esquerda) e o braço robótico instalando as vigotas (à direita).....	108
Figura 3.76 – Ilustrações gráficas da estrutura espacial à esquerda e o resultado da simulação de um scanner 3D que verificou a precisão da localização <i>as built</i> da respectiva estrutura (a cor azul representa maior grau de precisão).....	108
Figura 3.77 – Fotografia da maquete da ‘Casa G’	110
Figura 3.78 – Fotografia do protótipo da ‘Casa G’	110
Figura 3.79 – Perspectiva axonométrica explodida dos componentes construtivos da ‘Casa G’	111
Figura 3.80 – Fotografia de Detalhe construtivo da ‘Casa G’	112
Figura 3.81 – Fotografia de CNC <i>router</i> cortando componentes da ‘Casa G’	112
Figura 3.82 – Perspectivas de estudos de implantação da “Casa G’	112
Figura 3.83 – Fotografia da ‘Casa Revista’ edificada no campus da UFRJ em 2015.....	113
Figura 3.84 – Fotografia da montagem da ‘Casa Revista’ desempenhada por alunos da FAU-UFRJ em 2015.....	113
Figura 3.85 – Ilustração gráfica da montagem de uma seção da casa.....	114

Figura 3.86 – Ilustração gráfica do esquema de corte de componentes construtivos delimitados pela chapa de compensado de 18mm de espessura a serem cortados em fresadora CNC.....	115
Figura 3.87 – Fotografia do protótipo de casa fabricado com estrutura em compensados de 18mm e vedação em compensado de 6mm.....	115
Figura 3.88 – Perspectiva 3D do sistema construtivo.....	116
Figura 3.89 – Perspectivas 3D do Processo criativo do sistema construtivo: um objeto 3D é identificado (a); Volumes 3D são seccionados em peças planificadas (b); Junções são criadas (c); objetos bidimensionais são criados (d).....	117
Figura 3.90 – Perspectivas 3D das famílias de componentes construtivos: vigas (a); conexões (b); treliças (c); vedações (d).....	117
Figura 3.91 – Diagramas: (a) Algoritmo de geração de possibilidades de desenhos a partir do sistema construtivo adotado; (b) parâmetros de desenho de arquitetura; (c) modelo geométrico; (d) simulação estrutural e análise.....	118
Figura 3.92 – Perspectivas 3D de variações a partir das possibilidades geométricas simuladas pelo algoritmo.....	118
Figura 3.93 – Fotografias: Processo de manufatura dos componentes construtivos (a); elementos bidirecionais fabricados (b); componentes encaixados uns aos outros (c).....	118
Figura 3.94 – Ilustração do projeto residencial desenvolvido pelo grupo TPED (perspectiva da casa posicionada acima seguida por sua respectiva planta baixa).....	119
Figura 3.95 – Fotografia do protótipo da residência em escala 1:6, com peças recortadas em equipamento de corte a <i>laser</i>	120
Figura 3.96 – Fotografia do pórtico da casa em escala 1:1.....	120
Figura 3.97 – Fotografia à esquerda demonstra uma conexão com êxito / fotografia à direita exemplifica um encaixe com o material danificado por conta de uso de força excessiva durante a montagem.....	121
Figura 3.98 – Fotografia demonstrando a finalização da estrutura da Casa ‘Sr. Manoel’.....	122
Figura 3.99 – Fotografias do transporte e montagem dos pórticos da Casa ‘Sr. Manoel’.....	123
Figura 3.100 – Fotografia do exterior da ‘Casa Conectada’ em exposição na CasaCor São Paulo edição de 2021.....	124
Figura 3.101 – Fotografia do processo de montagem da ‘Casa Conectada’.....	125

Figura 3.102 – Fotografia do interior da ‘Casa Conectada’ em exposição na CasaCor São Paulo edição de 2021.....	125
Figura 3.103 – Modelo 3D digital de uma fôrma de madeira para elemento de concreto desenvolvida digitalmente.....	126
Figura 3.104 – Fotografia de fôrma de concreto à direita e seu respectivo subproduto à esquerda.....	126
Figura 3.105 – Fotografia da fachada do projeto ‘CoBLOgó’.....	127
Figura 3.106 – Diagramas de Iluminância no interior da edificação ‘CoBLOgó’ no decorrer do ano - resultante da fachada em cobogós.....	128
Figura 3.107 – Fotografia do detalhe de execução da fachada do projeto ‘CoBLOgó’.....	129
Figura 3.108 – Fotografia da fachada do projeto ‘CoBLOgó’ em fase de execução.....	129
Figura 3.109 – Fotografia do interior da edificação ‘CoBLOgó’.....	130
Figuras do Capítulo 4:	
Figura 4.01 – Fotografia de caminhão da Cemaço saindo para a entrega de seus produtos.....	136
Figura 4.02 – Fotografia de um objeto (bicicleta) cortado no equipamento a <i>laser</i> da Cemaço - filial de Taubaté.....	136
Figura 4.03 – Fotografia da mesa de corte de 12m de extensão.....	137
Figura 4.04 – Fotografia da peça da figura 4.03 fora da mesa de corte.....	137
Figura 4.05 – Fotografia do processo de corte de chapa grossa de aço.....	137
Figura 4.06 – Fotografia de peça cortada pronta para entrega.....	137
Figura 4.07 – Fotografia de cortadora a plasma cortando aço na Grande Vitória.....	138
Figura 4.08 – Fotografia de cortadora a <i>laser</i> na Imagiton.....	138
Figura 4.09 – Fotografia de cortadora a <i>laser Multicut Konsber XN</i> na Imagiton.....	139
Figura 4.10 – Fotografia de fresadora CNC de 3 eixos na Q’arte.....	139
Figura 4.11 – Fotografia de cortadoras a <i>laser</i> na Q’arte.....	140
Figura 4.12 – Diagrama da interoperabilidade entre instituições da RMGV.....	142

Figura 4.13 – Montagem fotográfica com o acervo de equipamentos CAD/CAM da FINDESLAB.....	143
Figura 4.14 – Fotografia de equipamentos robóticos.....	144
Figura 4.15 – Fotografia de braço robótico no ISTEIO.....	144
Figura 4.16 – Fotografia de cortadora a <i>laser</i> no FINDESLAB.....	144
Figura 4.17 – Fotografia de fresadora CNC de metais no SENAI.....	145
Figura 4.18 – Fotografia de produto gerado em fresadora CNC de metais no SENAI.....	145
Figura 4.19 – Fotografia de torno CNC de metais no SENAI.....	145
Figura 4.20 – Fotografia da peça final de corte de material da <i>Multicut</i> da <i>Konsberg</i>	147
Figura 4.21 – Fotografia de um objeto sendo fabricado em uma impressora-3D no PPGAU da UFES.....	149
Figura 4.22 – Fotografia de braço robótico no processo de corte de chapa de granito.....	150
Figura 4.23 – Fotografia de braço robótico no processo de corte de chapa de granito.....	150
Figura 4.24 – Fotografia em detalhe do corte de granito.....	151
Figura 4.25 – Fotografia de robô manuseando telhas.....	151
Figura 4.26 – Fotografia de braço robótico manuseando tijolos cerâmicos.....	151
Figura 4.27 – Fotografia de componentes do protótipo da ‘Casa do Senhor Manoel’, projeto desenvolvido por professores e alunos do PPGAU da UFES.....	153
Figura 4.28 – Fotografia de pergolado na RMGV recortado em cortadora a CNC a <i>laser</i>	153
Figura 4.29 – Fotografia de escultura em aço na RMGV.....	154
Figura 4.30 – Fotografia da CASACOR ES 2022-luminárias recortadas em CNC <i>laser cutter</i>	154
Figura 4.31 – Fotografia da CASACOR ES 2022-luminárias executadas pela Tungstek.....	155
Figura 4.32 – Fotografia de painel da CASACOR ES 2019 executado pela Tungstek.....	155
Figura 4.33 – Fotografia da porta da Igreja Católica de Porto Canoa, Serra, ES, executada pela Tungstek.....	155

LISTA DE QUADROS

Quadros do Capítulo 4:

Quadro 4.01 – Empresas Contatadas na RMGV.....	132
Quadro 4.02 – Instituições Contatadas na RMGV.....	133

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos do Capítulo 1:

Gráficos 1.01 – Comparação entre a produtividade brasileira, americana e europeia na Construção Civil (dados de 2008).....	22
Gráfico 1.02 – Comparação entre prazos de licenciamento e construção no Brasil, EUA e UE (dados de 2008).....	23
Gráfico 1.03 – Fabricação mundial de máquinas-ferramenta (convencionais e com tecnologia CNC).....	26
Gráfico 1.04 – Porcentagem de estabelecimentos com máquinas CNC no Distrito Federal...	27
Gráfico 1.05 – Total de famílias inscritas no CadÚnico em situação de déficit habitacional em março de 2019, por macrorregião, em números percentuais.....	29
Gráfico 1.06 – Os dez municípios com maior déficit habitacional relativo no ES, por famílias inscritas no CadÚnico, em percentuais.....	29

Gráficos do Capítulo 2:

Gráfico 2.01 – Número de vezes que cada termo da computação digital apareceu na Literatura entre os anos 1978 e 2018.....	38
Gráfico 2.02 – Número de vezes que cada termo da computação digital apareceu na Literatura entre 1978 e 2018.....	39

Gráficos do Capítulo 3:

Gráfico 3.01 – Construção 3DCP em números de construções com essa tecnologia mundialmente, entre 1997 e 2018.....	73
---	----

Gráficos do Capítulo 4:

Gráfico 4.01 – Municípios da R.M.G.V. onde se encontram as sedes das empresas contatadas (em quantidade de empresas).....	134
Gráfico 4.02 – Área de atuação das empresas detentoras de tecnologia CAD/CAM disponíveis na R.M.G.V. (em porcentagem).....	135
Gráfico 4.03 – Tecnologia dos equipamentos CAD/CAM disponíveis na R.M.G.V. (em porcentagem).....	141
Gráfico 4.04 – Tecnologia dos equipamentos CAD/CAM subtrativos disponíveis na R.M.G.V.	

- Considera estabelecimentos comerciais e institucionais - (em quantidade de equipamentos).....	141
Gráfico 4.05 – Os materiais comportados dentre os equipamentos CAD/CAM aditivos e subtrativos disponíveis na R.M.G.V. (em quantidade de empresas).....	147
Gráfico 4.06 – Tamanho da área de trabalho dos equipamentos CAD/CAM disponíveis na R.M.G.V. - Dentre os equipamentos que lidam com chapas - (considerando uma prancha de MDF padrão de 1.830x2.750mm).....	148
Gráfico 4.07 – Volume da área de trabalho dos equipamentos CAD/CAM aditivos disponíveis na R.M.G.V. (4 ao todo: disponíveis em ambientes institucionais).....	149
Gráfico 4.08 – Equipamentos disponíveis na R.M.G.V. para pessoas físicas, jurídicas e comunidade acadêmica	151

LISTA DE ABREVIATURAS

ACM – *Aluminium Composite Material*

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numerical Control*

CC – *Contour Crafting*

CD – *Computação Digital*

FINDES – *Federação das Indústrias do Espírito Santo*

HIS – *Habitação de Interesse Social*

ISTEO – *Instituto Senai de Tecnologia em Eficiência Operacional*

MDF – *Medium-density Fiberboard*

NC – *Numerical Control*

NURBS – *Non-uniform Rational B-splines*

OSB – *Oriented Strand Board*

RMGV – *Região Metropolitana da Grande Vitória*

SENAI – *Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial*

UFES – *Universidade Federal do Espírito Santo*

UFRJ – *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

3DCP – *3D Concrete Printing*

SUMÁRIO

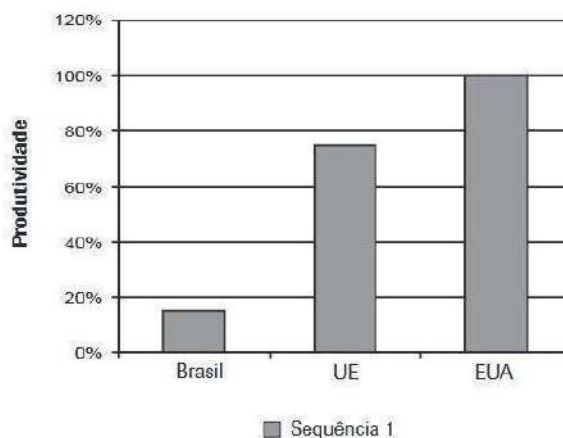
1. INTRODUÇÃO.....	22
2. MUDANÇA DE PARADIGMA: TECNOLOGIAS RELACIONADAS À FABRICAÇÃO DIGITAL....	33
2.1 O Projeto Digital: O Design a Partir de Parâmetros.....	36
2.2 A Fabricação Digital.....	44
2.2.1 CAD/CAM.....	48
2.1.2 A Customização em Massa.....	50
2.3 A Indústria 4.0 e o Conceito <i>File to Factory</i>	51
3. EXEMPLOS DE HABITAÇÕES DESENVOLVIDAS COM A FABRICAÇÃO DIGITAL.....	57
3.1 Conforme a Maneira como os Objetos são Produzidos.....	58
3.1.1 Subtrativa.....	60
3.1.1.1 Subtração com Fresadoras CNC.....	63
3.1.1.1.1 Subtração de Madeira com o Uso de Fresadoras CNC.....	64
3.1.1.1.2 Subtração de Madeira com o Uso de Fresadoras CNC e a Robótica.....	68
3.1.2 Aditiva.....	72
3.1.2.1 Aditivas Extrusivas.....	74
3.1.2.1.1 Extrusão de Concreto com o Uso de Impressoras 3D.....	76
3.1.2.1.2 Extrusão de Concreto com o Uso da Robótica.....	78
3.1.2.1.3 Extrusão de Terra como Matéria-prima com o Uso de Impressora 3D.....	84
3.1.2.1.4 Extrusão de Plástico como Matéria-prima com o Uso de Impressoras 3D.....	89
3.1.2. Adição de Componentes Construtivos com o Uso da Robótica.....	90
3.1.3 Formativa.....	94
3.1.3.1 Formativa - Conformação a Partir de Fôrmas.....	96
3.1.3.2 Formativa - Conformação sem o Uso de Fôrmas.....	99
3.2 A Produção Automatizada de Habitação Adotando Combinações de Diferentes Maneiras de Produção Digital.....	100
3.3 A Produção de Habitação Por Meio da Fabricação Digital no Brasil.....	109
4. OS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS NA INDÚSTRIA DA GRANDE VITÓRIA....	130
4.1 Metodologia de Pesquisa.....	130
4.2 Sistematização dos Dados e Análise.....	134
5. CONCLUSÃO.....	156
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
APÊNDICE.....	167
APÊNDICE 1.....	168

1. INTRODUÇÃO

As habitações brasileiras construídas não exploram o potencial tecnológico de equipamentos CAD (*Computer-aided Design*) / CAM (*Computer-aided Manufacturing*) predisponentes no comércio de serviços, assim como o potencial de customização que esses equipamentos permitem. A construção civil poderia explorar os recursos disponíveis no mercado, como blocos cerâmicos, chapas de madeira e metais, processando-os por meio de abordagens digitais de maneira a contribuir para a customização e otimização. Como consequência, as obras são improdutivas quando comparadas a outros países e não há emprego da sustentabilidade, por exemplo (AMORIM; MELLO, 2009, p. 395), como o caso recorrente de desperdício de matéria-prima. Muitas dessas questões poderiam ser exploradas desde a etapa de projeto, com o uso da parametrização por meio de sistemas generativos em prol de projetos arquitetônicos de habitação a fim de favorecer e potencializar a customização em massa e a sustentabilidade.

Amorim e Mello (2009) constata, com base em dados da Fundação Getúlio Vargas (gráfico 1.01), que a produtividade da construção civil brasileira é, aproximadamente, 80% menor do que a dos Estados Unidos.

Gráfico 1.01 – Comparação entre a produtividade brasileira, americana e europeia na Construção Civil (dados de 2008)

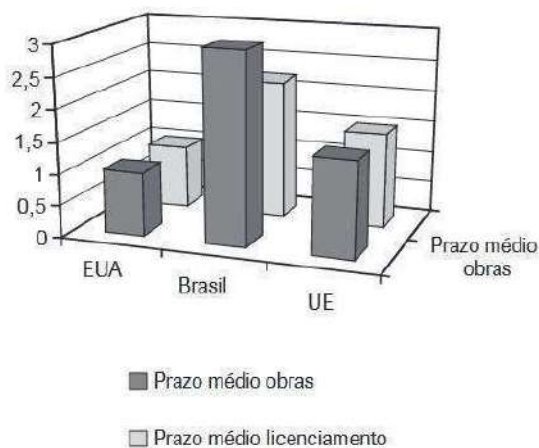


Fonte: Artigo científico (AMORIM; MELLO, 2009, p. 395)

Entretanto, esses mesmos autores também afirmam que, quando comparado à União Europeia e aos Estados Unidos, o Brasil está disparadamente à frente destes países no que se refere aos longos prazos de entrega das construções (gráfico 1.02) (AMORIM; MELLO,

2009, p. 395). Portanto, os prazos das obras que utilizam técnicas tradicionais culturalmente aceitas no Brasil são maiores do que em locais onde os sistemas inovadores são utilizados, e ainda possuem pouca sustentabilidade em decorrência de suas práticas.

Gráfico 1.02 – Comparação entre prazos de licenciamento e construção no Brasil, EUA e UE (dados de 2008)



Fonte: Artigo científico (AMORIM; MELLO, 2009, p. 395)

Os responsáveis que aplicam as técnicas mais utilizadas nas construções de habitações no Brasil não se preocupam com o seu impacto no meio ambiente, criando construções que geram muitos resíduos oriundos das técnicas construtivas tradicionais, isto é, o recorrente desperdício. Além disso, normalmente há o uso de fôrmas para a fabricação de estruturas em concreto armado, que, posteriormente, com o término da obra, se transforma em sucata junto com restos de tijolos e sobras de argamassas.

Além disso, o volume de entulho de demolição e construção é até duas vezes maior do que o volume de resíduos de lixo sólido urbano (PERINI, 2017, p. 51). O concreto, por exemplo, é responsável por 5% de todas as emissões globais de dióxido de carbono (COSTA, et al., 2020, p. 254). Portanto, reduzir o uso de entulho é ter compromisso com a sustentabilidade global.

No caso, se o uso de fôrmas para o concreto fosse reduzido, os resíduos pós-obra de materiais poderiam ser evitados. Entretanto, como o concreto ainda é um material muito utilizado por sua plasticidade e rigidez estrutural, sendo um material requerido principalmente em fundações, o seu uso deve ser otimizado de modo a evitar desperdícios.

É importante ressaltar também que a utilização de materiais ecologicamente corretos na construção civil brasileira auxiliaria na redução da 'Pegada Ecológica', como é o

caso do uso de estruturas em madeira, por exemplo, por ser um material proveniente de energia renovável. No entanto, todas estas decisões deveriam ser tomadas desde a fase inicial dos projetos, de modo a incorporar a sustentabilidade nos mesmos, conforme o pensamento de Motta e Aguilar (2009):

apesar dos maiores impactos ocorrerem nas fases de operação e manutenção, a maior possibilidade de intervenção no desempenho durante essas fases ocorre nas etapas de idealização, concepção e projeto. Portanto, ao se priorizar a implantação de estratégias de sustentabilidade nas fases de idealização, concepção e projeto de uma edificação, ter-se-á potencialmente uma edificação com melhor desempenho e o com menor custo para implantação de estratégias sustentáveis[...] (MOTTA; AGUILAR, 2009, p. 105).

Quanto ao projeto, a concepção arquitetônica não corrobora para que as construções de habitações sejam personalizadas, a fim de atender às demandas dos indivíduos ou às particularidades de um determinado grupo de pessoas. Para começar, a logística de construção ainda leva consigo diretrizes de projeto baseadas no modernismo e na fabricação em série (não que isso seja incorreto, mas não há a exploração de equipamentos e mídias digitais durante o projeto, sendo que esses poderiam potencializar a customização). Mendes (MENDES, 2014, p. 2) revela que

a questão da repetição e padronização na arquitetura – incluindo a habitação – tem sido discutida desde a Modernidade, após o advento da produção industrial ter influenciado a construção civil implicando em racionalidade e aumento da produção, a partir da padronização de projetos a elementos. O resultado dessas transformações levou ao desenvolvimento de uma arquitetura de massas, rompendo com as tradições construtivas locais e estabelecendo normas universais para acomodações mínimas (ROWE, 1993), monotonia e falta de qualidade dos espaços urbanos.

No caso da habitação, a repetição de plantas baixas-tipo ocasiona monotonia da diversidade arquitetônica, em termos formais, e também a ausência de personalização amparada no morador, no caso de empreendimentos que repetem casas serialmente (figura 1.01).

Ressalta-se também, com o advento das críticas pós-modernistas, que as residências não oferecem múltiplas funções ou até mesmo expansões que possam surgir a partir de novas necessidades em termos de programa de necessidades, que tendem a ser voláteis com o passar dos anos, com possíveis novos usuários e assim por diante. Segundo Borges (2016), Pupo (2009) e Silva et al. (2009), existe todo um potencial construtivo que não está alcançando a sua plenitude, devido à limitação constatada no ensino de projeto nas faculdades e no

avanço do conhecimento a respeito das novas tecnologias digitais, ocasionando em um avanço retrógrado, incondizente com o seu tempo. Como exemplo do que poderia ser feito, podemos citar as tecnologias digitais CAD (*Computer-aided Design*) / CAM (*Computer-aided Manufacturing*) e BIM (*Building Information Modeling*), as quais poderiam ser mais bem exploradas, assim como as técnicas de projeto com o uso de técnicas da fabricação digital e da customização em série (temas explanados mais adiante).

Figura 1.01 – Fotografia da Minha Casa, Minha Vida em São Julião, Piauí



Fonte: (LORES, 2012)

Segundo Ferro (*apud* BORGES, 2016, p. 291), a arquitetura brasileira tem sido feita de forma bastante elementar, sem muitas inovações. Pensando a respeito da habitação, sobre as casas produzidas pelo Programa Minha Casa, Minha Vida, o arquiteto Dr. Luiz Alberto Gouvêa diz: “parece uma plantação de casas” (GOUVÊA, 2016, p.158), ao se referir ao padrão linear de implantação e do modelo único de arquitetura que é edificada. No entanto, o objetivo desta pesquisa não é resolver os conflitos da habitação de interesse social (HIS) (mencionado aqui apenas como ilustração), e sim questionar sobre o panorama da construção de casas e como estas poderiam ser melhor exploradas não apenas formalmente, mas também com o uso de materiais que melhorem a logística de construção e desperdicem menos insumos. Por exemplo, é preciso maximizar o uso de materiais que são encontrados facilmente no varejo, como é o caso dos tijolos cerâmicos. Inclusive, o autor Rossi (*apud* Pires, Cenci e Neto, 2021, p. 181) relata que

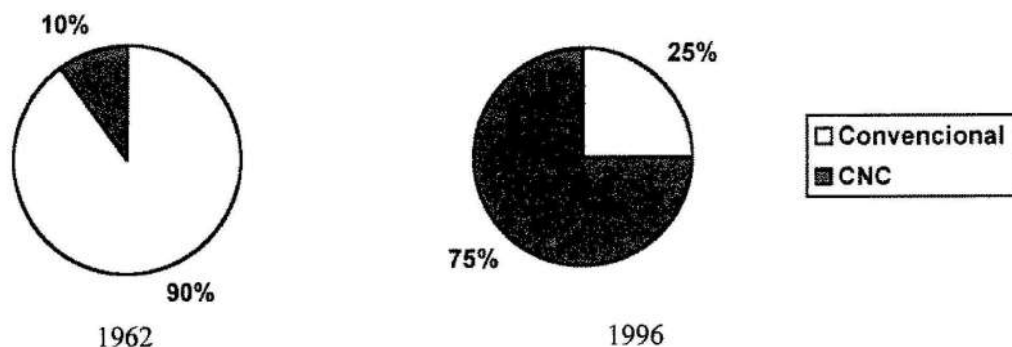
[...] o setor cerâmico é um dos principais ramos da construção e está presente em quase todos os canteiros de obras. Contudo, o processo ainda é muito artesanal, enfrentando grandes atrasos tecnológicos, sendo que ainda poucas empresas utilizam sistemas automatizados de produção e controle de qualidade de seus produtos.

Para que seja possível explorar o potencial tecnológico predisponentes na construção civil dos dias atuais, é imprescindível uma mudança de paradigma na concepção e na execução de projetos arquitetônicos de habitações, de modo que seja possível incorporar processos digitais para maximizar o potencial construtivo com execuções precisas, plantas baixas adequadas às necessidades de seus usuários, além de incorporar maior grau de sustentabilidade em todo o processo construtivo (desde a escolha por materiais e métodos construtivos que venham a reduzir desperdícios). A disponibilidade de equipamentos com tecnologia CAD/CAM permite ao projetista conceber e executar projetos com essas características.

Alguns autores defendem que os equipamentos requeridos para a fabricação digital, como é o caso de equipamentos CNC (*Computer Numerical Control*) e da robótica, estão disponíveis aos projetistas. É o caso de Gramazio e Kohler (2008) que defendem que a robótica está disponível nas indústrias desde meados do século XX. Silva et al. (2009) afirmam que a disponibilidade de equipamentos CNC na indústria é uma realidade; de Silva, Bridges e Lima (2010) constataam a presença de máquinas CNC na indústria do Distrito Federal; e Simon (2001) que quantificou o número de empresas brasileiras detentoras de equipamentos CNC em suas sedes.

Simon (2001, p. 9) também relata que o início da utilização dos equipamentos com tecnologia CNC no mundo ocorreu por volta de 1950. Em 1962, a produção mundial de equipamentos CNC representava um percentual de apenas 10% do total de máquinas-ferramenta produzidas (gráfico 1.03). Em 1996, 34 anos depois, esse mesmo percentual correspondia a 75% de ferramentas CNC produzidas (DEGARMO et al. 1996, *apud* SIMON, 2001, p. 9).

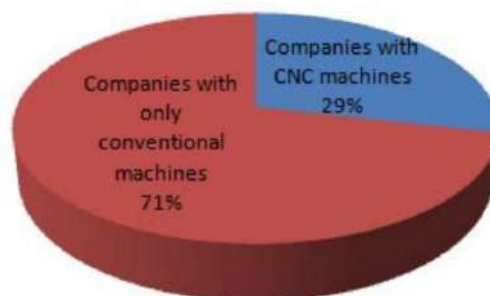
Gráfico 1.03 – Fabricação mundial de máquinas-ferramenta (convencionais e com tecnologia CNC)



Fonte: Dissertação de Mestrado (DEGARMO et al., 1996, *apud* SIMON, 2001, p. 9)

No caso do Brasil, em pesquisa realizada em 2010 por Silva, Bridges e Lima (2010), cujo objetivo era compreender o cenário da indústria CNC no Distrito Federal, do total de empresas consultadas³, 29% detinham equipamentos CNC (gráfico 1.04).

Gráfico 1.04 – Porcentagem de estabelecimentos com máquinas CNC no Distrito Federal



Fonte: Artigo científico (SILVA; BRIDGES; LIMA, 2010, p. 164, tradução nossa)⁴

Em 2016, em levantamento realizado pela Aranda Editora, 9.349 empresas que utilizavam máquinas-ferramenta de corte e conformação de metais foram consultadas para responder um questionário a respeito do uso de ferramentas CNC em seu processo produtivo. Desse total, apenas 481 empresas responderam corretamente o questionário, representando um percentual de 5,14% do total (REZENDE; SOUZA, 2016, p. 13). Desse percentual, 25,3% detinham equipamentos CNC em 2016, ao passo que em pesquisas realizadas similarmente pela mesma editora em outros anos, o resultado foi de 8,4% em 2004, 8,65% em 2006, 12% em 2008, 12,1% em 2010, 18,1% em 2012 e 21,1% em 2014 (REZENDE; SOUZA, 2016, p. 13).

Ressalta-se que esse levantamento considerou apenas as empresas de corte e conformação de metais, e os dados levantados poderiam ser de empresas que não permitiam o acesso dos equipamentos CNC ao público externo, como ocorre, por exemplo, com as indústrias automobilísticas e estaleiras. Portanto, a motivação para a realização desta pesquisa foi realizar um levantamento das empresas que utilizam equipamentos com tecnologia CAD/CAM que disponibilizam seus equipamentos por meio da prestação de serviços, de modo que esses possam estar ao alcance dos projetistas. Aliás, a resposta do

³ Não foi informado na pesquisa o total de empresas consultadas.

⁴ “Percentage of companies with CNC technologies.”.

arquiteto Isaac Michan⁵ (AGENCIA, 2023, tradução nossa) a respeito da disponibilidade de ferramentas digitais em escritórios de arquitetura é categórico:

creio que existem escritórios que estão pensando em projetar com ferramentas digitais, e ao mesmo tempo construir com a tecnologia que está ao seu alcance, que pode ser a mão de obra local. Não é uma ideologia pré-concebida, é pensada com o que está à mão, neste caso ferramentas digitais e é igualmente construída com o que o contexto oferece, mão de obra local e até artesanal. É uma noção de '*Digital Craft*' [...]⁶.

Desse modo, a partir do pensamento de Michan, o projetista deve de antemão estudar o seu mercado de modo a saber quais são os meios disponíveis para a concretização de sua arquitetura, sejam digitais ou não. Com isso, a presente pesquisa tem como pretensão levantar os estabelecimentos que utilizam a tecnologia CAD/CAM na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), de modo a averiguar a presença destes em uma região metropolitana que está de fácil acesso ao pesquisador e possui índices de *déficit* habitacional.

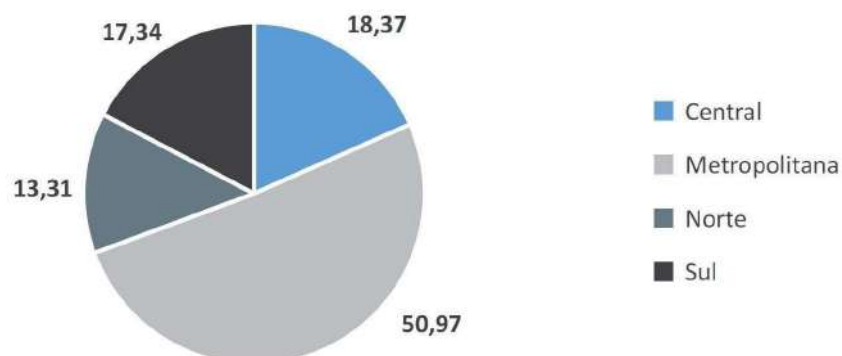
Para contextualização, a RMGV é composta por sete municípios: Cariacica, Fundão, Guarapari, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória, os quais detêm aproximadamente 50% de toda a população do estado, em uma área que representa cerca de 5% do território do Espírito Santo (COMDEVIT, 2023). Todavia, uma parcela significativa dessa população encontra-se em situação de *déficit* habitacional (gráfico 1.05), justamente na região metropolitana, que corresponde a 50,97% do total de famílias no estado do Espírito Santo cadastradas no sistema CadÚnico (IJSN, 2019).

Dentre os dez municípios com maiores *déficits* habitacionais, os quatro primeiros são integrantes da RMGV (gráfico 1.06). Apesar desta pesquisa não ter enfoque no *déficit* habitacional, há um potencial de fabricação de habitação na RMGV, a saber que há uma demanda para tal.

⁵ Arquiteto com atuação na Cidade do México, fundador do escritório de arquitetura *Michan Architecture*, concebe projetos com o auxílio de técnicas da fabricação digital e em 2020 recebeu o prêmio: *League Prize for Young Architects + Designers by the Architectural League of New York*.

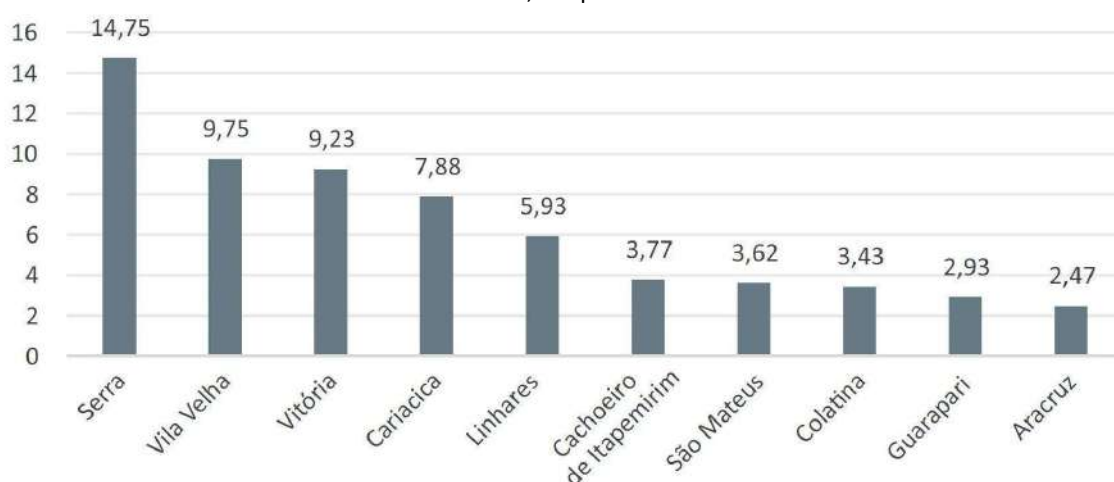
⁶ "I think there are offices that are thinking about designing with digital tools, and at the same time building with the technology that is within reach, which can be local manual labor. It is not a preconceived ideology, it is designed with what is at hand, in this case digital tools and is equally built with what the context offers, local and even artisanal labor. It is a notion of '*Digital Craft*', which I'm not saying I invented this way of working, not at all."

Gráfico 1.05 – Total de famílias inscritas no CadÚnico em situação de déficit habitacional em março de 2019, por macrorregião, em números percentuais



Fonte: (CadÚnico, *apud* IJSN, 2019, p. 19)

Gráfico 1.06 – Os dez municípios com maior déficit habitacional relativo no ES, por famílias inscritas no CadÚnico, em percentuais



Fonte: (CadÚnico, *apud* IJSN, 2019, p. 22)

O objeto desta pesquisa é a fabricação digital, e não a prototipagem rápida. Ou seja, somente serão considerados os equipamentos e as soluções construtivas que dizem respeito à escala 1:1, de modo a possibilitar a produção de habitações; não de modelos reduzidos. Além disso, o estudo abarcou as tecnologias disponíveis no âmbito mundial, mas, sendo realizado um recorte na Região Metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil, a fim de identificar e analisar quais tecnologias já foram empregadas ou quais possuem potencial de uso na mesma região.

Como justificativa, é preciso pesquisar novos meios de produção de habitação cuja intenção é melhorar a qualidade da arquitetura, dos processos construtivos e que sejam ambientalmente favoráveis às demandas de cada usuário.

A fabricação digital e as tecnologias digitais oferecem este potencial além da possibilidade de exploração de uma grande gama de materiais e formas que podem ser

trabalhadas quando associadas ao processo de criação e emprego de técnicas e tecnologias CAD/CAM.

Os processos fabris da construção civil também podem se beneficiar das tecnologias digitais, sendo possível melhorar a logística de construção, a otimização no tempo de construção e na qualidade de execução devido à precisão dos equipamentos CNC. Já o meio ambiente também pode ser resguardado com a minimização do desperdício de matéria-prima e pela potencialidade de uso de materiais de fontes renováveis.

O objetivo geral é pesquisar tecnologias vinculadas à fabricação digital da arquitetura capazes de serem aplicadas na produção de edificações habitacionais na Região Metropolitana da Grande Vitória.

Já os objetivos específicos são:

- Elaborar um quadro teórico sobre as tecnologias relacionadas à fabricação digital. (metodologia adotada: revisão bibliográfica);
- Analisar casos de edificações produzidas por meio das tecnologias digitais e identificar o atual panorama internacional/nacional sobre esse tema (metodologia adotada: exemplos de casos);
- Mapear as tecnologias da fabricação digital disponíveis na indústria da Grande Vitória que poderiam ser utilizadas para a fabricação de habitações ou elementos construtivos dessas (metodologia adotada: estudo de campo);
- Pesquisar as melhores soluções tecnológicas da fabricação digital para a construção de casas em solicitações diversas considerando a acessibilidade aos equipamentos em função do recorte territorial - sustentabilidade, tempo de execução, facilidade de transporte, assim por diante - (metodologia adotada: estudo bibliográfico/estudos de casos);
- Desenvolver uma tabela síntese identificando as soluções tecnológicas estudadas na Grande Vitória, de modo que contemple, entre outros: tecnologia dos equipamentos CAD/CAM, dimensões de suas áreas de trabalho, localização na RMGV, materiais comportados, área de atuação das empresas e a disponibilidade desses equipamentos para o público (metodologia adotada: estudo de campo).

Esta pesquisa adota como metodologia científica uma abordagem teórica, com base em referências bibliográficas, e uma abordagem prática, por meio de pesquisa de campo, sendo esta realizada para a obtenção de dados a fim de mapear as tecnologias disponíveis na

RMGV. Esse trabalho é embasado na fabricação digital e na customização em massa como teorias norteadoras.

Os objetivos desta pesquisa têm caráter exploratório, o qual pretende-se obter maior aprofundamento sobre o tema (GIL, 1993) por meio de procedimentos que analisam as referências bibliográficas acerca das tecnologias do campo da fabricação digital específicas para a produção na escala 1:1, e, que sejam possíveis de serem empregadas na produção de habitação. A pesquisa também apresenta exemplos de casos em que as habitações foram produzidas por meio de equipamentos e técnicas de fabricação digital.

Os exemplos selecionados ilustram a aplicabilidade de técnicas de fabricação digital e customização em massa na construção de residências. Todos os exemplos de casos demonstrados nesta pesquisa foram analisados seguindo três princípios: o primeiro identifica as informações gerais sobre o projeto, tais como o seu conceito, o método construtivo e os equipamentos utilizados. Esse método construtivo segue a categorização adotada pela maioria dos pesquisadores da área da fabricação digital, que é dividida em três grupos de acordo com as técnicas: subtrativa, aditiva e formativa⁷ (PUPO, 2009, p. 41). O segundo princípio revela o contexto da implementação, como o local e a situação de implantação de cada exemplo de caso. O terceiro mostra o tipo de logística adotada, se a arquitetura foi fabricada *in loco* ou se transportada até o sítio de implantação.

Quanto aos procedimentos metodológicos, esta pesquisa engloba:

- Revisão da literatura (presente em todos os capítulos) a respeito do tema abordado.

Análise das técnicas e equipamentos da fabricação digital, e exemplos de casos de habitações produzidas utilizando a fabricação digital para a construção de casas no mundo e no Brasil;

- Estudo de campo para identificar e delimitar as empresas e os equipamentos predisponentes na indústria da Região Metropolitana da Grande Vitória para catalogar aquelas que poderiam ser utilizadas para a fabricação de habitações, ou partes de habitações, feitas com o auxílio dos equipamentos da fabricação digital na RMGV:

1. Identificar e mapear os estabelecimentos que disponibilizam as tecnologias abordadas. Aspecto empírico da pesquisa;

⁷ Os modos de produção automatizada para a arquitetura e construção também podem ser categorizados por outras duas vias: pela finalidade (se pela prototipagem rápida ou pela fabricação digital) ou pelo número de dimensões dos equipamentos (PUPO, 2009, p. 41).

2. Tabela síntese com os equipamentos, tecnologias, respectivos usos, endereços e área de atuação das empresas pesquisadas.

Quanto aos instrumentos de pesquisa, essa foi realizada visando responder às seguintes indagações:

- **Como?** Entrar em contato com sindicatos, federações de indústrias, empresas metalúrgicas, moveleiras e gráficas para compreender o panorama da utilização de equipamentos do campo da fabricação digital na Grande Vitória (empresas que divulgam ter equipamentos CNC ou que foram indicadas por profissionais e outras empresas/instituições contatadas);

- **Com quais meios?** Ligações, entrevistas e visitas *in loco* quando houver o uso de equipamentos de fabricação digital (quando a visitação for permitida);

- **Produto:** Desenvolver uma tabela síntese com os equipamentos, tecnologias, respectivos usos, materiais comportados, endereços e área de atuação das empresas consultadas;

- **Provocação:** Como essas indústrias poderiam contribuir para a fabricação de habitação na Região Metropolitana da Grande Vitória?

Os contatos foram realizados inicialmente com empresas de diversas áreas, institutos, federações, sindicatos e instituições de ensino. O primeiro contato buscou reconhecer aqueles que prestam serviço na área para o usuário comum, como é o caso de atividades de comunicação visual, metalurgia, marcenaria e artesanato. E o segundo teve o objetivo obter o cadastro de institutos e instituições diversas com a possível prestação de serviço direto à sociedade.

As seguintes instituições foram contatadas:

- FINDES - Federação das Indústrias do Espírito Santo;
- SENAI - Instituto Senai de tecnologia;
- FINDESLAB (SENAI/FINDES);
- FUNDAP - Fundo para desenvolvimento das Atividades Portuárias;
- SINDUSCON ES;
- SINDIFERES (Indústrias metalúrgicas);
- SINDIMÓVEIS.

A consulta às instituições de ensino teve caráter apenas consultivo para compreender a existência de equipamentos de tecnologia CAD/CAM e verificar se estão disponíveis aos

estudantes. Foram analisadas também informações que pudessem auxiliar na elaboração da conclusão gerada a partir da análise do mercado.

Os seguintes cursos de bacharelado em arquitetura e urbanismo presentes na RMGV foram obtidos a partir do portal e-MEC (E-MEC, 2022):

- UFES (Universidade Federal do Espírito Santo);
- UVV (Universidade de Vila Velha);
- MULTIVIX;
- FAESA;
- FINAC (Faculdade Nacional);
- SALESIANO (Centro Universitário Salesiano).

2. MUDANÇA DE PARADIGMA: TECNOLOGIAS RELACIONADAS À FABRICAÇÃO DIGITAL

A produção de arquitetura com a utilização de novas tecnologias e equipamentos digitais requer o conhecimento de temas que se inter-relacionam. O desenvolvimento de novos *softwares* contribuiu para facilitar a organização e manipulação de dados, de modo que o papel e o nanquim não podem representar com tanta precisão de detalhes. O ambiente virtual, como é o caso de modelos tridimensionais, permite a visualização de uma determinada geometria, a qual pode ser gerada a partir de dados relevantes ao projeto.

Os parâmetros geradores de projeto são importantes nesse cenário digital. Logo, torna-se necessário o conhecimento a respeito de novas tecnologias e processos construtivos, para que haja uma mudança de paradigma no processo de projeto. Somado a isso, a execução em escala real de um modelo arquitetônico digital é auxiliada por novas tecnologias e processos construtivos, da área de fabricação digital, com o uso de tecnologias CAD/CAM. Frisa-se que por meio de um sistema construtivo *lean*⁸ é possível gerar projetos customizados em massa para a arquitetura. Além disso, o projetista que utiliza essas tecnologias, tanto a nível de idealização como de execução, deve ter a compreensão do que é a indústria 4.0 e o conceito *file to factory* para concretizar uma arquitetura fabricada com o auxílio de equipamentos digitais.

⁸ O termo *lean*, ou enxuto, é uma ferramenta, um método de manufatura e uma filosofia de gerenciamento. A customização em massa é um subproduto desta filosofia enxuta (ALARCÓN, 1997, p. 2).

Sendo assim, todos esses conceitos são tratados neste capítulo de modo a ilustrar a relevância da mudança de paradigma a partir da concepção do projeto arquitetônico nesse cenário digital, o que é relevante para a pesquisa, visto que deve ter uma mudança de abordagem projetual desde a sua gênese, de modo a permitir a maximização do potencial que as mídias e equipamentos digitais possibilitam.

Em prol de uma arquitetura diversificada em termos formais e funcionais, torna-se necessária uma mudança de paradigma tanto na concepção como na execução de projetos habitacionais como um todo no Brasil, principalmente os de baixo custo que tendem a ser padronizados. Para melhor elucidar as transformações ocorridas na arquitetura nos últimos séculos, é crucial compreender a evolução da tectônica na arquitetura.

O conceito de tectônica teve início com os gregos com a palavra *tekton*, cujo significado é tanto um ‘carpinteiro’ como um ‘construtor’ (FRAMPTON, *apud* OXMAN, 2012, p. 431). Portanto, o ‘saber fazer’ e o ‘saber edificar’ são indissociáveis para a produção da arquitetura e este conceito está associado com a arquitetura vernacular (OXMAN, 2012, p. 430). Há um significado poético e sublime por detrás da concepção da tectônica vernacular (OXMAN, 2012, p. 430).

O arquiteto deveria saber a respeito das propriedades dos materiais e como os mesmos poderiam ser manipulados para obter diversas formas e estruturas. Mais recentemente, durante o período modernista, foi possível notar uma nítida distinção entre arquitetura e estrutura:

para Frampton, as contribuições para a forma arquitetônica tanto da integração da estrutura como da construção, espaço e ordem são contribuições singulares da arquitetura moderna. Ele argumenta que a arquitetura modernista é mais sobre estrutura e construção do que espaço e forma abstrata. [...] A sua teoria mantém um equilíbrio entre estrutura/construção e espaço/forma. Esta interpretação expandida também aproxima a definição contemporânea para a qual a fabricação e a manufatura são vistas como sistemas informados digitalmente. (OXMAN, 2012, p. 431, tradução nossa)⁹.

⁹ “For Frampton, the integration of structural and constructional contributions to architectural form, space and order is one of the unique contributions of modern architecture. He argued that modern architecture is more about structure and construction than space and abstract form. [...] his theory maintains a balance between structure/construction and space/form. This expanded interpretation also brings it closer to a contemporary definition in which fabrication and manufacturing are viewed as digitally informed systems.”.

Essa separação da estrutura da vedação permitiu aos modernistas, a planta livre, uma vantagem para a customização, sendo possível quebrar paredes internas em eventuais reformas ou necessidades que somente o tempo poderá necessitar.

Enquanto o modernismo separava a forma, a estrutura e a superfície, a tectônica informatizada, cujo design têm por base o material, o resultado é a integração entre forma, estrutura e o próprio material, assim como do respectivo processo de fabricação/construção. Como resultado, há uma maior valorização do material e da sua respectiva produção na definição do termo tectônica¹⁰ (OXMAN, 2012, p. 431), uma vez que é possível simular as potencialidades de suas propriedades com a utilização de ferramentas digitais.

Similarmente, Stavric e Marina (2011) defendem que desde o século XVIII a forma urbana e arquitetônica estava centrada em arquétipos, sendo que a arquitetura se espelhava ou na natureza, que servia como referência para o conceito de abrigo primitivo ou, na arquitetura como processo de produção de peças funcionais, advinda da era da industrialização. Tal referência vai ao encontro à ideia de Oxman (2012), no sentido de que o modernismo tinha por base a produção de arquitetura ou forma urbana a partir de tipologias fixas, pré-determinadas.

Entretanto, a forma arquitetônica e urbana não pode ser pré-definida por tipologias específicas, pois essas não permitem a compreensão do processo de criação de forma arquitetônica e urbana como um todo. Esses autores defendem que é preciso uma mudança de paradigma, isto é, romper com essa tradição de formas ideais e aderir a um processo de busca por formas que sejam dinâmicas; de mudanças que podem gerar um resultado complexo (STAVRIC; MARINA, 2011, p. 10).

Portanto, fica evidente que nos últimos vinte anos houve um resgate da essência da tectônica vernacular, tanto na noção das propriedades fabris como no conhecimento da mecânica dos materiais. A tendência da arquitetura por vir é de uma nova terminologia desta tectônica, conforme introduzido por Rivka Oxman (2012), a da 'tectônica informada'¹¹, de maneira que

[...] a tectônica informada, no design baseado no material, é mediada por ser computacionalmente informada por um conhecimento explícito do seu respectivo

¹⁰ "While modernism separated shape, structure and surface, tectonics in material-based design culture integration is emphasized. As a result the integrating of form, structure, material and their fabrication/construction process return material and production considerations to the definition of the tectonic."

¹¹ 'Informed Tectonics'.

design, de sua manufatura e de sua fabricação¹² (OXMAN, 2012, p. 434, tradução nossa).

Desse modo, as tecnologias digitais e o conhecimento das técnicas fabris são relevantes para todo o processo de produção da arquitetura na era informatizada.

Ainda neste contexto, Oxman (2012) demonstra que a arquitetura na era informatizada deve abarcar três pontos: a informática, o tectônico e o material. Atualmente, com as tecnologias digitais, é possível mesclar estrutura com a pele. De tal modo, a arquitetura fica esteticamente fluída, harmônica e funcional, tudo ao mesmo tempo (GIOVANNINI, 200b, *apud* KOLAREVIC, 2001, p. 275).

A informática auxilia principalmente na precisão e no controle de dados, tanto no uso de *softwares* com controles de parâmetros, quanto na utilização de *hardwares* que podem ser compreendidos como os equipamentos que fazem a leitura dos dados digitais, transmitidas com exatidão para o equipamento, auxiliando com precisão durante a fase de execução.

Sendo assim, o tectônico digital resulta da exploração formal da precisão dos equipamentos digitais, sendo possível mesclar estrutura com vedações para formar superfícies complexas sem muitas dificuldades, explorando as propriedades e potencialidades do material, já que foram auxiliadas pela computação.

Agora, o projetista é capaz de compreender as propriedades mecânicas dos materiais, e, somado isso ao ambiente virtual, é possível executar formas contínuas e dinâmicas cujas geometrias podem ser controladas por meio de parâmetros.

2.1 O Projeto Digital: O Design a Partir de Parâmetros

A concepção arquitetônica na era digital é regida pela manipulação de dados para a obtenção de formas: o que é denominado como parametricismo. Segundo Woodbury (2010, p. 11) o parametricismo não trata mais do uso do papel, lápis e borracha para desenhar. Agora, partes de um design estão relacionadas e mudam conjuntamente em uma maneira coordenada. Não é mais necessário apenas adicionar e apagar (referência ao uso do lápis e da borracha), mas além desses métodos é possível relatar e reparar.

¹² “[...] *Informed tectonics, in material-based design, is mediated, by being computationally ‘informed’ by explicit knowledge of its design, its making and fabrication.*”.

Este processo requer um pensar constante a respeito de relações entre as partes permanentes daquelas que foram apagadas. Segundo aquele mesmo autor, o desenho paramétrico depende da definição de relações entre partes, sendo o designer responsável pela fase de definição de relações como uma parte integral no sentido mais amplo do processo de *design*, sendo que isso depende da sua habilidade e vontade em criar tais relações.

Neri Oxman (2007, p. 666) compactua com esse pensamento de Woodbury (2010), o qual a autora diz que o anseio por formas complexas, como ‘formas livres’¹³ e ‘não estandardizadas’¹⁴, têm levado o discurso a respeito de questões de representação de forma para questões de geração de forma. É necessário que o *designer* dê um passo para trás, para compreender e definir a lógica por detrás do *design* como um todo.

Gramazio e Kohler (2008) relatam que a lógica do *design* pode ser percebida, mas não explicada por inteiro. O importante não é mais a forma final, mas o processo para se obter a forma¹⁵. Esse processo de desenvolvimento de relações requer uma anotação formal e introduzem novos conceitos que vão além do ‘*design thinking*’¹⁶ (WOODBURY, 2010, p. 24).

O parametricismo permite mais de uma opção como resultante de um processo de *design*, onde há relação em uma larga gama de dados, como quando ocorre, por exemplo, no processo de projeto de uma residência habitacional. O parametricismo é tão relevante para o cenário arquitetônico dos dias atuais como dos futuros, que segundo Schumacher (2009, p. 15), é considerado como um novo estilo arquitetônico *à posteriori* do movimento modernista.

Para se ter um panorama desse cenário, a ascensão da informática na arquitetura culminou no surgimento de inúmeros termos que estão inter-relacionados nessa era de projeto auxiliado pela computação digital (CD), ressaltando o parametricismo como o termo buscado mais recorrente. Os autores Caetano, Santos e Leitão (2020) realizaram um estudo acerca da taxonomia desses termos, para averiguar quais são os mais frequentes em publicações nos últimos anos.

¹³ Termo original em inglês utilizado no texto original: ‘*free form*’ (OXMAN, 2007, p. 666).

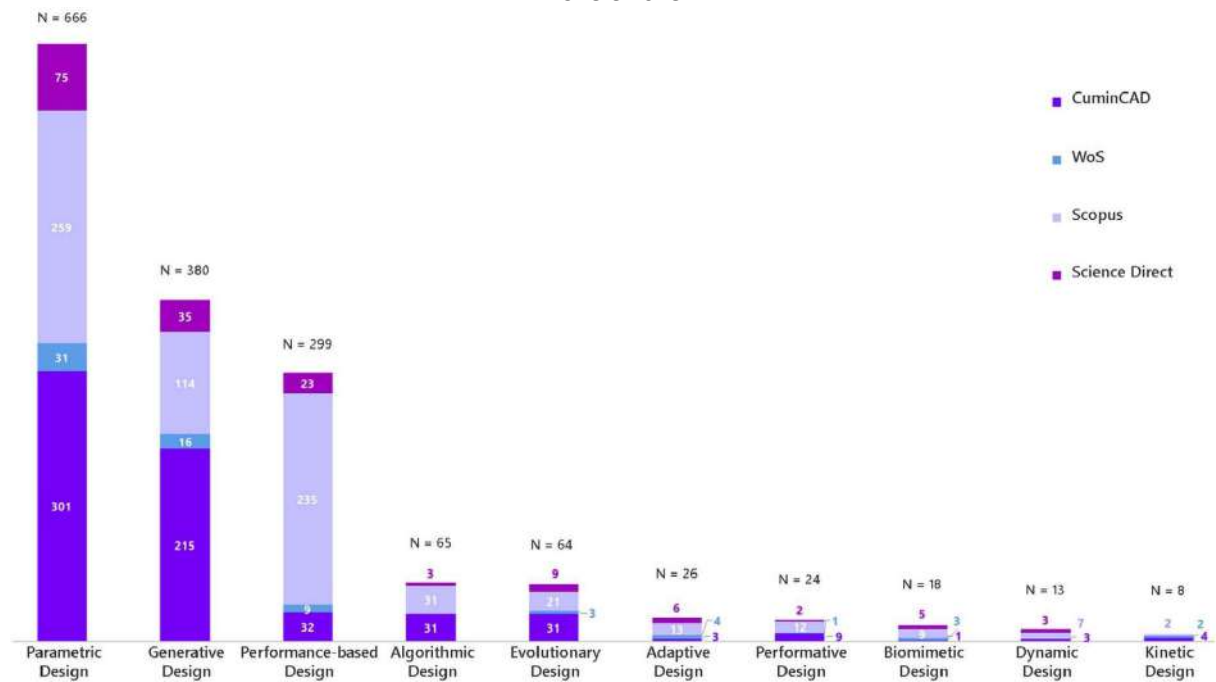
¹⁴ Termo original em inglês utilizado no texto original: ‘*non-standard*’ (OXMAN, 2007, p. 666).

¹⁵ Esses autores explicam isso por meio do termo *digital materiality*, onde os dados e os materiais estão inter-relacionados, assim como a programação e a construção. Por meio da fabricação digital, o projetista tem capacidade de controlar o processo de manufatura ao controlar dados de design. O material torna-se informado, enriquecido pela informática, em um processo de lógica digital (GRAMAZIO, KOHLER, 2008, p. 7-8).

¹⁶ Uma metodologia de trabalho que envolve as atividades de inovação com uma filosofia de desenho centrada nas pessoas (BROWN, 2008, p. 3).

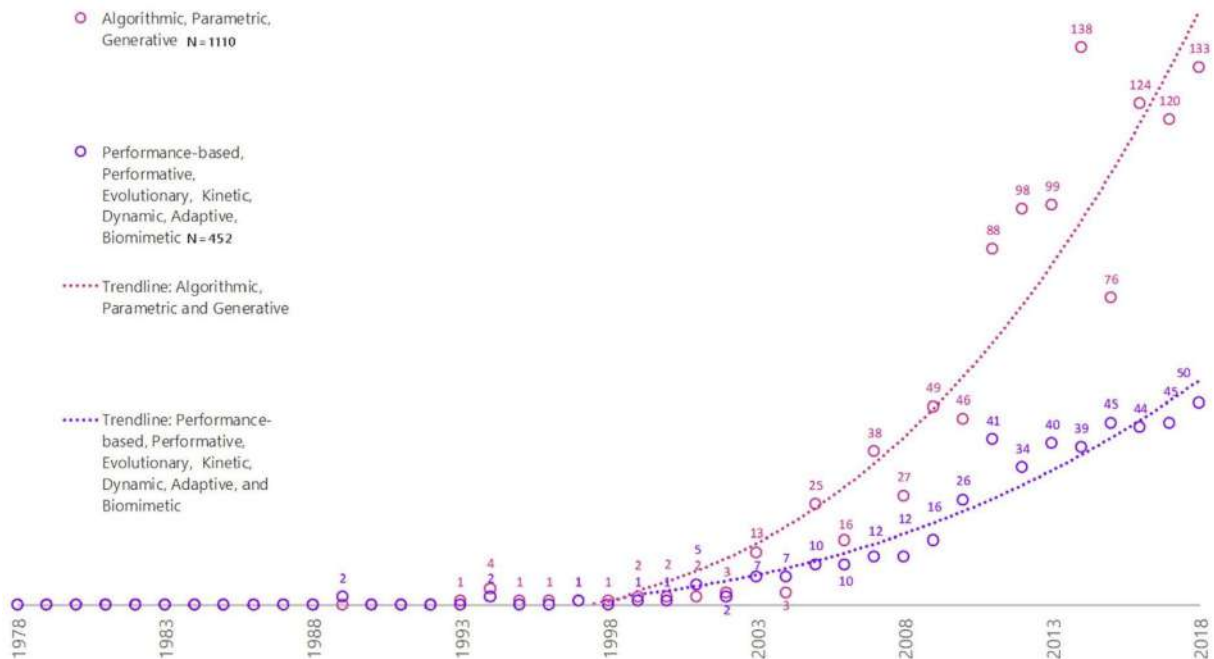
O gráfico 2.01 demonstra o número de vezes que cada termo da computação digital apareceu na literatura entre os anos de 1978 e 2018, sendo o design paramétrico aquele com o maior número de publicações, seguido pelo design generativo. Cronologicamente, é possível observar no gráfico 2.02 o quantitativo que cada termo relacionado à computação digital apareceu na literatura entre 1978 e 2018. Portanto, é possível constatar a relevância da parametrização e dos sistemas generativos no processo de design.

Gráfico 2.01 – Número de vezes que cada termo da computação digital apareceu na Literatura entre os anos 1978 e 2018



Fonte: (CAETANOS; SANTOS; LEITÃO, 2020, p. 291)

Gráfico 2.02 – Número de vezes que cada termo da computação digital apareceu na Literatura entre 1978 e 2018



Fonte: (CAETANOS; SANTOS; LEITÃO, 2020, p. 291)

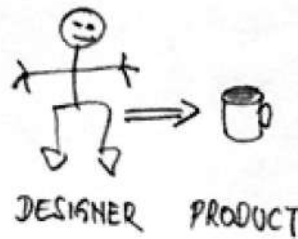
No entanto, esse pensar a partir de parâmetros não se inaugura nos dias atuais. Mitchell (1975), em 1975, ilustra inúmeras situações em que dados são manipulados para a obtenção de um resultado outro, que não seja no campo do óbvio. Aristóteles é citado, onde este demonstra que existem diversas possibilidades formais para se constituir uma cidade (MITCHELL, 1975). O resultado sempre será uma cidade, mas as possibilidades formais são diversas. O que muda é a abordagem de como manipular dados.

Para Mitchell (1975), essas situações, quando há a busca por meios outros de se obter um resultado para um determinado problema, são categorizadas como sistemas generativos. Celani, Vaz e Pupo (2013, p. 25) convergem a partir dessa ideia, a qual autores dizem que os sistemas generativos são úteis quando existe a necessidade de: “dar origem a um grande número de soluções possíveis”, sendo relevantes em ao menos uma dessas situações: onde há a otimização de soluções de problemas (a geração e testagem de várias possibilidades de soluções para determinar a melhor alternativa dentre as testadas), geração de família de objetos (busca por inúmeras soluções similares) e exploração (para encontrar a solução satisfatória ou mais equilibrada).

Os autores Fischer e Herr (2004) sintetizam o processo de design com e sem o uso dos sistemas generativos. Quando não há o uso desses sistemas, o *designer* é o responsável pelo produto final (figura 2.01), enquanto, quando há o uso dos sistemas generativos, o

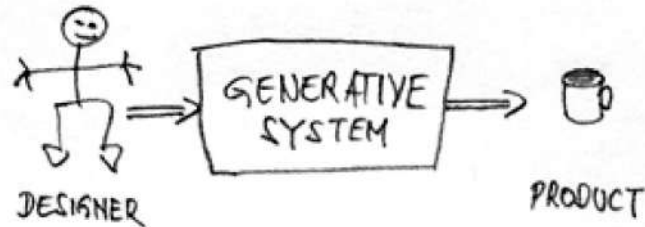
designer é o responsável pela organização de dados de modo que o sistema gere o produto final (figura 2.02).

Figura 2.01 – Croqui demonstrando o processo de design tradicional



Fonte: (FISCHER; HERR, 2004)

Figura 2.02 – Croqui representando o processo de design com a utilização de um sistema generativo



Fonte: (FISCHER; HERR, 2004)

Existem ao longo da história inúmeras situações em que sistemas generativos foram empregados. É o caso dos fractais matemáticos e dos poemas *haiku*, por exemplo (MITCHELL, 1975). Quando aplicados no campo da arquitetura, Martino (2015) exemplifica algumas maneiras como projetos podem ser concebidos a partir desses sistemas:

os sistemas generativos estão também relacionados com sistemas emergentes, auto-organização (autômato celular, modelagem de enxame), gramáticas generativas (*L-systems*, gramática da forma), geração algorítmica e de crescimento (fractais, projeto paramétrico e mapeamento de dados) e algoritmo de reprodução (algoritmo genético, processo seletivo) [...] (MARTINO, 2015, p. 86).

Os sistemas generativos utilizam-se de dados para a elucidação dos problemas. No entanto, existem situações em que os dados podem ser tão extensos e complexos, como em fórmulas matemáticas, por exemplo, que a manipulação e a interpretação desses é demasiadamente complexa.

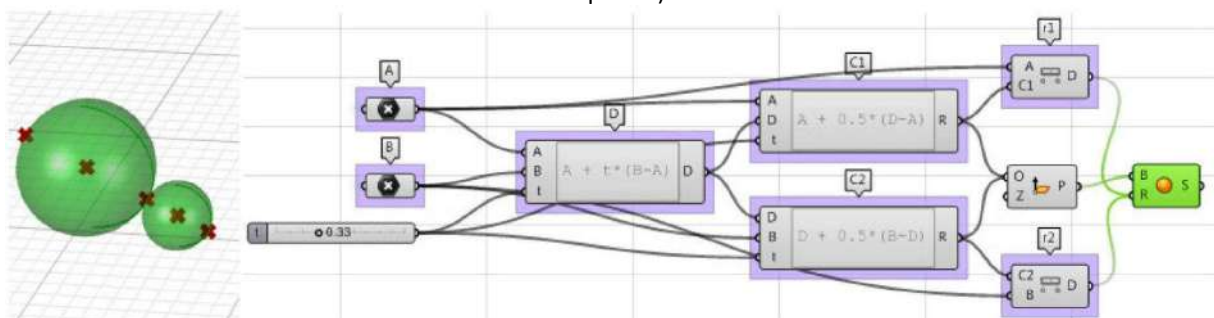
Por isso, os computadores e os recursos digitais são de grande valia para os sistemas generativos. É o caso do uso de *softwares* na arquitetura utilizados para manipular dados para

a obtenção de objetivos variados, como por exemplo, a busca por formas não euclidianas¹⁷ (OXMAN, 2007, p. 665). Stavric e Marina (2011, p. 12) defendem que a programação generativa auxilia o projetista, que é também programador, em um processo de criação de códigos para aumentar a sua produtividade. Esses códigos são organizados em um ambiente virtual (*software*) por um programador (projetista), representando um sistema organizado de dados denominados como *scripts* (figura 2.03).

Ressalta-se que os *scripts* são responsáveis por traduzir a lógica dos *inputs* (dados) de modo que produzam *outputs*. A figura 2.03 exemplifica a organização de dados em um *script* em um ambiente virtual de um determinado *software*, cujo objetivo foi produzir e controlar o diâmetro de duas esferas, sendo que essas deveriam sempre ser tangenciadas por um ponto.

Marble (2012, p. 8) relata que a customização de *scripts* permite a inovação, que vai além da produção de um único projeto, cujo fluxo de trabalho permite produzir o projeto dos projetos. Ou seja, deve-se programar a lógica dos dados para gerar inúmeras possibilidades de resultados, com a finalidade de encontrar a solução mais adequada para uma determinada necessidade.

Figura 2.03 – Representação gráfica de um ambiente virtual com a programação de um script (imagem à direita), com o respectivo resultado de sua codificação, duas esferas tangenciadas por um ponto (imagem à esquerda)



Fonte: (ISSA, 2013, p. 26)

Existem inúmeros *softwares* disponibilizados no mercado que auxiliam o projetista de diversas maneiras. Esse auxílio pode ocorrer em simulações para a obtenção de forma, em testes de níveis de conforto térmico e lumínico, estruturais, assim por diante. No entanto, é preciso entender que existe uma nova maneira de se projetar, onde o pensamento do *designer* deve estar alinhado com o pensar a partir de sistemas generativos. Para Martino e

¹⁷ Exemplos de geometrias não euclidianas: superfícies '*B-splines*' e curvas '*NURBS*'.

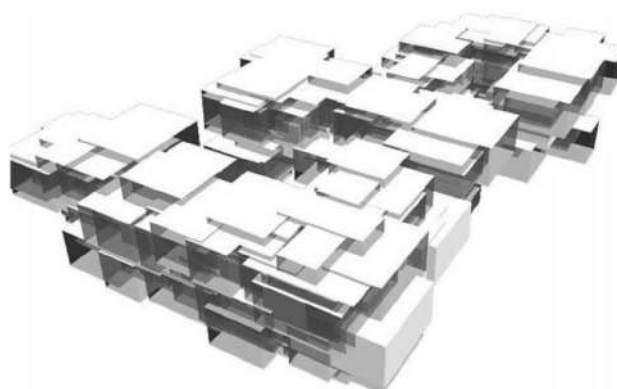
Rosa (2019, p. 1037), “a lógica projetual vem mudando ao longo do tempo, permitindo que o projetista utilize recursos digitais para encontrar a forma em vez de fazer a forma”.

A respeito dessa lógica do fluxo de trabalho da indústria AEC¹⁸ nesse cenário da era digital, Marble (2012, p. 8, tradução nossa) afirma que “as lógicas dos fluxos de trabalho digitais na arquitetura começaram a estruturar a forma como os arquitetos projetam, como os construtores constroem e como a indústria está se reorganizando.”¹⁹ Por exemplo, para desenvolver uma residência, existem inúmeros dados que auxiliam na definição de projeto, como a necessidades dos usuários, custo para produção, propriedade dos materiais e a estética.

Quando são manipulados a partir do conceito de sistemas generativos, é possível diversificar e customizar a arquitetura com esses dados, de modo a atender requisitos singulares e intrínsecos de seus usuários. Eis a importância do entendimento do conceito da customização em massa (será tratado na seção 2.1.2).

Os sistemas geradores foram utilizados por alguns pesquisadores durante a fase de projeto. Terzidis (2006, p.88) demonstra uma pesquisa onde houve a busca pela implantação aleatória²⁰ de casas em um conjunto habitacional (figura 2.04), desenvolvida com o auxílio da matemática e da computação. O mesmo autor demonstra que é possível gerar os pavimentos tipo e a fachada de um edifício em altura a partir da técnica de deformação aplicada a uma formal inicial, no caso, um círculo (figura 2.05).

Figura 2.04 – Perspectiva 3D da implantação de unidades habitacionais de maneira aleatória



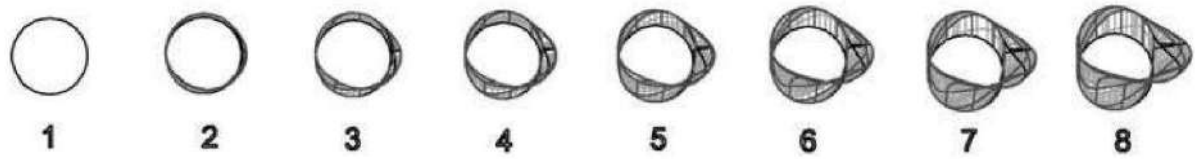
Fonte: (TERZIDIS, 2006, p. 88)

¹⁸ Arquitetura, Engenharia e Construção.

¹⁹ “The logics of digital workflows in architecture have begun to structure the way that architects design, the way that builders build, and the way that industry is reorganizing.”.

²⁰ Termo original em inglês utilizado no texto original: ‘Stochastic search’ (TERZIDIS, 2006, p. 88).

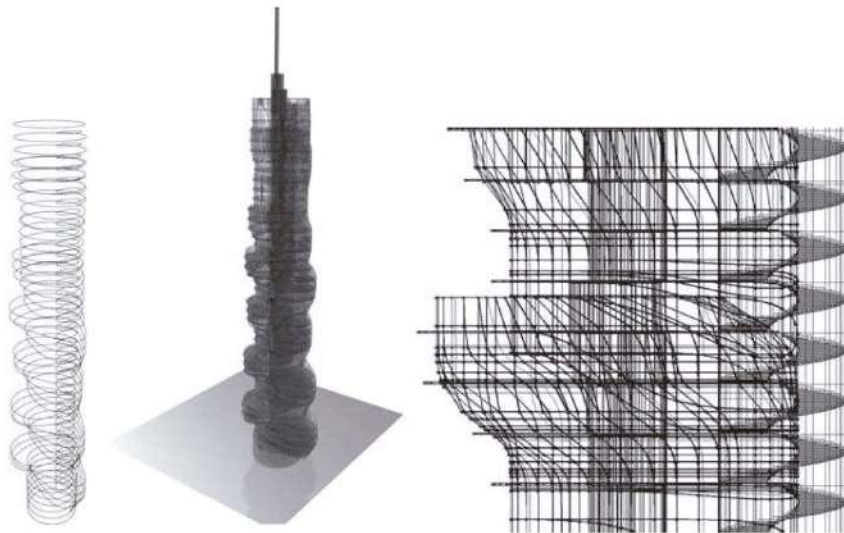
Figura 2.05 – Representação gráfica de um círculo (número 1 na imagem), utilizado como forma de referência, sendo sobreposto por formas geradas com a deformação da forma inicial (números 2 a 8 na imagem)



Fonte: (TERZIDIS, 2006, p. 113)

Essa variação formal a partir de uma deformação produz uma infinidade de outras formas entre as camadas horizontais daquelas utilizadas como base, que podem ser representadas e quantificadas no espaço apenas por meio de um *software* paramétrico (figura 2.06).

Figura 2.06 – Representação 3D de um edifício gerado por meio das deformações a partir da forma inicial de um círculo



Fonte: (TERZIDIS, 2006, p. 113)

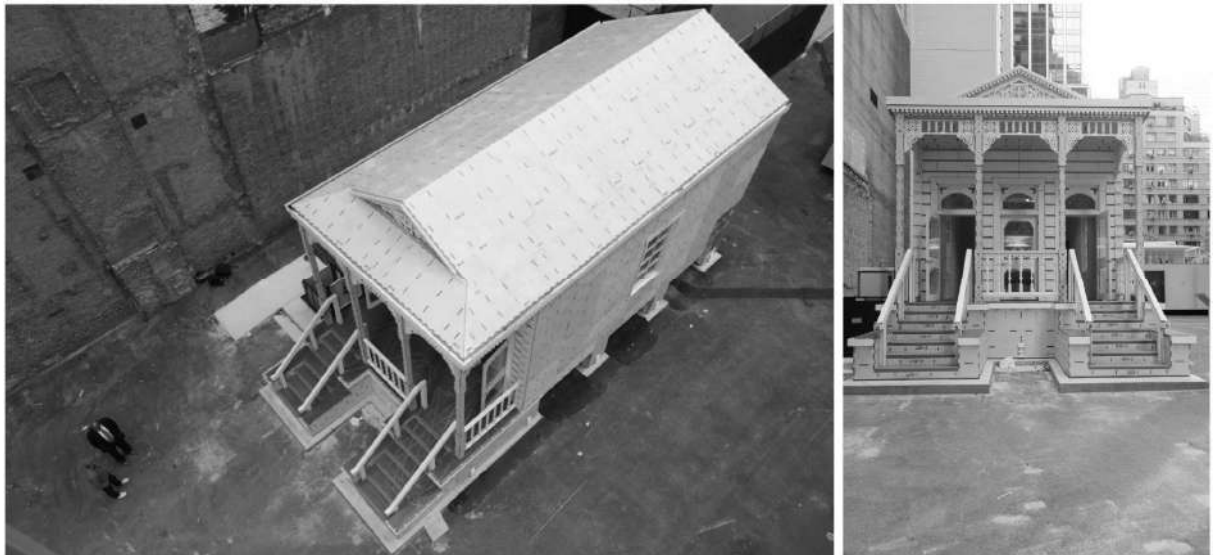
Outro exemplo é o de uma habitação customizada de uma casa fabricada em Nova Orleans (figura 2.07) com o uso de uma máquina fresadora CNC, a qual foi possível customizar uma residência com poucos dias de produção a um preço acessível, feita a partir de chapas em MDF. Esta foi utilizada como exemplo de uma casa que poderia ser fabricada para uma família que tivesse a sua residência destruída por desastres naturais, como foi o caso do furacão Katrina que atingiu aquela cidade em 2005 (SASS, 2008).

Neste caso, a gramática da forma também foi utilizada como técnica de projeto para a confecção de ornamentos de fachada que remetessem ao estilo *Louisiana*, que era o estilo predominante das residências afetadas pelo Katrina. Esses ornamentos foram catalogados

para as famílias poderem escolher um que remetesse àquele de suas residências. Dessa forma, foi possível amenizar as dores das famílias de modo que as novas casas fizessem alusão ao que as famílias consideravam como um modelo de lar.

Esses são alguns exemplos para ilustrar como é possível mudar o paradigma de concepção de um projeto arquitetônico, por meio de sistemas generativos de projeto, contribuindo para a customização em massa. Entretanto, a exequibilidade desses projetos tornou-se possível devido ao uso de equipamentos de fabricação digital.

Figura 2.07 – Fotografias da casa para Nova Orleans produzida com chapas de MDF e *routers CNC*: À esquerda - fotografia aérea -; À direita - Fotografia da fachada principal -



Fonte: Artigo científico (SASS, 2008, p.12)

2.2 A Fabricação Digital

No panorama da tectônica informatizada, a fabricação digital atua como a solução para a materialização da customização em série. Segundo Fabio Gramazio, Wangler et al. (2016, p. 67, tradução nossa), a

fabricação digital pode ser definida como a aplicação de tecnologias do campo da modelagem digital e demais tecnologias para a produção de objetos materializados de forma customizada, sendo que esta promete revolucionar toda a manufatura, tendo sido proclamada nos últimos anos como a ‘terceira revolução industrial’ [...]”²¹ (WANGLER et al., 2016, p. 67, tradução nossa).

²¹ “*Digital fabrication can be defined as the application of digital modeling technologies and technologies to the production of custom material objects, and promises to revolutionize all manufacturing, having been proclaimed in recent years as the ‘third industrial revolution’ [...]*”.

As tecnologias CAD (*Computer-aided Design*)/CAM (*Computer-aided Manufacturing*) abriram novas oportunidades no campo da arquitetura ao permitirem a construção de formas muito complexas, que até então eram muito difíceis e caras de serem desenhadas, produzidas e montadas caso fossem produzidas usando tecnologias de sistemas construtivos convencionais.

A respeito dessas tecnologias, Kolarevic (2001, p. 269) diz que as consequências serão profundas, onde processos de design digitalmente derivados, fabricação e construção estão exponencialmente aumentando a histórica relação entre arquitetura e seus meios de produção (KOLAREVIC, 2001, p.269).

Tais tecnologias elucidaram uma nova forma de abordar projetos arquitetônicos, através das técnicas da prototipagem digital e da fabricação digital. Segundo Pupo (2009, p. 31), prototipagem digital diz respeito aos processos digitais e fabris cujo objetivo é a produção de modelos físicos para auxiliar a concepção/visualização de projetos. Já a fabricação digital envolve a materialização de elementos construtivos cujo objetivo sejam componentes de partes ou da totalidade de edificações (PUPO, 2009, p. 31).

Segundo Kolarevic (2001, p. 269), a fabricação envolve estruturas topológicas, conhecidas como NURBS (*Non-uniform Rational B-spline*), que são exequíveis através da tecnologia CNC (*Computer Numerical Control*). Este é o grande potencial para a exequibilidade de estruturas complexas, que fogem das geometrias euclidianas, o que vai ao encontro do tema da ‘tectônica informada’ de Rivka Oxman (2012), apresentado anteriormente.

Portanto, a fabricação digital é a solução para a produção em larga escala desta tectônica singular que permite o projeto digital articular com a produção, com vistas a criar a possibilidade de se personalizar mediante parâmetros, o que se articula com o usuário quando associado à customização em série. Contudo, para que a customização em série seja uma realidade, as indústrias devem estar preparadas, com tecnologias e mão de obra especializada para materializar esse ideal.

O projeto de uma igreja em Nova Jérсия, de autoria do escritório *Marchetto Architects* com a colaboração dos alunos Leanne Mussarela e Justin Nardoni, é um exemplo do fluxo de trabalho de um projeto realizado com sistemas generativos e a fabricação digital. A inspiração do projeto adveio da concepção de se criar uma analogia da fachada desta igreja com a escama de um animal, o pangolim (figura 2.08).

A fachada deveria ser curva e ter elementos construtivos que remetesse às escamas do animal, assim como a sua curvatura, o que foi projetado em um ambiente virtual com um algoritmo de migração de curvatura, expresso por meio de uma população de pontos (figura 2.09). Esses pontos foram programados para terem uma determinada distância entre si de modo a permitir a percepção da curvatura do plano da fachada. Essa geometria posteriormente foi subdividida em formas geométricas de hexágonos (figura 2.10), similarmente às escamas do pangolim.

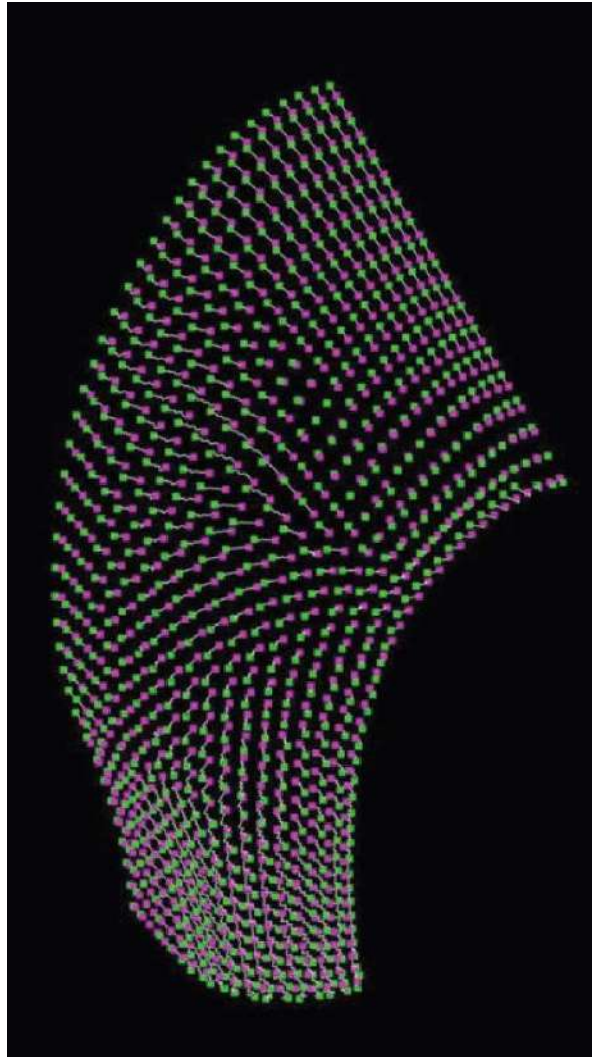
Desse modo, optou-se por fabricar a vedação da igreja (figura 2.11) com telhas de zinco cortadas sob medidas com equipamentos de fabricação digital, somando um total de 1.100 telhas customizadas (MARBLE, 2012).

Figura 2.08 – Fotografia de pangolim



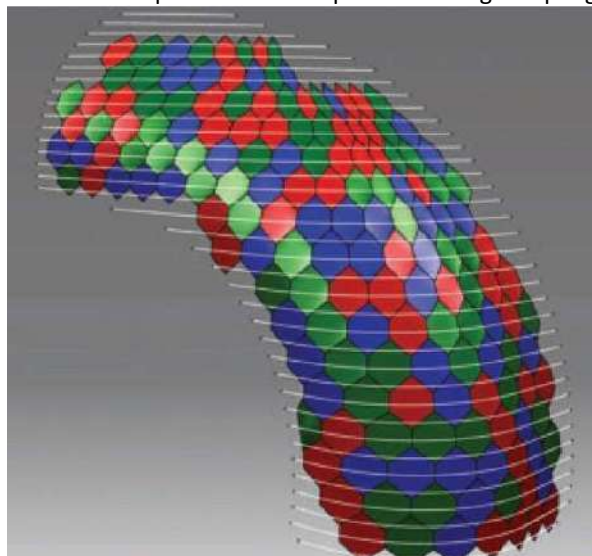
Fonte: (MARBLE, 2012, p. 265)

Figura 2.09 – Perspectiva 3D de população de pontos paramétricos em um ambiente virtual



Fonte: (MARBLE, 2012, p. 261)

Figura 2.10 – Perspectiva 3D de superfície análoga ao pangolim



Fonte: (MARBLE, 2012, p. 262)

Figura 2.11 – Fotografia da superfície da fachada de igreja que remete ao pangolim



Fonte: (MARBLE, 2012, p. 265)

2.2.1 CAD/CAM

A utilização das tecnologias digitais da arquitetura é possível por meio da incorporação de recursos CAD/CAM (*Computer-aided Design /Computer-aided Manufacturing*), que está presente em uma parcela significativa da indústria e comércio de serviços (figura 2.12). O conceito por detrás desta tecnologia é o uso de equipamentos que desempenham funções diversas, como conformar ou cortar chapas com precisão ou deposição de material, cujo comando ocorre a partir de dados enviados por um *software* computacional. São máquinas controladas por computadores que podem cortar ou criar componentes (IWAMOTO, 2009, p. 5).

Para Nick Dunn (DUNN, 2012, p. 20), a fabricação digital é um subproduto²² da CAD/CAM, tecnologia que estava sendo utilizada na indústria aeronáutica, automobilística, assim como em outros produtos de consumo há 60 anos. No entanto, a sua utilização no meio da arquitetura ocorreu somente em 1989, com o início do projeto da *Disney Concert Hall*, de

²² A tecnologia CNC, também é um subproduto CAD/CAM.

Frank Gehry (figura 2.13). No caso, o software CATIA (*Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application*) foi o responsável por transpor os dados do computador para os equipamentos de corte dos componentes arquitetônicos de sua fachada e estrutura (DUNN, p. 22, 2012).

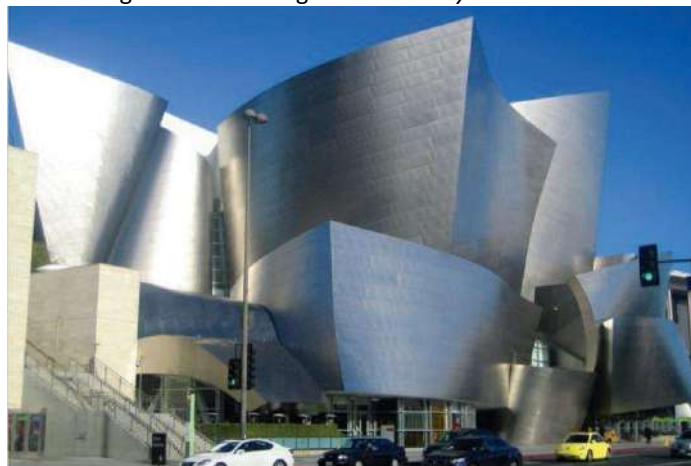
Kolarevic (2001, p. 272) é outro autor que também relata que a tecnologia CAD/CAM alterou o design de edifícios e as práticas construtivas apenas nos últimos anos, apesar desta tecnologia já ser utilizada em outros segmentos. Os recursos CAD/CAM, portanto, permitem que o projeto digital seja articulado com a produção, fazendo este processo com muita precisão a partir do envio de um determinado arquivo digital para equipamentos de produção. Atualmente essa tecnologia está acessível em diversos ramos de atividades, como é o caso da indústria moveleira, gráfica, metalúrgica e de artesanatos (mais detalhes no capítulo 4).

Figura 2.12 – Fotografia de equipamento de corte com fresadora com tecnologia CNC, que pode ser de proporções das mais variadas, dependendo dos propósitos e dos materiais a serem trabalhados



Fonte: (DUNN, 2012, p. 97)

Figura 2.13 – Fotografia da *Disney Concert Hall*



Fonte: (DUNN, 2012, p. 20)

2.1.2 A Customização em Massa

A produção em série iniciada por Henry Ford teve como premissa a produção de bens de consumo standardizados, que valorizou a produção de um determinado produto em grande quantidade em um menor espaço de tempo. O lema desse período foi a standardização e a pré-fabricação. Quanto à customização em massa, Pupo (2009) difere essa da produção em série:

a diferença entre os novos métodos de produção baseados em modelos digitais e os antigos métodos de produção de massa é que eles não se destinam a produzir cópias idênticas de um mesmo produto. Pelo contrário, constituem-se em sistemas suficientemente adaptáveis para produzir um grande espectro de formas diferentes. Esse novo conceito tem sido chamado de '*mass customization*' (personalização em massa), e foi definido por autores como Stan Davis (1996), Tseng e Jiao (2001), Pine (1993), e Kaplan e Haenlein (2006) (PUPO, 2009).

No que diz respeito à customização em massa, Zellner (1999, *apud* KOLAREVIC, 2001, p. 275, tradução nossa), afirma:

[...] agora é possível produzir 'séries manufaturadas, diferentes objetos, porém, matematicamente coerentes, assim como componentes únicos, no entanto, seriados, que são elaborados, precisos e relativamente baratos,' [...] ²³.

É nesse sentido que a customização em massa possui potencial de personalização. O diferencial, segundo os arquitetos Heliara Costa e Márcio Fabrício (2020), está no fato de a customização em massa estar centrada nas pessoas, não em produtos, como fizera a fabricação em série.

Nesse sentido, essa discussão pode ser estendida para a customização de residências de baixo custo que tendem a apresentar um alto nível de padronização, sendo um fator relevante que deveria ser mais bem estudado e explorado.

Tauebe e Hirota (2017) apontam estudos onde o método de fabricação em massa resulta na insatisfação de seus usuários, o que ocorre frequentemente em empreendimentos de habitações de interesses sociais. Brandão (2011, p. 74) também compactua com essa ideia, sendo que esse autor demonstra a insatisfação de usuários com o padrão entregue de suas residências por parte das construtoras. Essa insatisfação pode vir por meio de aspectos

²³ "[...] *It is now possible to produce 'series-manufactured, mathematically coherent but differentiated objects, as well as elaborate, precise and relatively cheap one-off components,' [...]*".

diversos, conforme demonstrado por Reis (*apud* BRANDÃO, 2011), como por exemplo os funcionais, estéticos, de privacidade, definição do território e personalização.

O projeto, quando associado aos sistemas generativos, permite explorar essa customização, que pode ser executada por meio dos equipamentos da fabricação digital para criar geometrias e espaços singulares, seja no projeto como um todo ou como elementos avulsos.

Na personalização de habitações de um conjunto residencial, por exemplo, plantas baixas podem ser customizadas para servir às necessidades de seus usuários (MENDONÇA; PASSARO; HENRIQUES, 2018). Elementos construtivos avulsos também poderiam ser customizados, como é o caso de cobogós ou elementos estruturais. A implantação das mesmas em um lote também poderia ser customizada, já tendo sido realizada por Mendes (2014) e Duarte (2005).

2.3 A Indústria 4.0 e o Conceito *File to Factory*

Muitas indústrias possuem equipamentos que atuam com a tecnologia CAD/CAM e o envio de arquivos digitais para essas possibilita a customização em série ser uma realidade tangível (SIMON, 2001/SILVA et al., 2009/GRAMAZIO; KOHLER, 2008).

A respeito desses recursos digitais predisponentes nas indústrias, e, para melhor ilustrar como é necessária uma mudança de paradigma a respeito da concepção e da execução da arquitetura (conforme mencionado no subcapítulo 2.1), Kolarevic (2009) afirma que: “se incorporados ao processo de produção do espaço edificado, possibilitam uma **mudança fundamental de paradigma na arquitetura contemporânea.**” (KOLAREVIC, *apud* SILVA; et al., 2009, grifo nosso).

A mudança de paradigma ocorre até mesmo no simples gesto de como fazer a arquitetura. Com o avanço de tecnologias das fabricações digitais, a tendência é que a arquitetura será cada vez mais ‘imprimível’. Um conceito que permite compreender essa tendência é o *file to factory*, que traduzindo significa o envio de um determinado arquivo para a fábrica, de modo que o mesmo seja transposto do meio digital para o físico e material. Segundo Kas Oosterhuis (2004), arquiteto, professor da Universidade do Qatar, *file to factory* refere-se à união entre o processo de design e a sua eventual fabricação. Isto envolve uma transferência direta de dados de um software de modelo 3D para uma máquina CNC (*Computer Numerical Control*). Isto significa o emprego de estratégias do design e da

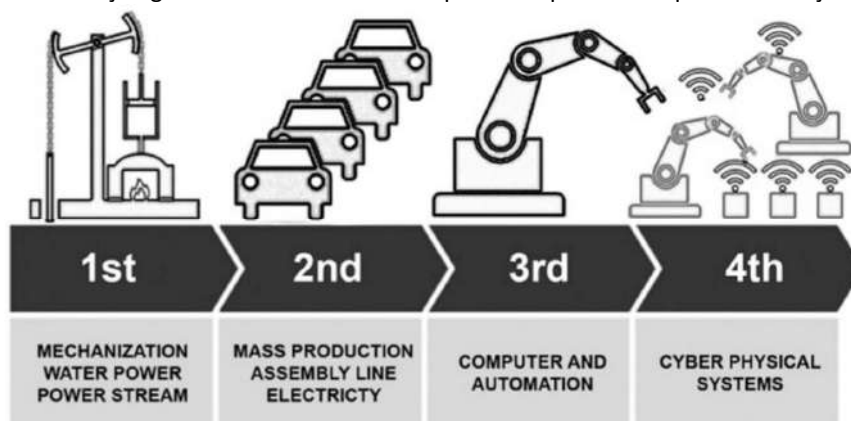
fabricação digitais, com base em conceitos computacionais²⁴ (OOSTERHUIS, et al., 2004, p. 294, tradução nossa). Kaiser et al. (2019) afirmam que esse conceito permite produzir arquitetura em grande quantidade de maneira mais econômica (KAISER; LARSSON; GIRHAMMAR, 2019, p. 5).

Historicamente, a indústria passou por diversos momentos-chave que são comumente categorizados como revoluções oriundas de avanços tecnológicos e intelectuais. Pode-se dizer que esses momentos-chave foram marcados por quatro períodos de revoluções industriais (figura 2.14).

O primeiro período refere-se à invenção dos maquinários, da combustão e o uso da água como força motriz. Já o segundo diz respeito ao uso da eletricidade e da produção em massa com as técnicas de produção em série iniciadas por Henry Ford. O terceiro ficou marcado pelo uso da computação e da automação. Já o quarto, nomeado como a 'Indústria 4.0', é tido como uma revolução industrial que permite manufaturar por meio de uma enorme gama de dados (PAOLETTI, 2018, p. 78).

Schaub (*apud* Paoletti, 2018, p. 78) define a Indústria 4.0 como a era de 'sistemas físicos cibernéticos'²⁵. Portanto, esse quarto período de revolução industrial permite produzir componentes com velocidade e precisão, a partir do envio de arquivos para as indústrias, gerando um grande potencial para a customização em massa.

Figura 2.14 – Ilustração gráfica da Indústria 4.0: Esquema da primeira à quarta revoluções industriais



Fonte: Artigo científico (PAOLETTI, 2018, p.78)

²⁴ "File to Factory refers to the seamless merging of the design process into fabrication. It involves direct transfer of data from a 3D modeling software to a CNC (Computer Numerically Controlled) machine. It employs digital design and fabrication strategies based on computational concepts."

²⁵ 'Cyber Physical Systems'.

Estudos demonstram que as indústrias estão preparadas e possuem equipamentos com essas tecnologias (SIMON, 2001/SILVA et al., 2009/GRAMAZIO; KOHLER, 2008). Inclusive, Vonortas e Xue (1997) afirmam que as empresas em geral, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento, investiram assiduamente em máquinas com tecnologia CNC nos últimos anos (VONORTAS; XUE, *apud* AGOSTINHO; MASTRELLI; SIMON, 2002).

Equipamentos de subtração, como fresadoras CNC, são acessíveis. Inclusive, Kolarevic (2001) afirma que desde os anos de 1980 e 1990 escritórios de arquitetura já utilizavam essas tecnologias para a exploração formal de seus projetos com a prototipagem rápida, como é o caso do escritório do arquiteto Frank Gehry.

Na fabricação digital, nas últimas décadas surgiram inúmeras pesquisas acadêmicas cuja intenção foi disseminar o uso de equipamentos com tecnologia CNC, como é o caso das *routers* CNC que cortam chapas de OSB e MDF para a produção de componentes da arquitetura.

Outro tipo de equipamento que apresenta muita pesquisa é o uso de braços de robôs de múltiplos eixos. Para Caneparo (2014, p. 133), os robôs industriais (figura 2.15) são formados por um braço mecânico com movimentos em três ou mais eixos e uma unidade de controle numérico.

Figura 2.15: Fotografia de braço robótico da KUKA - modelo KR IONTEC -



Fonte: Website (KUKA, 2023)

Esses robôs possuem flexibilidade de articulações que são orientadas a partir de sua base, que pode ser fixada em um determinado lugar ou permitir a sua mobilidade em um recinto de trabalho. Esses robôs auxiliam a produção industrial de inúmeras maneiras, como é o caso da movimentação de componentes produtivos ou produtos e podem atuar com precisão de movimentos a partir do controle numérico ininterruptamente, além de substituir, em alguns casos, o trabalho humano, sem requerer horas de descanso ou entrar em fadiga.

A classificação desses robôs²⁶ pode ocorrer a partir da quantidade de eixos que eles possuem. O raio de alcance da área de trabalho é relevante, assim como a capacidade de carga admissível, que varia conforme modelo e fabricante.

O *'final factor'*²⁷ desses equipamentos são relevantes para os projetistas, pois podem ser configurados para desempenharem funções diversas, apenas sendo requerido a acoplagem de um *hardware* específico, que pode ser utilizado, por exemplo, para cortar, furar ou conformar materiais.

Os braços robóticos, utilizados para realizar manutenção em equipamentos como se fossem braços humanos, estão inseridos nas indústrias de todo o mundo desde os anos 1980. Gramazio e Kohler em 2008 (2008) já constataram isso:

Mundialmente, existem mais de um milhão de robôs multifuncionais em uso, predominantemente robôs de braços articulados, e os seus números têm crescido constantemente desde os anos 1980. O robô industrial se tornou comum na automação precisamente porque, como o computador pessoal, este não foi otimizado para desempenhar apenas uma função, mas este é adequado para um espectro variado de aplicações. Ao invés de ser forçado a operar dentro de parâmetros pré-estipulados de uma máquina especializada, nós podemos desenvolver as reais “habilidades manuais” do robô genérico nós mesmos. Nós não o direcionamos para um ponto específico no espaço, mas também determinamos suas capacidades de manipulação física e de processamento. Por definir a mão do robô, também conhecido como o *final factor*, e determinando os seus movimentos, nós ensinamos o robô um tipo de construção desejada. Nós o ensinamos a registrar os seus arredores através de sensores e como a afetar o ambiente por meio de sua mão. O robô, portanto, conecta o mundo da lógica imaterial com o da construção material da maneira mais direta²⁸ (GRAMAZIO, KOHLER, 2008, p. 9, tradução nossa).

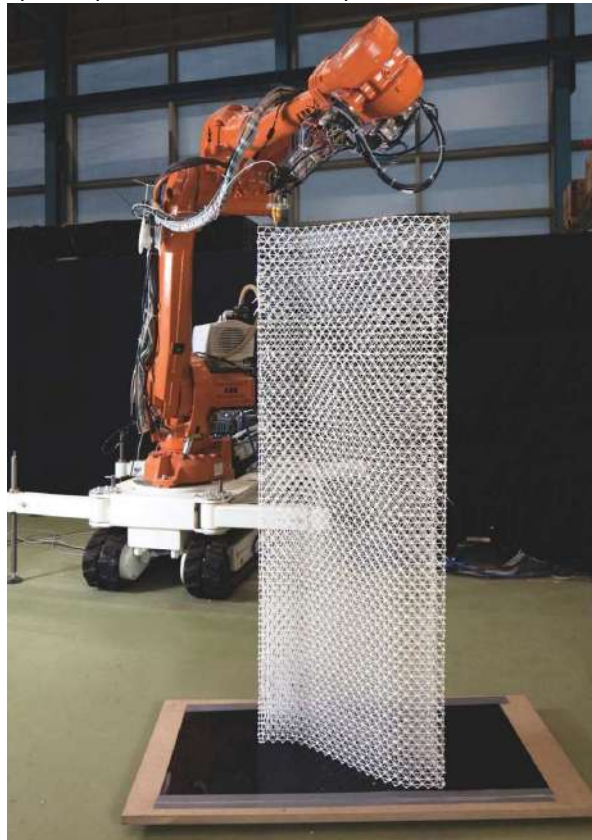
²⁶ Para Caneparo (2014), existem os robôs cartesianos, cilíndricos, antropomórficos e os SCARA - *Selective Compliant Assembly Robot Arm* -.

²⁷ O *'final factor'* ou *'end-effector'* (termos em inglês), *'fator final'* em português, representa a terminação de um determinado braço robótico, que permite acoplar equipamentos para desempenhar funções específicas. As terminações que são comumente utilizadas são as ventosas e as garras, mas essas podem ser trocadas por equipamentos de soldagem, *router*, extrusora de concreto, assim por diante.

²⁸ “Worldwide, there are currently more than a million multifunctional robots in use, predominantly articulated-arm robots, and their numbers have risen steadily since the 1980s. The industrial robot has become standard in automation precisely because, like the personal computer, it has not been optimized for one single task but is

Hossain et al. (2020) afirmam que a robótica está sendo explorada para executar tarefas da construção (figura: 2.16), como é o caso da adição de tijolos, construção de paredes, instalação de fachadas, limpeza e inspeção, pré-fabricação/modularização, montagem de vigas e rebocamento. No entanto, esses autores consideram que a inovação na construção civil está lenta desde 1970, como é o caso do uso da robótica.

Figura 2.16 – Fotografia do protótipo de molde de malha para concreto fabricado por braço robótico móvel



Fonte: (GRAMAZIO; KOHLER, 2014, p. 53)

Apesar de haver inovação, ela ainda se encontra em fase de exploração, sendo pouco utilizada pelo setor. Isso se deve principalmente à falta de investimentos em inovação na construção civil. Nos Estados Unidos, por exemplo, a construção civil investe apenas 1,5%

suitable for a wide spectrum of applications. Rather than being forced to operate within the predefined parameters of a specialized machine, we are able to design the actual "manual skills" of the generic robot ourselves. We do not just steer it to a particular point in space, but also determine its capacities for physical manipulation and processing. By defining the robot's hand-also called the "end-effector"- and determining its movements, we teach the robot a desired type of construction. We teach it to register its surroundings through sensors, and to affect the environment through the robot hand. The robot thus connects the world of immaterial logic with that of material construction in the most direct way."

anualmente em tecnologia, enquanto a indústria de manufaturados, 3,3% e a economia como um todo no país, 3,6% (HOSSAIN et al., 2020).

Entretanto, as tecnologias digitais são pouco exploradas por profissionais como arquitetos, limitando o potencial delas. O professor coordenador do laboratório de prototipagem rápida da Universidade de Brasília, Dr. Neander Furtado Silva (2009), assim como outros autores, confirmam que as indústrias estão preparadas para a customização em série, e como essa é capaz de produzir com diversidade sem onerar os custos de produção:

os resultados demonstram que a tese da indisponibilidade tecnológica não subsiste e que, apesar da distribuição de equipamentos de fabricação digital ser bastante heterogênea, a sua presença é significativamente visível. As implicações são enormes para o futuro da arquitetura brasileira à luz da possibilidade de incorporação do paradigma da customização em massa, pois permitem gerar formas complexas ou diferenciadas dentro de orçamentos razoáveis. (SILVA; et al., 2009, p. 432).

Se essa tecnologia fosse utilizada para criar residências personalizadas, a qualidade de vida e a satisfação de seus moradores aumentaria mediante a possibilidade de customização e consequente adequação às necessidades individuais. Além disso, outros fatores seriam beneficiados, como o aproveitamento dos materiais utilizados - promovendo o uso consciente e responsável reduzindo o desperdício e a quantidade de resíduos, assim como a configuração de uma paisagem urbana mais diversificada mediante a possibilidade de gerar diversidade arquitetônica em conjuntos habitacionais.

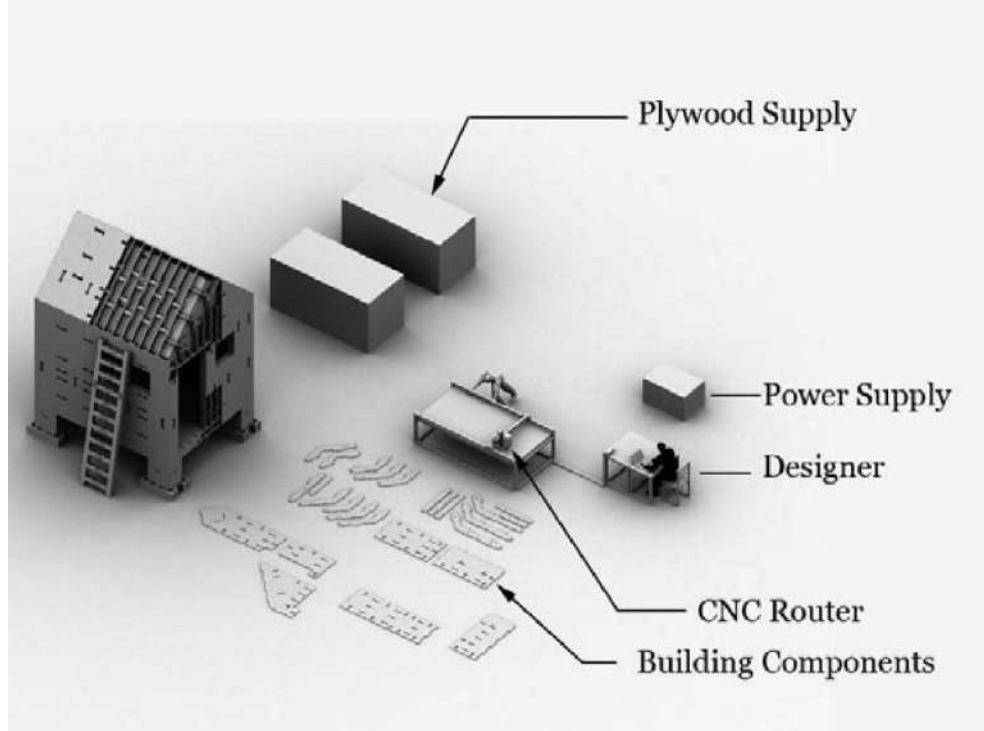
Sass (2008, p. 1) compactua com esse pensamento, onde ele relata que a fabricação digital colabora com a sustentabilidade, pois não requer grandes indústrias poluidoras para fabricar componentes pré-fabricados. O autor também relata que é possível construir casas para um grupo de pessoas que necessitem de uma habitação customizada e fabricada em um curto período de tempo, sendo realizado por meio da fabricação digital e da customização em massa.

A figura 2.17 de Sass e Botha (2006) representa essa concepção arquitetônica auxiliada pelas mídias e equipamentos digitais para a produção de arquitetura, onde há o projetista, o equipamento (no caso, 'CNC Router'), os componentes construtivos e a arquitetura resultante da utilização dos componentes produzidos digitalmente.

Portanto, de modo a demonstrar as possibilidades arquitetônicas dessa logística de construção, no capítulo 3 serão demonstrados exemplos tanto no Brasil como no exterior,

onde a customização em série, por meio da fabricação digital, possibilita uma mudança de paradigma na arquitetura contemporânea para a produção de habitação.

Figura 2.17 – Ilustração gráfica do canteiro de obras com o uso *in loco* de fresadora CNC



Fonte: Artigo científico (SASS; BOTHA, 2006, p. 113)

3. EXEMPLOS DE HABITAÇÕES DESENVOLVIDAS COM A FABRICAÇÃO DIGITAL

A fim de exemplificar a aplicabilidade das tecnologias digitais CAD (*Computer-aided Design*)/CAM (*Computer-aided Manufacturing*) na fabricação de habitação, foram selecionados exemplos que demonstram a utilização de materiais comumente utilizados na construção civil. É o caso da madeira, do concreto e do barro. Entretanto, é importante frisar que existem outros materiais, assim como outros meios de produção possíveis por intermédio das tecnologias digitais, os quais serão demonstrados neste capítulo.

Inicialmente, o item 3.1 aborda exemplos de casos de habitação considerando a categorização de Kolarevic (2001), conforme a maneira como os objetos são produzidos, cuja ocorrência é por meio de métodos subtrativos, aditivos e conformativos. Posteriormente, no item 3.2, apresenta-se um caso que utiliza mais de uma dessas técnicas em um mesmo projeto.

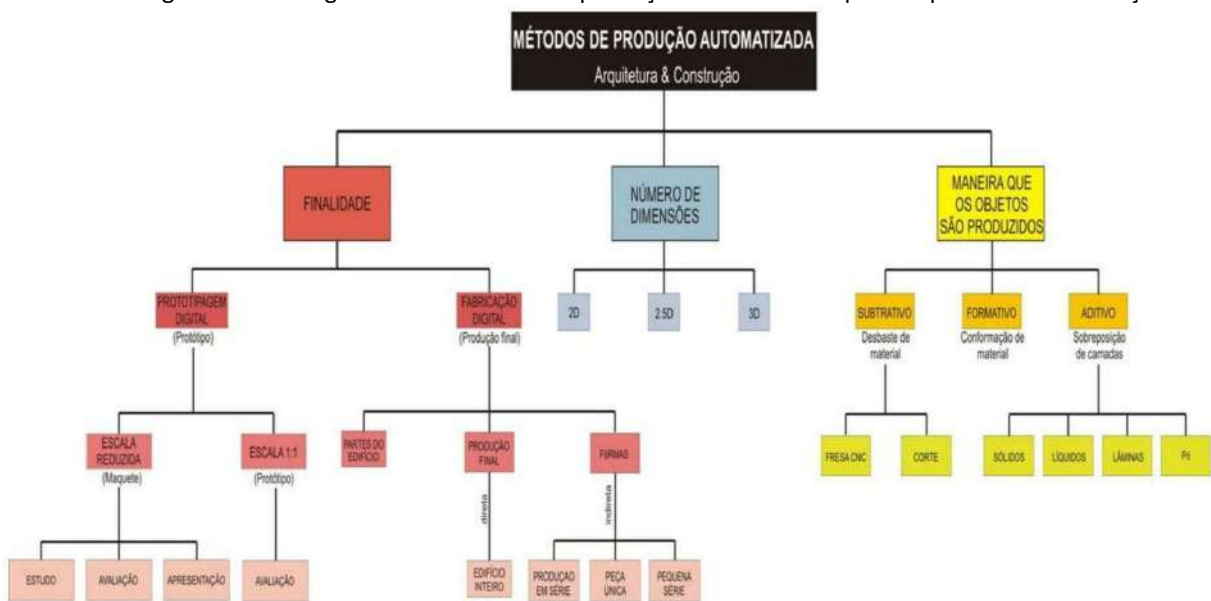
Vale ressaltar que esse método é utilizado para ilustrar as possibilidades arquitetônicas quando ocorre a produção automatizada de habitação por meio de mais de

uma técnica construtiva da fabricação digital. Finalmente, no item 3.3, é apresentada a produção de habitação produzida por meio da fabricação digital no Brasil.

3.1 Conforme a Maneira como os Objetos são Produzidos

Para Pupo (2009, p. 30), os métodos de produção automatizadas na arquitetura e construção podem ocorrer por meio de três métodos de classificação: por finalidade, por número de dimensões ou pela maneira como os objetos são produzidos (figura 3.01).

Figura 3.01 – Diagrama dos métodos de produção automatizada para arquitetura e construção

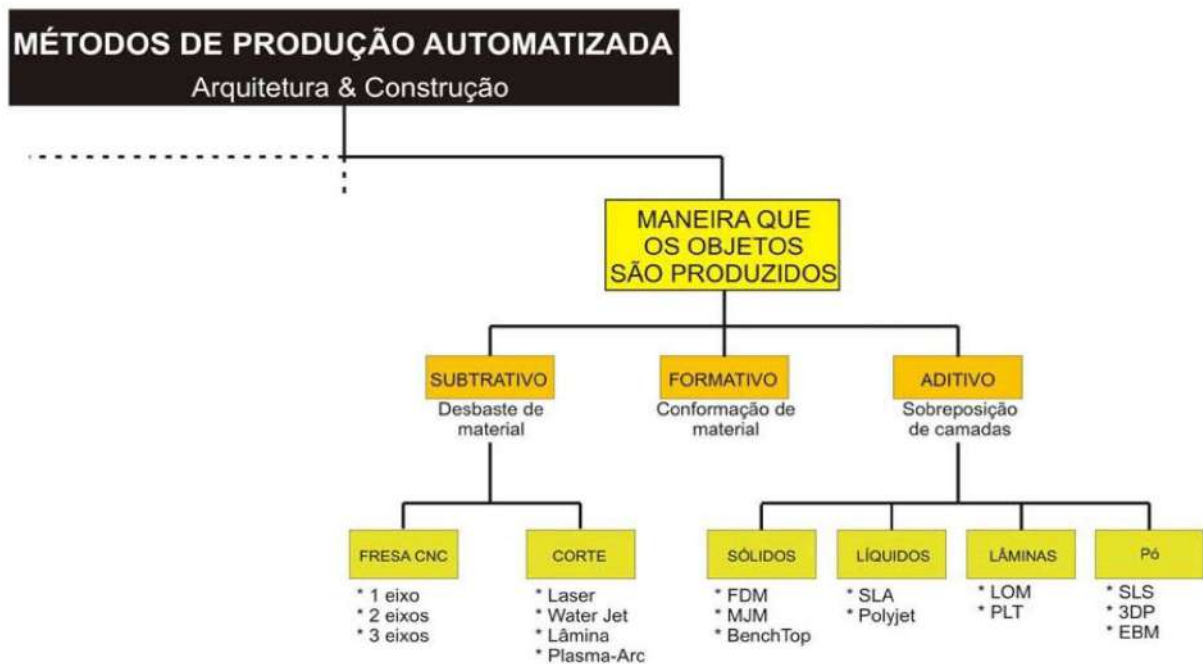


Fonte: Tese de Doutorado (PUPO, 2009, p. 30)

No entanto, os exemplos de habitações desenvolvidas com o uso de equipamentos com as tecnologias CAD/CAM foram divididos nesta seção, conforme a maneira como os objetos são produzidos (figura 3.02).

Pupo (2009) baseou-se, assim como a grande maioria das pesquisas mundiais que ocorrem no campo da fabricação digital, na classificação de Kolarevic (2001), que divide essa fabricação nos métodos subtrativos, aditivos e formativos.

Figura 3.02 – Diagrama da maneira que os objetos são produzidos na arquitetura e construção



Fonte: Tese de Doutorado (PUPO, 2009, p. 41)

A classificação dos exemplos de casos poderia ter sido organizada por meio da finalidade ou do número de dimensões dos equipamentos (figura 3.01). Entretanto, caso fosse organizado pelo número de dimensões dos equipamentos, esse método seria complexo para a compreensão do leitor, pois teria que ter sólido conhecimento a respeito do número de eixos desses equipamentos, os quais nem sempre são perceptíveis e divulgados pelos fabricantes.

A pesquisa também poderia ter sido organizada conforme a finalidade (figura 3.01), como é o caso da fabricação digital, sendo seus subprodutos: partes da edificação, a edificação por completo ou a fabricação de fôrmas. Contudo, como um dos objetivos desta pesquisa é quantificar a disponibilidade dos equipamentos CAD/CAM existentes na Região Metropolitana da Grande Vitória, o quesito 'disponibilidade' foi um fator relevante para a adoção da classificação conforme a maneira como os objetos são produzidos.

Essa disponibilidade é relevante para os projetistas terem o conhecimento sobre quais hardwares estão à sua disposição, sendo relevante a compreensão do que esses equipamentos podem executar (se subtração, adição ou conformação) e com quais materiais podem lidar.

A respeito da robótica, deve ser frisado que ela atua em qualquer uma das subdivisões dos métodos de produção, sendo escolhida aquela que melhor atende a maneira

como os objetos são produzidos. Isso devido ao potencial de versatilidade que o braço robótico proporciona, por apenas demandar a troca do seu *'final factor'*.

Existem casos de sucesso de casas fabricadas com a robótica na adição de concreto, como é o exemplo das casas desenvolvidas por Nováková e Vele (2021) e por XU et al. (2022), assim como na subtração com o corte de madeiras com *router* CNC acoplados em um braço robótico, de Schwinn (2017).

3.1.1 Subtrativa

Para Kolarevic (2001, p. 271), a fabricação subtrativa envolve a remoção de volume de um material sólido com o uso de uma fresa multi-axial. Existem diversos equipamentos CNC subtrativos disponíveis em setores da indústria e de prestadores de serviços, sendo os mais comuns os *routers* CNC, corte plasma CNC, tornos CNC mecânicos e corte a *laser* CNC.

Os *routers* CNC²⁹ são fresadoras acopladas em equipamentos controlados pela tecnologia CNC (*Computer Numerical Control*), que transmitem dados de corte para o *hardware* por meio de um *software*. Este sistema permite recortar diversos materiais, sendo a madeira a mais utilizada (figura 3.03).

Figura 3.03 – Fotografia do recorte de painel OSB com o uso de fresadora CNC



Fonte: Artigo científico (NARDELLI; BECKHEUSER, 2016)

²⁹ Os *routers* CNC são equipamentos considerados como 2.5D, conforme a classificação (figura 3.01) por número de dimensões dos equipamentos (PUPO, 2009). Os equipamentos 2.5D atuam não apenas nos eixos “x” e “y”, respectivamente, os eixos horizontal e longitudinal, mas também em um meio eixo, o “z”, considerado como o eixo vertical. No entanto, essa movimentação no eixo vertical é limitada, decorrente da movimentação do *spindle*, que é o motor que rotaciona a fresa de corte. Esse meio eixo normalmente permite o *spindle* atuar moderadamente em altura e é utilizado principalmente para criar relevos. Quando um equipamento não atua com essa meia dimensão a mais, é considerado 2D, cortadoras a *laser*, por exemplo. Caso atuem no terceiro eixo com maior liberdade, são considerados equipamentos 3D, como é o caso de impressoras 3D (PUPO, 2009, p. 30-40).

A técnica subtrativa é uma das mais utilizadas mundo afora. Além da madeira, outros materiais podem ser subtraídos (desde que sejam compatíveis com o equipamento em uso), que podem ser utilizados, entre outros, metais, isopor, papelão e acrílico.

Existem fresadoras que recortam metais com muita precisão (figura 3.04), as quais são utilizadas recorrentemente pela área de engenharia mecânica. Porém, a sua utilização também ocorre na construção civil para a fabricação de conexões metálicas e de outros materiais.

Figura 3.04 – Fotografia de fresadora CNC de metais



Fonte: (CANEPARO, 2014, p.121)

A plasma é outro exemplo de solução técnica para recortar metais com as cortadoras CNC (figura 3.05). O corte a plasma é um processo eficaz para cortar metais não ferrosos que não podem ser cortados pelo processo oxicorte (LIMA et al., 2023, p. 18).

Figura 3.05 – Fotografia de equipamento de corte CNC cortando metal de chapa grossa



Fonte: Artigo científico (ALMEIDA et al., 2020, p.230)

O corte a plasma, segundo Lima et al. (2023, p. 20):

é um processo que utiliza um bico com orifício otimizado para constringir um gás ionizado em altíssima temperatura, tal que possa ser usado para derreter seções de metais condutores. Um gás eletricamente condutivo (plasma) é usado para transferir energia negativa fornecida pela fonte plasma da tocha para o material a ser cortado (obra). A tocha serve de suporte para os consumíveis e fornece um fluido refrigerante para estas peças (gás ou água).

A vantagem do corte a plasma é que o ar comprimido entra no lugar de gases que também são utilizados neste setor industrial, como o hélio e o hidrogênio, por exemplo, o que reduz os custos, além de o oxigênio presente no ar ser responsável por aumentar a energia necessária e a otimizar em até 25% o tempo de corte (STANGER, 2020, p. 202).

Essa solução para o corte de metais é costumeiramente utilizada nas indústrias, onde a sua ocorrência ocorre com ou sem a tecnologia CNC. No entanto, as máquinas de corte a plasma CNC, segundo Stanger et al. (2020, p. 202), melhoram a qualidade das peças recortadas, tornando o processo de corte mais eficaz como um todo.

Outro exemplo de equipamento CNC subtrativo são os tornos CNC mecânicos (figura 3.06). Esses desempenham a mesma função de um torno mecânico convencional, mas segundo Carneiro (2017, p. 67) oferecem maiores precisão, segurança, produtividade e eficiência.

Figura 3.06 – Fotografia de equipamento torno CNC da Romi S.A.



Fonte: Website (ROMI S.A., 2023)

Os equipamentos de corte a *laser* CNC³⁰ (figura 3.07) também fazem parte da categoria de produção de objetos por meio da técnica subtrativa. Esses equipamentos são utilizados principalmente para prototipagem rápida. Inclusive, muitas faculdades de arquitetura o possuem em seu acervo para a produção de maquetes. No entanto, apesar desse equipamento poder ser utilizado para a fabricação digital, o tamanho da área de trabalho dessas máquinas, assim como a espessura reduzida de corte de material, pode limitar a sua usabilidade para projetos solicitantes de escalas maiores de produção.

Figura 3.07 – Fotografia de máquina a *laser* CNC gravando sobre um material cilíndrico na R.M.G.V.



Fonte: Acervo do autor

3.1.1.1 Subtração com Fresadoras CNC

Foram selecionados exemplos de projetos fabricados por meio do método subtrativo que utilizam fresadoras (*routers*) CNC para o corte de material. Normalmente esses equipamentos permitem o corte de madeira (ou derivados de madeira), acrílico, isopor e metais do tipo ‘chapa fina’, mas cada fabricante especifica os materiais que o seu equipamento comporta, assim como as respectivas espessuras de corte por material. Por isso, essas especificações devem ser verificadas com os fabricantes, mas como a madeira é o

³⁰ Os equipamentos *laser* CNC normalmente trabalham em dois eixos, portanto, conforme a categorização (figura 3.01) pelo número de dimensões de Pupo (2009), são considerados 2D. Esses podem cortar ou escarear um determinado material, mas não atuam na terceira dimensão (a vertical).

material utilizado com maior recorrência pelas fresadoras CNC, os exemplos a seguir demonstram casos em que esse material foi empregado.

A seção 3.1.1.1.1 trata apenas o uso de fresadoras CNC com as fresadoras fixadas ao sistema de pórticos que percorrem os três eixos dimensionais (“x”, “y” e “z”). O projeto exemplificado na seção 3.1.1.1.2 também utiliza fresadoras CNC. Entretanto, por meio de braços robóticos, sem o sistema de pórticos.

3.1.1.1.1 Subtração de Madeira com o Uso de Fresadoras CNC

Academicamente, as *routers* CNC são utilizadas com frequência por departamentos de arquitetura por diversas instituições em todo o mundo para explorar as possibilidades da fabricação digital. A ‘*Instant House*’³¹ (SASS; BOTHA, 2006), projeto desenvolvido por pesquisadores da *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), é um exemplo de uma casa (ou abrigo) fabricada com essa tecnologia. O objetivo desses pesquisadores foi desenvolver uma variedade de opções arquitetônicas com equipamentos da fabricação digital e materiais utilizados frequentemente pela construção civil (no caso, chapas de madeira).

Não obstante, houve um anseio por oferecer soluções arquitetônicas com *design* de customização em massa, para evitar formas genéricas de casas que são costumeiramente desenvolvidas em comunidades (SASS, BOTHA, 2006, p. 111-112).

O conceito dessa casa é que ela deveria ter sido realizada em um único ambiente (ou no sítio da obra ou em um ambiente fechado e controlado) a partir de um modelo arquitetônico digital, da disponibilidade de uma *router* CNC e das chapas de OSB. Esse tipo de solução, segundo os autores Sass e Botha (2006), pode ser de grande valia para a construção rápida e customizada, tanto para atender às necessidades dos moradores como às exigências de construção locais.

É importante salientar que esse conceito de casa é uma opção para exprimir a identidade de culturas: “em todas as culturas, as comunidades se esforçam para a construção de identidade através de expressões vernáculas de forma e decoração”³² (SASS, BOTHA, 2006, p. 112, tradução nossa). Inclusive, os autores defendem que o emprego dessa tecnologia pode

³¹ Tradução: ‘casa instantânea’.

³² “Across cultures, communities strive for building identity through both vernacular expressions of shape and decoration.”.

ser uma alternativa para locais onde desastres naturais podem demandar por habitação de qualidade a serem customizadas e entregues em um curto espaço de tempo.

A *'Instant House'* assemelha-se ao método construtivo que é utilizado nos Estados Unidos, denominada de *wood frame*, onde chapas de madeira (ou derivados de madeira) são vedações que fazem o fechamento das estruturas, que são com componentes pré-fabricados em madeira, como vigas e vigotas. Quando o projeto é concebido digitalmente, o modelo 3D contempla todos os encaixes e as soluções técnicas que posteriormente serão planificados nos padrões das chapas de OSB disponíveis no mercado, de modo que essas técnicas possam ser recortadas na *router* CNC. A figura 3.08 demonstra o modelo digital dessa residência (figura 3.08, imagem 'a'), a estrutura interna de seus fechamentos (Figura 3.08, imagem 'b') e todas as chapas de OSB com os desenhos dessas peças prontas para serem recortadas na *router* CNC (Figura 3.08, imagem 'c').

Figura 3.08: Modelo 3D da *'Instant House'* (a), modelo 3D da estrutura da *'Instant House'* (b) e modelo 3D das chapas padrão de OSB com todos os desenhos dos componentes construtivos da casa prontas para serem recortadas na *router* CNC (c)



Fonte: Artigo científico (SASS; BOTHA, 2006, p. 117)

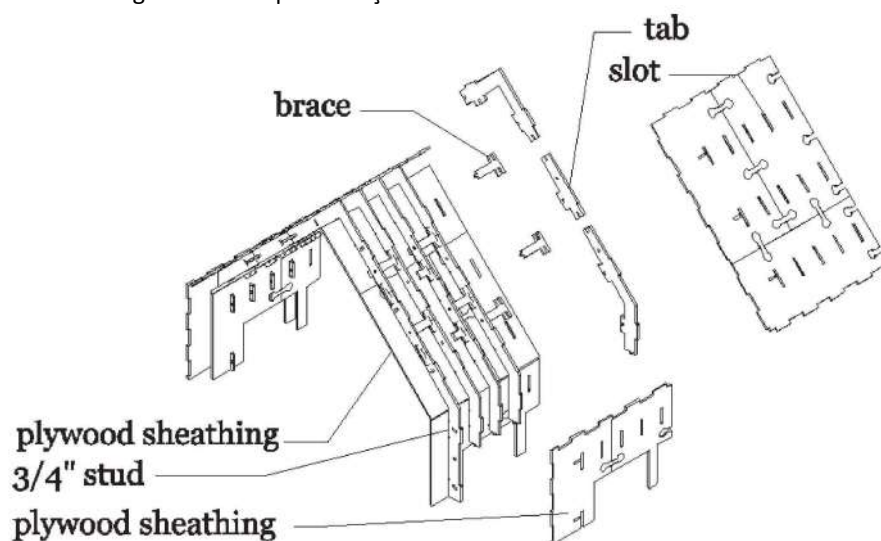
Segundo os autores Sass e Botha (2006, p. 118), o processo de concepção digital permite simplificar as complexidades construtivas que normalmente ocorrem no ato da execução. A necessidade por parafusos e conexões metálicas para travar componentes de um telhado é um exemplo disso.

É possível eliminar essas conexões em um projeto concebido digitalmente para ser recortado por equipamentos da fabricação digital. As *routers* CNC são capazes de criar entalhes e detalhes construtivos nas chapas que serão cortadas. Requer-se, no entanto, que esses detalhes sejam previstos durante a fase de projeto. A respeito do projeto, os autores afirmam que:

a longo prazo, nosso sistema de produção pode ser um link instantâneo e direto entre sistemas generativos de design e fabricação, assim como sistemas de avaliação. O usuário final pode participar deste processo de decisão, sem incorrer em custos além do inicial da infraestrutura tecnológica (uma fresadora CNC e um computador) (SASS, BOTHA, 2006, p. 112, tradução nossa)³³.

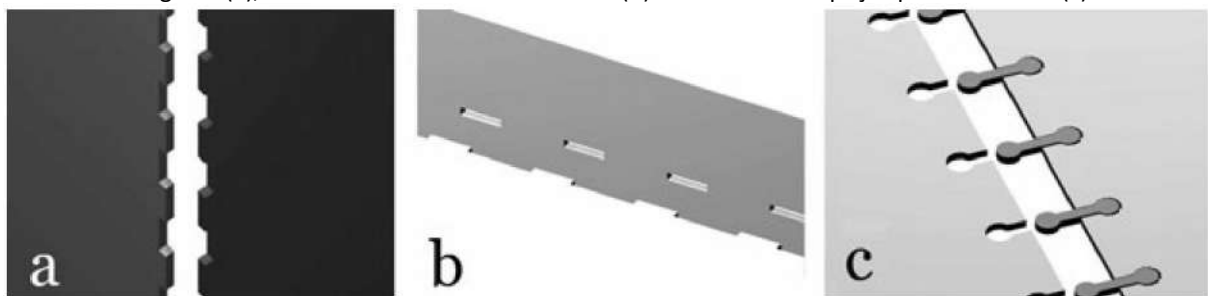
A figura 3.09 demonstra como as conexões foram feitas nesse projeto, sendo todas conectadas por encaixes feitos no próprio material utilizado (chapas de OSB) e mantidas no lugar por meio da fricção entre suas respectivas peças (figura 3.10).

Figura 3.09: Representação 3D da estrutura da 'Instant House'



Fonte: Artigo científico (SASS; BOTHA, 2006, p. 117)

Figura 3.10: Representações 3D das conexões adotadas no projeto da 'Instant House': encaixe entre chapas a 90 graus (a), estrutura de encaixe transversal (b) e encaixe entre peças paralelamente (c)



Fonte: Artigo científico (SASS; BOTHA, 2006, p. 119)

A construção deste abrigo teve a participação de quatro pessoas e levou um mês para ser concluída, incluindo a fase de recorte do material e a da construção de todos os seus

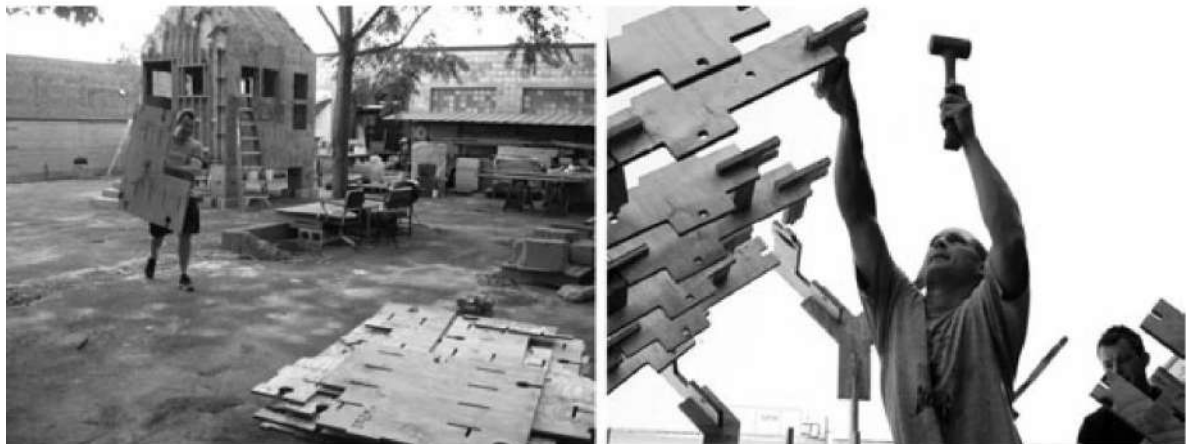
³³ "In the long term our production system can be a direct instantaneous [9] link between generative design and fabrication and evaluation systems. The end user can participate in this decision process, without incurring cost beyond the initial technological infrastructure (a CNC router and computer).".

componentes construtivos. Aliás, nenhum componente foi grande demais que não pudesse ser transportado a pé por uma única pessoa (figura 3.11), sendo a maior seção de 182,88 x 121,92cm. Foram utilizadas 114 chapas padrão de OSB (122x244cm).

À época, cada chapa custava \$22 dólares, cujo custo total (somente das placas) foi de \$2.508 dólares (SASS, BOTHA, 2006, p. 119). É de se observar que todas as peças foram impermeabilizadas para protegê-las da umidade. Além das chapas OSB, foram feitas quatro bases em concreto armado para suportar o peso do abrigo e evitar o contato com umidade do solo.

O processo construtivo até a conclusão da casa pode ser observado na figura 3.12. Os autores Sass e Botha (2006) concluem que a variabilidade formal pode ocorrer com alterações na fachada e na planta baixa do abrigo, desde que os componentes construtivos sejam parametrizados e estudos por vir possam desenvolver elementos generativos para variar a forma das casas.

Figura 3.11 – Fotografia do transporte das peças prontas para o uso (imagem à esquerda) e fotografia da montagem da estrutura do telhado (imagem à direita)



Fonte: Artigo científico (SASS; BOTHA, 2006, p. 119)

Figura 3.12 – Fotografias da 'Instant House': com a estrutura das paredes instaladas (imagem à esquerda), com as estruturas das paredes e do telhado concluídas (imagem central) e após o seu término (imagem à direita)



Fonte: Artigo científico (SASS; BOTHA, 2006, p. 120)

3.1.1.1.2 Subtração de Madeira com o Uso de Fresadoras CNC e a Robótica

No caso do *Landesgartenschau Exhibition Hall – Schwäbisch Gmünd*, Alemanha, 2014 (SCHWINN, 2017, p. 111-124), apesar de ser um pavilhão (figura 3.13), ele é citado como um exemplo de arquitetura auxiliada por técnicas e instrumentos digitais, a qual pode ser adaptada para uma residência.

Figura 3.13 – Fotografia da fachada do pavilhão *Landesgartenschau Exhibition Hall*



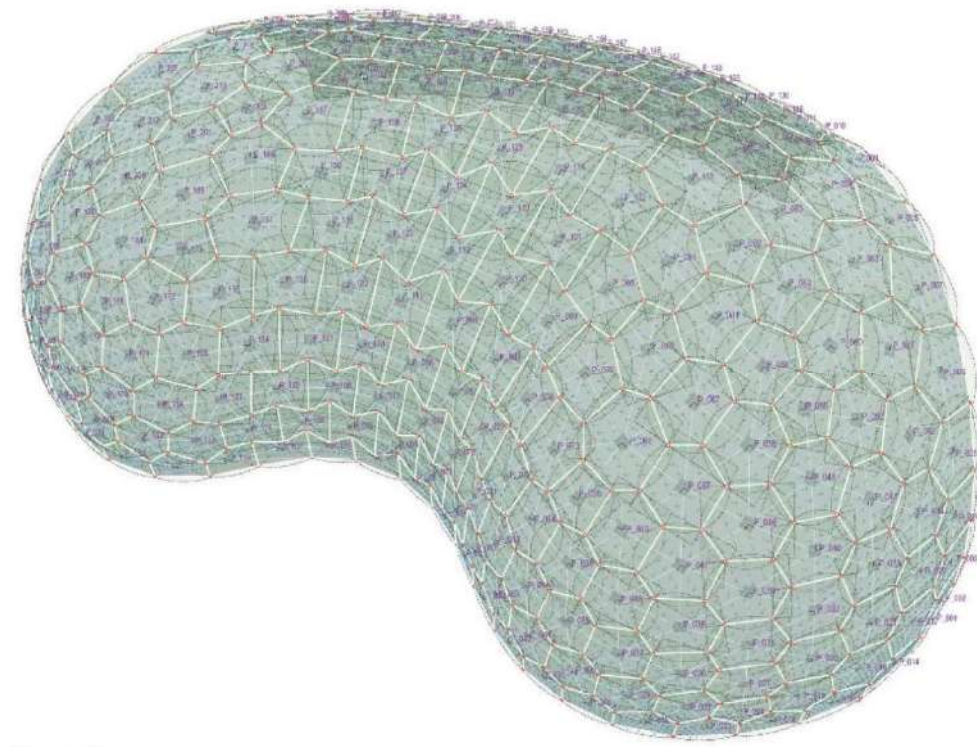
Fonte: Artigo científico (SCHWINN, 2017, p. 113)

Trata-se de uma casca estrutural autoportante feita em componentes poligonais de madeira compensada, dois domos sobrepostos, área útil de aproximadamente 125m² e pé direito máximo de seis metros de altura. Para a sua construção, utilizou-se madeira tipo compensado, de 50mm de espessura, proveniente de uma fábrica local, fazendo uso de uma espécie regional de madeira; inclusive, essa espécie esteve presente como integrante do jardim do parque onde o pavilhão foi erguido.

Este projeto exemplifica a arquitetura cuja tectônica é o conceito de '*informed tectonics in material based design*', a qual a vedação da arquitetura também é a estrutura do pavilhão, formada por uma geometria complexa e singular. Inclusive, os autores mencionam a importância de profissionais de áreas correlatas durante todo o processo criativo e construtivo (SCHWINN, 2017, p. 111). Um arquiteto, um engenheiro civil e outro mecatrônico e um profissional do campo da geodésia se envolveram com a construção desse projeto.

O modelo digital feito em *software* paramétrico pôde calcular a complexa geometria (figura 3.14), que teve a divisão de sua estrutura geodésica subdividida em colmeias para facilitar a montagem através de diversas peças em madeira. Cada peça possui uma geometria singular, planificada no *software* para posteriormente ser cortada com o uso da robótica para o corte dos painéis em madeira. O equipamento utilizado para realizar os cortes nos painéis em madeira compensada foi um braço de robô industrial de 6 eixos com uma fresa em sua extremidade (figura 3.15).

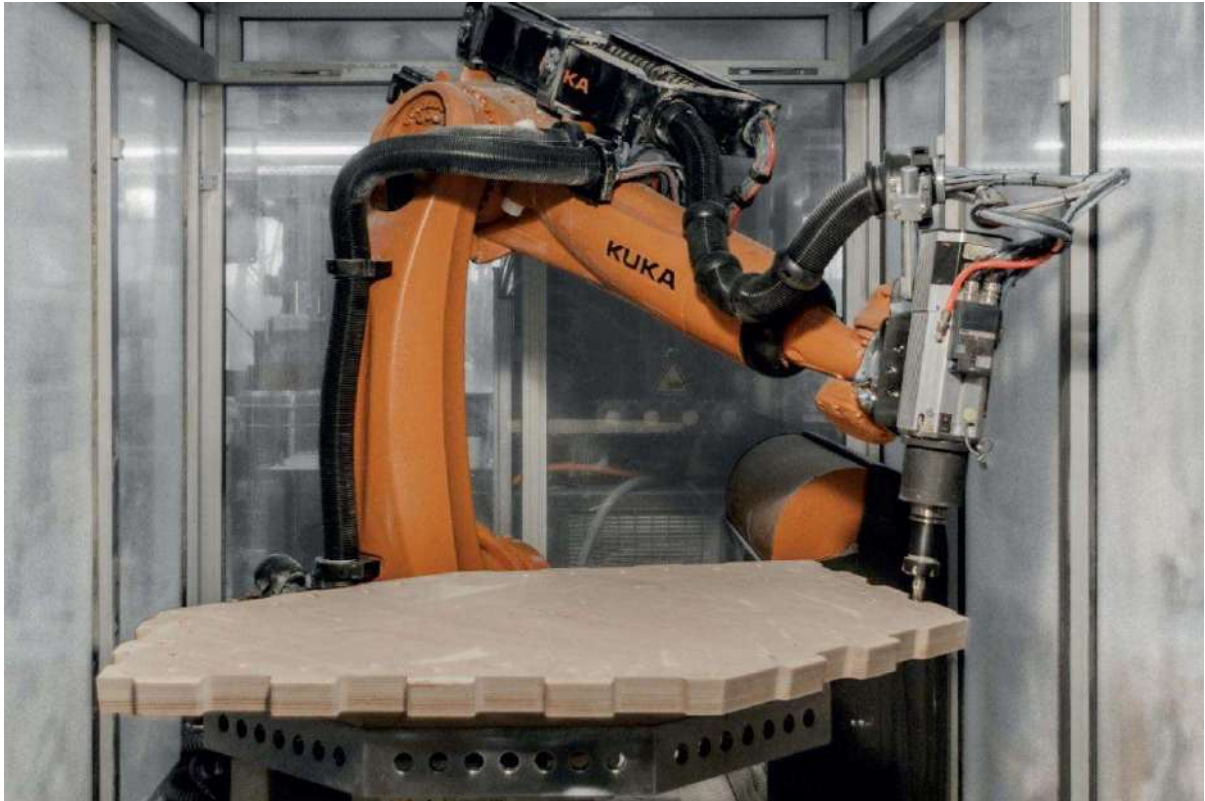
Figura 3.14 – Modelo tridimensional do pavilhão *Landesgartenschau Exhibition Hall* com a planificação dos componentes construtivos



Fonte: Artigo científico (SCHWINN, 2107, p. 122)

Apesar de utilizar a robótica como instrumento para recortar chapas de madeira por meio da tecnologia CNC (*Computer Numerical Control*), a técnica da fabricação digital também é a mesma daquela empregada nas casas Wikihouses, a subtrativa (KOLAREVIC, 2001, P. 271).

Figura 3.15 – Fotografia do processo de fabricação robotizada de componentes construtivos com *router* CNC



Fonte: Artigo científico (SCHWINN, 2017, p. 117)

Como contexto de implantação, procurou-se utilizar uma madeira que é comumente encontrada nas rendosas do sítio onde o pavilhão foi edificado, a faia, ou '*fagus grandifolia*'³⁴ (SCHWINN, 2017, p. 114, tradução nossa). Porém, a espécie utilizada não é bem aceita na construção por motivos culturais, o que despertou o interesse dos pesquisadores em incentivar o seu uso, por esta ser abundante na região. Os equipamentos do campo da robótica foram de fácil acesso aos projetistas, sendo esta parte de um estudo exploratório de uma pesquisa universitária (SCHWINN, 2017, p. 111-124).

A logística de montagem de todo o pavilhão levou três semanas para ser concluída e apenas três pessoas para erguerem a estrutura. Andaimos também foram utilizados (figura 3.16). O design, a fabricação das chapas e a usinagem das peças foram todas feitas em um raio de 100km do sítio de implantação do pavilhão, minimizando a necessidade por transporte. O resultado da construção foi uma edificação autoportante cuja estrutura é toda em madeira, exceto por parafusos que foram utilizados para conectar os componentes construtivos.

³⁴ Termo original em inglês: '*Beech*'.

Quanto ao corte das peças, procurou-se aproveitar o tamanho máximo dos painéis disponibilizados pelo fabricante, para evitar desperdícios e otimizar o uso do material (SCHWINN, 2017, p. 111-124).

Figura 3.16 – Fotografia do processo de montagem do pavilhão *Landesgartenschau Exhibition Hall*



Fonte: Artigo científico (SCHWINN, 2107, p. 116)

O resultado de todo o processo deste pavilhão foi uma construção leve para a fundação, porém com alta rigidez estrutural, mesmo sendo em madeira. Comparada com o sistema *Wikihouse*, o pavilhão apresenta vantagens tanto na possibilidade de exploração formal, como no sistema de encaixes entre peças, onde não é necessário muito tempo de usinagem. Com isso, foi possível fabricar mais peças em menos horas.

Uma obra totalmente estanque, com tratamento que impermeabiliza a superfície. É também toda em madeira, sendo uma construção ecologicamente exemplar por utilizar estrutura e vedação com material de energia renovável (figura 3.17).

A possibilidade de exploração formal é um grande ponto positivo, afinal, a customização de componentes é um grande atributo deste projeto, sendo composta por 243 placas sem nenhuma geometria repetida (SCHWINN, 2017, p. 118). No entanto, o excesso de equipamentos de última geração, como braços de robôs, pode ser um fator determinante na tomada de decisão pela técnica construtiva adotada.

Figura 3.17 – Fotografia interna do pavilhão *Landesgartenschau Exhibition Hall*



Fonte: (SCHWINN, 2107, p. 112)

3.1.2 Aditiva

A fabricação aditiva envolve o incremento de material, o qual é depositado camada por camada por meio da extrusão, em um processo que é antônimo ao da fresagem, por ocorrer adição de material (KOLAREVIC, 2001, p. 272). As impressoras 3D produzem estruturas contínuas, autoportantes, geradas a partir da extrusão de um determinado material, as quais são classificadas como sólidos celulares.

Esses sólidos celulares são similares a estruturas de células existentes na natureza, onde há uma estrutura contínua com vazios em seu interior. Esses vazios (figura 3.37) produzem estruturas rígidas, leves e econômicas, com a redução na quantidade de material necessária, sendo uma solução eficaz e amplamente estudada no meio da fabricação digital.

Os estudos de Gibson e Ashby (1997) são referência nessa área, sendo que eles colaboraram para a ampliação dos estudos a respeito da biomimética na arquitetura. Existem algumas soluções técnicas para os equipamentos aditivos (figura 3.18), como: sistema de 'portais'³⁵, 'cabos suspensos'³⁶, 'enxame'³⁷, 'robótica'³⁸ e 'combinado com dobradura'³⁹ (LABONNETE et al., 2016).

³⁵ Termo original em inglês utilizado no texto original: '*Gantry*'.

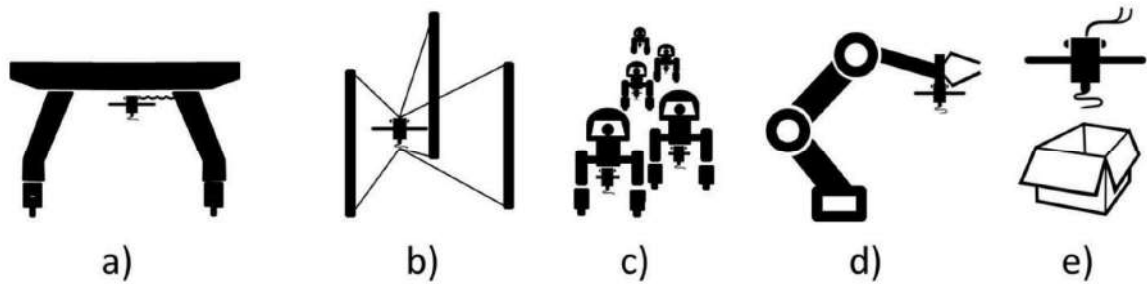
³⁶ Termo original em inglês utilizado no texto original: '*Cable-suspended*'.

³⁷ Termo original em inglês utilizado no texto original: '*swarm*'.

³⁸ Termo original em inglês utilizado no texto original: '*robotics*'.

³⁹ Termo original em inglês utilizado no texto original: '*combined with folding*'.

Figura 3.18 – Ilustrações gráficas de soluções técnicas para a impressão 3D: Sistema de portais (a), cabos suspensos (b), enxame (c), robótica (d) e combinado com dobradura (e)

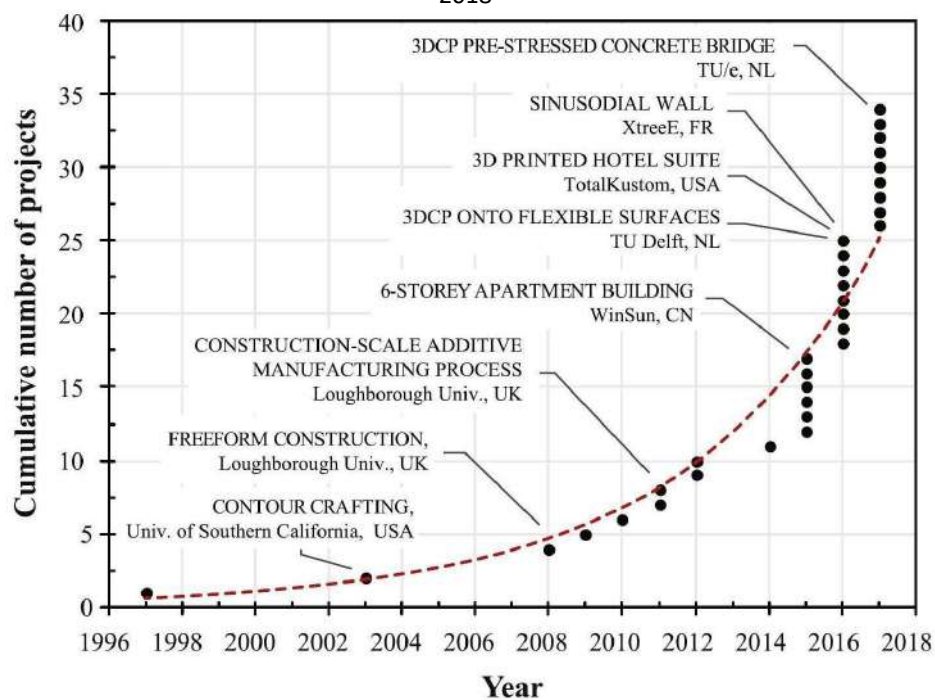


Fonte: Artigo científico (LABONNETE et al., 2016)

O termo em inglês para as impressoras 3D é o '*3D Printing*' (3DP), mas esse termo acabou se tornando muito genérico, podendo representar a impressão 3D aditiva que utiliza qualquer escala de equipamento, materiais e ramos de atuação (LABONNETE et al., 2016). No entanto, quando o equipamento é especificamente para a impressão 3D com o uso de concreto como material construtivo, o termo '*3D Concrete Printing*' (3DCP) é utilizado.

Desde 1997, o uso de equipamentos 3DCP na construção civil tem aumentado (gráfico 3.01), sendo que em 2018, havia mais de trinta grupos de pesquisa mundialmente pesquisando a seu respeito (BUSWELL, 2018, p. 1-2).

Gráfico 3.01 – Construção 3DCP em números de construções com essa tecnologia mundialmente, entre 1997 e 2018



Fonte: Artigo científico (BUSWELL et al., 2018, p. 2)

Existe uma grande gama de impressoras 3D que produzem em diversas escalas de área de trabalho, assim como com inúmeras possibilidades de materiais de extrusão. Dessa forma, a fabricação aditiva foi desmembrada nos materiais que a maioria comporta, que normalmente traduz o porte delas.

A fim de elucidar essas questões, inicialmente serão apresentados exemplos de habitação feita com concreto como matéria-prima, tanto com o uso das impressoras 3D como de braços robóticos. Em seguida, serão apresentadas casas onde impressoras 3D utilizam derivados de terra e plástico como matéria-prima.

3.1.2.1 Aditivas Extrusivas

Existem algumas tecnologias digitais para a fabricação digital com o uso do concreto como matéria-prima. Wangler et al. (2016) mencionam cinco tecnologias, sendo duas com o uso de fôrmas e três sem o uso de fôrmas. Das opções que usam fôrmas, a primeira, ‘preenchimento de formas com o uso de fôrmas’⁴⁰, é produzida de acordo com a necessidade de cada projeto, sendo estas utilizadas apenas uma vez. Equipamentos com fresas controladas por tecnologia CNC podem ser utilizadas para fabricar fôrmas complexas em materiais como a madeira ou blocos de EPS. Essa é a solução menos ecológica, pois utiliza um material que será descartado para fabricar estruturas ou vedações em concreto.

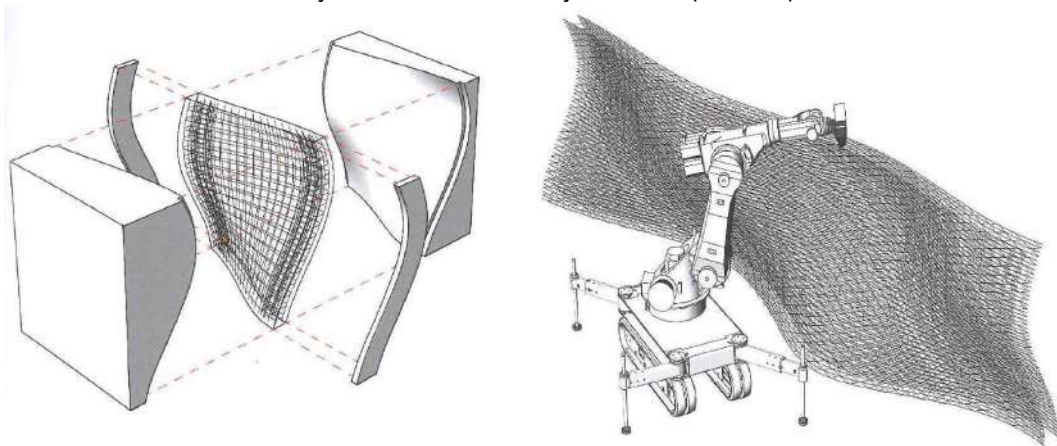
Já a segunda opção com fôrma, o ‘molde-malha’⁴¹, utiliza uma malha gerada com um equipamento controlado por meio de tecnologia CNC, como é o caso da robótica (figuras 3.19/3.20). Esta malha é utilizada para estruturar o concreto que é lançado manualmente por cima daquela malha, com isso, a própria malha é integrante da estrutura final, não sendo necessário o descarte de fôrmas.

⁴⁰ Termo em inglês: ‘*Form filling formworks*’.

⁴¹ Original em inglês: ‘*Mesh-mold*’. Um caso é o estudo de Hack e Lauer et al. (2014), que desenvolveram uma pesquisa para evitar o uso de fôrmas de concreto (figura 3.19). Esta pesquisa desenvolveu uma estrutura complexa com o uso de um braço robotizado, a ser executado na indústria. Posteriormente, *in loco*, o concreto é lançado à treliça fabricada na indústria de modo manual pelos executores, com uma colher de pedreiro. Os autores alegam que é muito mais prático desenvolver estruturas complexas com um material leve e rígido, como o aço, para justamente servir como elemento estruturante do concreto e depois adicionar manualmente o concreto na obra (figura 13), do que levar ao sítio o equipamento delicado para extrudar o concreto (HACK, et al., 2014).

As três alternativas que não usam fôrmas, todas com técnica aditiva, são: 'impressão 3D com extrusão de concreto por camadas'⁴², 'jateamento de material ligante'⁴³ e 'deformação por deslizamento'⁴⁴ (Wangler et al., 2016, p. 68-71). Dentre estas opções, a impressão 3D com extrusão de concreto por camadas é a mais difundida para a produção de habitação, especialmente pela rapidez e pela possibilidade de produção em larga escala.

Figura 3.19 – Perspectivas 3D: Fôrmas de concreto em processo convencional (à esquerda); Método de molde treliçado com o uso de braço robótico (à direita)



Fonte: Artigo científico (HACK et al., 2014, p. 227)

Figura 3.20 – Fotografia de treliças e o sistema de aplicação do concreto em obra



Fonte: Artigo científico (HACK et al., 2014, p. 226)

Os exemplos de casos descritos a seguir demonstram situações com o uso de Impressão 3D com extrusão de concreto por camadas, sendo por meio de impressoras 3D, que normalmente atuam em três eixos, ou, com o uso de braços da robótica. Estas duas possibilidades resultam de pesquisas do professor Behrokh Khoshnevis (2004), um pesquisador visionário que há aproximadamente vinte anos já reconheceu o potencial desta

⁴² '3D printing by layered extrusion'.

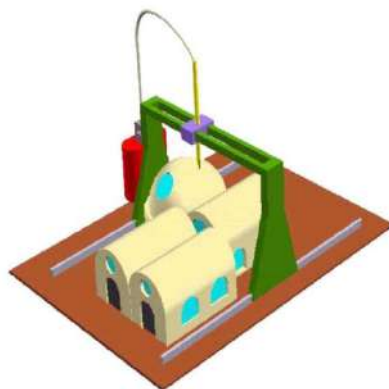
⁴³ 'Binder-Jetting'.

⁴⁴ 'Slip-forming'.

tecnologia para a produção de residências com baixo custo “devido à sua rapidez e capacidade de utilização de materiais *in loco*, a extrusão por camadas tem o potencial de aplicação imediata em moradias de baixo custo e abrigos de emergência.”⁴⁵ (KHOSHNEVIS, 2004, p. 18, tradução nossa).

Khoshnevis (2004) é reconhecido por ter iniciado o termo ‘*contour crafting*’ (CC), e ter relacionado este termo com a robótica e com tecnologias da informação. Inclusive, a maioria das impressoras 3D de grande porte usadas atualmente para a fabricação de residências se assemelha à ideia de Khoshnevis (figura 3.21), que é um sistema de pórticos que se movem nos eixos “x”, “y” e “z” adicionando material construtivo.

Figura 3.21 – Perspectiva 3D da construção de uma edificação com adobe e extrusão por camadas



Fonte: Artigo científico (KHOSHNEVIS, 2004, p. 7)

3.1.2.1.1 Extrusão de Concreto com o Uso de Impressoras 3D

Conforme a previsão em 2004 de Khoshnevis (2004), a impressão 3D de materiais extrudados por camadas para a produção de casas é uma tendência mundial. Inúmeras empresas estão surgindo em todo o mundo e trabalham especificamente com essa tecnologia, que consiste em uma grande impressora de três eixos que deposita o material por meio de um bocal de saída do concreto (imagem superior da figura 3.22).

Apesar do concreto ser um material que emite muito dióxido de carbono na atmosfera durante a sua manufatura, Khoshnevis (2004, p. 18) afirma que é possível zerar o desperdício de material com esta tecnologia, o que torna o seu uso mais atrativo. Aliás, isso

⁴⁵ “Due to its speed and its ability to use in-situ materials, contour crafting has the potential of immediate application in low income housing and emergency shelter construction.”.

justifica o surgimento de novas empresas neste setor, como é o caso da WinSun (imagem inferior da figura 3.22).

Figura 3.22 – Fotografias: Superior - Adição de concreto com a técnica '*contour crafting*'; Inferior - Casa em concreto da WinSun montada com peças extrudadas em impressoras 3D



Fonte: Artigo científico (WANGLER et al., 2016, p. 70)

Logisticamente, a maior parte destas empresas optam por fabricar os componentes construtivos das casas em um ambiente industrial, onde os equipamentos ficam seguros e protegidos de chuvas e de outros danos que podem atrapalhar o funcionamento deles (figura 3.23).

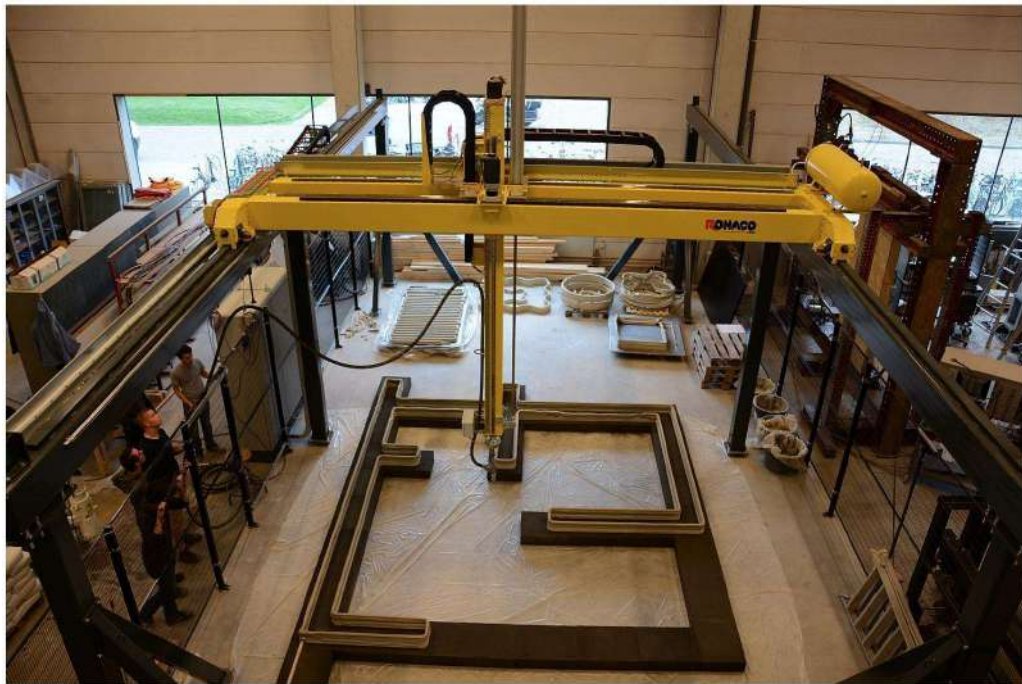
Posteriormente, as peças construtivas são transportadas em caminhões até o sítio de implantação. Um dos desafios desta tecnologia é o tempo de secagem do concreto, que precisa ser rápido para enrijecer e receber a próxima camada de concreto. Essa camada passará no mesmo percurso, no entanto, deve permanecer molhado para evitar juntas secas entre as camadas.

Estudos sobre o tempo de secagem do material são detalhados com fórmulas matemáticas por Wangler et al. (2016). Outro fator que pode inviabilizar o sistema é o acesso às tecnologias. A distância para entregar as peças produzidas na indústria pode inviabilizar a sua utilização.

Os autores Hossain et al. (2020) defendem que a tecnologia 3DCP é indicada para a produção de casas, ou de projetos menores, sendo que isso se deve às limitações das dimensões da área de trabalho dos equipamentos e a falta de flexibilidade para customização. Essa falta de customização ocorre após a obra, devido à dificuldade de se modificar uma planta baixa por conta da estrutura autoportante.

Com isso, até o momento essa tecnologia não é indicada para edifícios em altura. No entanto, esse sistema construtivo tem o potencial de redução de custos, do uso de material e na necessidade por mão de obra durante todo o período construtivo, e oferece mais segurança do trabalho, além de ser durável e sustentável (HOSSAIN, 2020).

Figura 3.23 – Fotografia de impressora 3D imprimindo com concreto



Fonte: Artigo científico (MARIJNISSEN; ZEE, 2017, p. 301)

3.1.2.1.2 Extrusão de Concreto com o Uso da Robótica

O 'Prvok', Sérvia (NOVÁKOVÁ; VELE, 2021), é um projeto desenvolvido geometricamente em *software* digital, cujos dados foram passados para um braço de robô para adicionar concreto extrudado sem o uso de fôrmas para fabricar uma casa flutuante. O projeto foi desenvolvido digitalmente em *software* *Rhino* com o *plugin* *Grasshopper*, executado em um ambiente fechado, utilizando o Robô ABB IRB 6700 para adicionar o concreto (NOVÁKOVÁ; VELE, 2021, p. 137).

O conceito logístico envolve a produção de toda a estrutura em um ambiente controlado, tendo por limite o tamanho do caminhão que transportou a edificação em concreto até o sítio de sua implantação. Esta casa foi implantada em uma base flutuante em um lago (figuras 3.24/3.25/3.26), aberta para a população conhecer o resultado deste sistema construtivo, sendo essa a primeira deste tipo construtivo fabricada na Sérvia (NOVÁKOVÁ; VELE, 2021).

Figura 3.24 – Fotografia da casa flutuante ‘Prvok’ em concreto digitalmente extrudado



Fonte: Website da ‘Prvok’ (PRVOK, 2021)

A redução no desperdício de materiais durante o processo de manufatura da edificação contribui com o meio ambiente, porém, por ser um sistema estrutural 100% dependente do concreto, não vem a ser uma opção das mais ecológicas. A extrusão de concreto (figura 3.27) não requer o uso de fôrmas e o concreto sendo depositado apenas onde requerido (figura 3.28) minimiza a geração de resíduos sólidos de excedentes de construção, reduzindo para praticamente zero o desperdício de material construtivo.

A fórmula do concreto a ser utilizada em concreto aditivo é um desafio. Neste projeto inúmeras empresas fabricantes de concreto colaboraram, mas apesar de fazerem o produto especificamente para impressão 3D, apenas uma obteve resultados satisfatórios, após uma série de testes realizados pela equipe.

O *Master Flow 3D 100*, da MBSS, neste caso, foi a matéria-prima escolhida. Isto evidencia que deve haver um compromisso das empresas fabricantes de concreto com os construtores que utilizam a tecnologia 3D, o que pode dificultar o sucesso do método construtivo (NOVÁKOVÁ; VELE, 2021). O acesso aos equipamentos da robótica também é um fator limitante para o sucesso de sua manufatura.

Figura 3.25 – Fotografia da área externa da ‘Prvok’



Fonte: Website da ‘Prvok’ (PRVOK, 2021)

Figura 3.26 – Fotografia do interior da ‘Prvok’



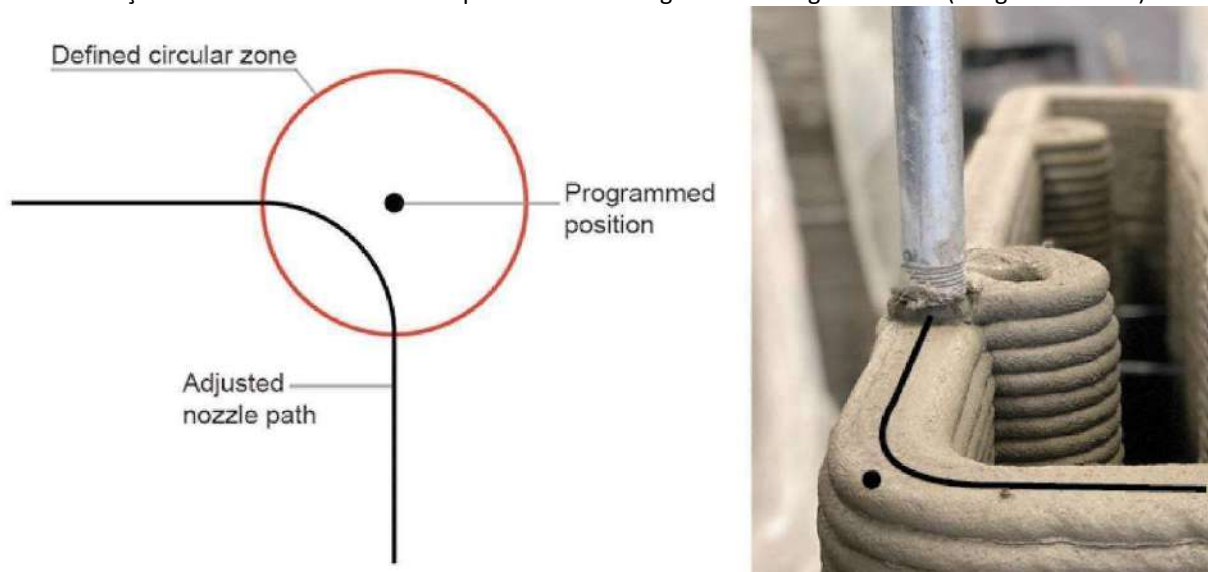
Fonte: Website da ‘Prvok’ (PRVOK, 2021)

Figura 3.27 – Fotografia do processo produtivo da casa ‘Prvok’



Fonte: Artigo científico (NOVÁKOVÁ; VELE, 2021, p. 143)

Figura 3.28 – Diagrama de desvio da passagem da extrusão de concreto (imagem à esquerda) e fotografia da execução da extrusão do concreto representando o diagrama da imagem ao lado (imagem à direita)



Fonte: Artigo científico (NOVÁKOVÁ; VELE, 2021, p. 142)

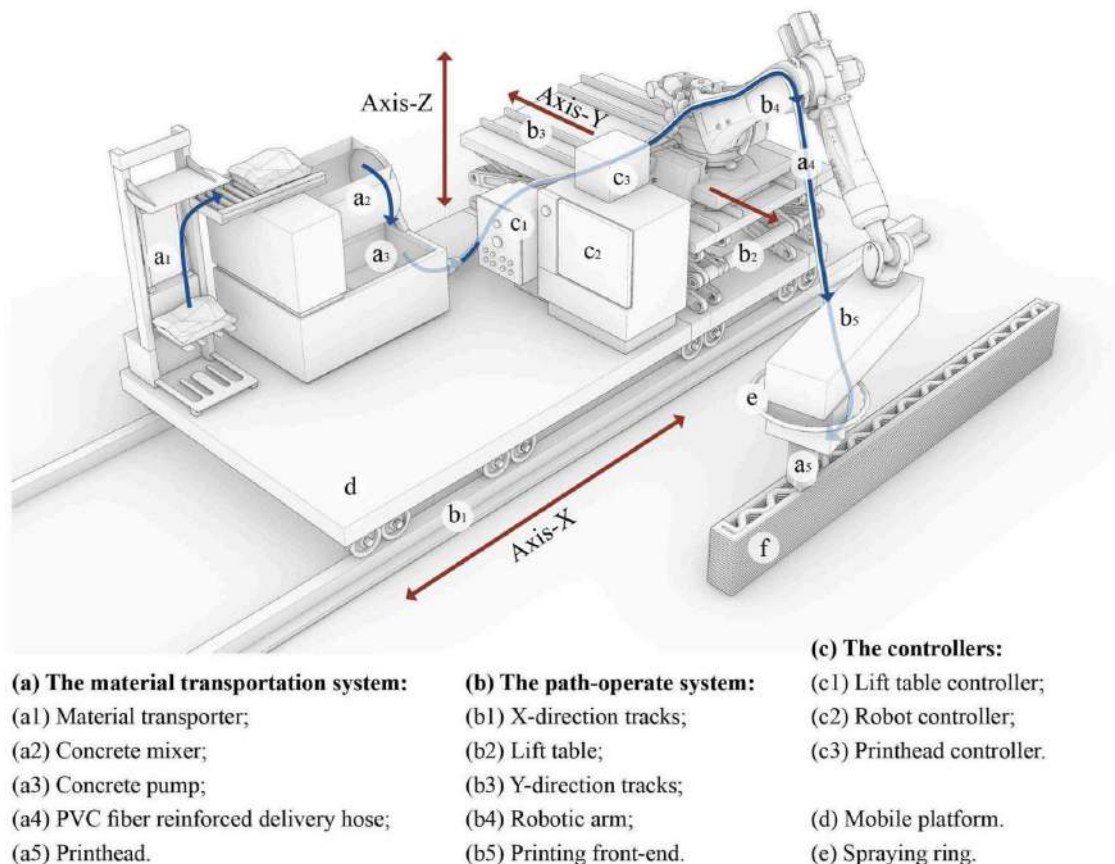
Um outro exemplo de habitação produzida pela extrusão de concreto por intermédio de braços robóticos é a casa de campo WJZ, localizada na vila Wujiazhuang, China (figura 3.29). Neste estudo de Xu et al. (2022), o objetivo foi estudar um fluxo de trabalho para construção com a extrusão de concreto e braços robóticos. No caso, um braço robótico foi posto em uma base móvel (figura 3.30), que se movia na obra tanto no eixo vertical como no horizontal, para prover maior área de alcance ao braço robótico.

Figura 3.29 – Fotografias da casa de campo concluída: (a) Perspectiva Oeste; (b) Sala de estar; (c) Grande angular da cobertura



Fonte: Artigo científico (XU et al., 2022, p. 16)

Figura 3.30 – Perspectiva tridimensional do sistema robótico móvel de extrusão 3D



Fonte: Artigo científico (XU et al., 2022, p. 8)

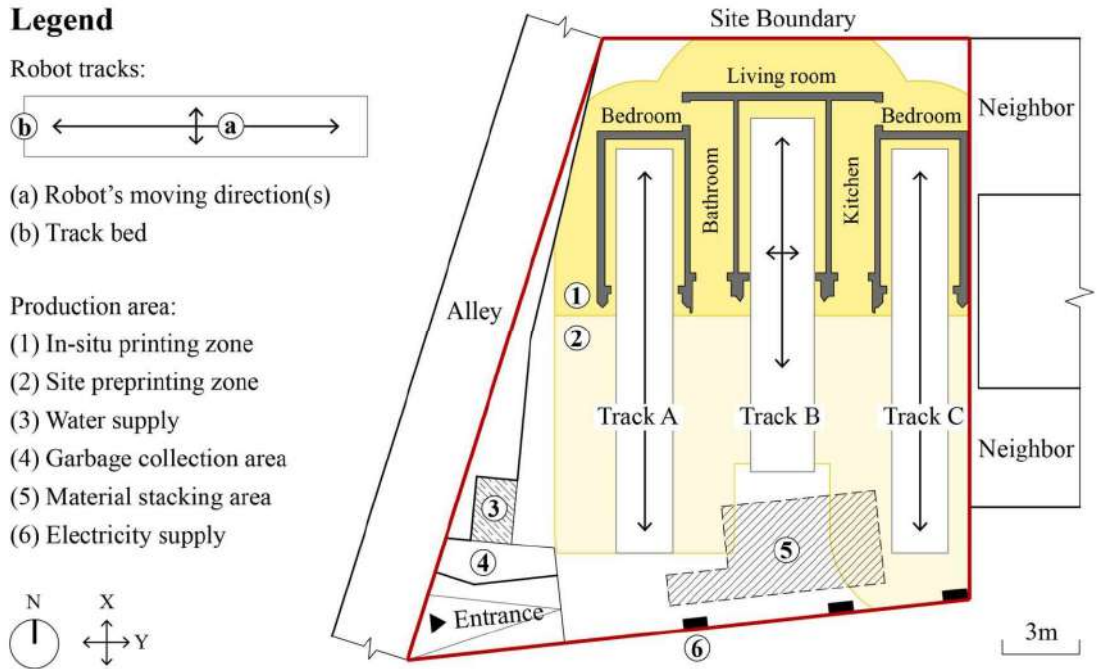
Para maximizar a produção, foram utilizados três sistemas deste tipo, isto é, o uso simultâneo de três braços robóticos para a produção de componentes construtivos. O projeto do canteiro de obras pode ser observado na figura 3.31, onde foram utilizados três eixos para a movimentação dos sistemas extrusivos com seus respectivos braços robóticos.

Inicialmente foram feitas as fundações das paredes, em seguida as paredes estruturais e decorativas, e, por conseguinte, as coberturas, com peças tanto planas como arqueadas (figura 2.32), o que demonstra o potencial de customização de elementos pré-fabricados no próprio canteiro de obras. As peças da cobertura foram fabricadas no sítio do canteiro de obras, porém, foram feitas ao lado da construção para posteriormente serem içadas até a casa como peças pré-fabricadas de concreto.

A figura 3.33 demonstra a fundação, desde a fase de projeto, seguida por seu protótipo, até a fase de obras com sua respectiva construção. Como resultado do fluxo de trabalho adotado, quando comparado a um sistema convencional de construção com concreto reforçado, houve uma redução em 62,4% dos recursos humanos.

Por ser um sistema organizado e com planejamento, também foi possível reduzir em 24,5% do tempo de produção quando comparado a um sistema similar sem um fluxo de trabalho pré-estabelecido. Quando comparado a uma construção 3DCP comum, houve uma diferença de 18,3% para 76,5% na utilização do próprio método em todo o processo construtivo de uma residência similar.

Figura 3.31 – Planta baixa esquemática do fluxo de trabalho no sítio de construção da casa de campo WJZ



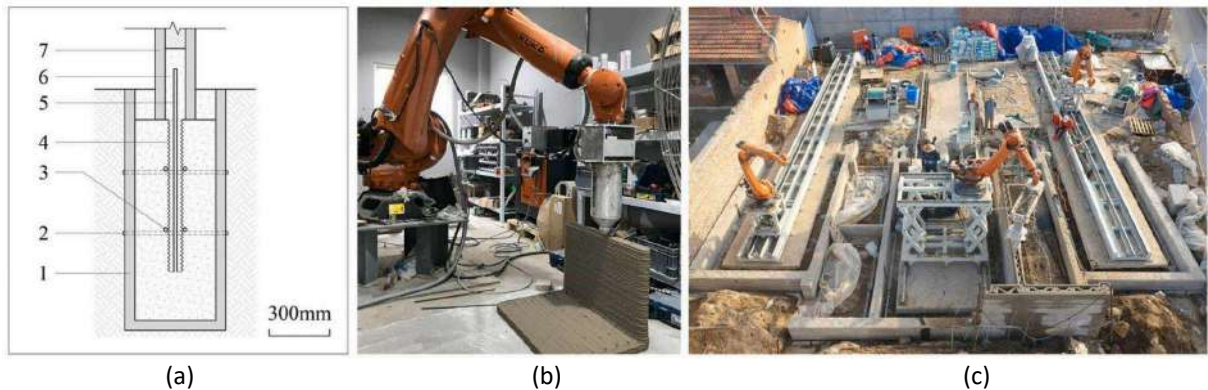
Fonte: Artigo científico (XU et al., 2022, p. 9)

Figura 3.32 – Ilustração gráfica dos componentes construtivos da casa de campo: Vala de fundação; Parede estrutural; Parede decorativa; Cobertura em arco; Cobertura Plana

Foundation Trench	Structural Wall	Decorative Wall	Arch Roof	Flat Roof
Printing Direction Horizontal	Horizontal	Horizontal	Vertical	Vertical
Loading Direction 				
Printing Environment Factory preprinting	In-situ printing	Site preprinting	Site preprinting	Site preprinting

Fonte: Artigo científico (XU et al., 2022, p. 9)

Figura 3.33 – (a) Corte 2D da solução construtiva da fundação e seu respectivo encontro com paredes; (b) Fotografia do processo de impressão 3D da vala da fundação; (c) Fotografia do canteiro de obras com três braços robóticos em operação e as bases das paredes edificadas



Fonte: Artigo científico (XU et al., 2022, p. 13)

3.1.2.1.3 Extrusão de Terra como Matéria-prima com o Uso de Impressora 3D

O uso de outros materiais foi comentado por Khoshnevis (2004), como é o caso do adobe. A *'TECLA House'* (figuras 3.34/3.35) é um exemplo de casa fabricada com o uso de impressora 3D como meio de produção, e, a terra como material construtivo; arquitetura de Mario Cucinella e execução por WASP (CHIUSOLI, 2021), em Massa Lombarda, Itália, 2021, uma casa com área de 60 metros quadrados. Uma impressora 3D (figura 3.36) que utiliza terra como matéria-prima para a construção de casas. A terra, ou solo, provém da própria região onde a casa será edificada. Palha de arroz, um rejeito da produção do arroz, pode ser adicionado às paredes a base de terra para melhorar os níveis de proteção térmica (figura 3.37). Logisticamente (figura 3.38), a matéria prima é oriunda do próprio local de implantação, dispensando gastos com fretes de materiais e com a aquisição de matéria-prima. No entanto, deve ser gasto com frete para levar o equipamento até o sítio de implantação das casas.

Figura 3.34 – Fotografia noturna da obra acabada



Fonte: Website da ArchDaily (ARCHDAILY, 2021)

Figura 3.35 – Fotografia interna da cozinha



Fonte: Website da ArchDaily (ARCHDAILY, 2021)

Figura 3.36 – Fotografia do processo construtivo



Fonte: Website da WASP (CHIUSOLI, 2021)

Figura 3.37 – Fotografia da parede em produção



Fonte: Website da WASP (CHIUSOLI, 2021)

Figura 3.38 – Ilustração gráfica do conceito do canteiro de obras e do método construtivo



Fonte: Website da WASP (CHIUSOLI, 2021)

O sistema desenvolvido pela empresa italiana, WASP, já está disponível para aquisição em seu site (CHIUSOLI, 2021), que vende a impressora 3D. Segundo a fabricante (CHIUSOLI, 2021), esta técnica é uma excelente solução para comunidades carentes, isoladas ou com poucos recursos econômicos. No entanto, por ser uma empresa estrangeira, a compra dos equipamentos fica sujeita ao interesse de incorporadores e empresários que queiram investir neste sistema. Além disso, a durabilidade do material ainda é uma incógnita, apesar dos fabricantes dizerem que são duráveis. Há também uma limitação do sistema para a produção em altura, e, a planta baixa em formato circular, o que pode dificultar a disposição de mobiliário e *layout* (figura 3.35). Ampliações futuras da casa também são problemáticas, afinal, as paredes são autoportantes e seria necessário investir novamente em frete para trazer o equipamento ao sítio.

Outro exemplo que utiliza impressoras 3D com materiais à base vegetal é o abrigo vencedor do programa *Centennial Challenges*⁴⁶, com chancela da NASA, que, em 2015, iniciou o concurso *3D-Printed Habitat Competition* (3DPH) para selecionar um abrigo como parte da missão ‘da Lua, para Marte’ (NASA, 2021). A competição teve início em 2014, cujo produto foi a produção de um abrigo a ser utilizado em Marte, fabricado com impressoras 3D. Essas impressoras deveriam utilizar como insumos materiais de fontes indígenas, porém, deveria ser prototipado em escala reduzida.

Todavia, não havia até então tecnologia de adição automatizada para a construção de casas (impressão 3D de casas). Portanto, houve a necessidade de angariar recursos e patrocinadores que pudessem colaborar com o desenvolvimento dessa tecnologia (ROMAN et al., 2020, p. 2). O concurso 3DPH contou com três etapas, as quais foram concluídas entre os anos de 2015 a 2019.

A última etapa contou com duas fases, sendo a última vencida pelo time *AI Space Factory*, cujo projeto foi nomeado de ‘MARSHA’ (figura 3.39). O desafio dessa última fase foi construir um protótipo do abrigo em escala 1:3, que estaria sujeito a três testes: de estanqueidade das vedações (atestado com fumaça inserida no interior do abrigo), de impacto (prevendo a colisão de meteoritos, testada com pesos sendo lançados de diferentes pontos contra o protótipo) e de resistência a compressão (exercido pela força de uma pá mecânica de uma retroescavadeira) (MUELLER et al., 2019).

Durante a segunda fase da competição, os concorrentes deveriam apresentar materiais inovadores que utilizassem sedimentos do solo de Marte. No entanto, na fase 3 (figura 3.40), não houve essa exigência, sendo que o segundo colocado utilizou um material a base de concreto.

O time vencedor da fase 2 da etapa 3 (MARSHA) utilizou bolas à base de ‘material plástico de ácido polilático (PLA) infundido com fibras de basalto’ (MUELLER et al., 2019, p. 8, tradução nossa)⁴⁷. Este material poderia ser facilmente transportado em matéria sólida e depositado na impressora 3D, que o transforma, através do calor, em um aglutinante pastoso,

⁴⁶ Em 2013 o governo dos Estados Unidos permitiu que a NASA desenvolvesse concursos para incentivar a resolução de complexidades de operações no espaço, mas que também tivessem repercussões de uso na Terra, sob o nome de *Centennial Challenges*. Desde então foram organizados mais de 19 concursos, com premiações concedidas em mais de 10 milhões de dólares (ROMAN, 2020).

⁴⁷ Termo original em inglês: ‘*Polylactic Acid (PLA) plastic material infused with basalt fibers*’.

ideal para a impressão 3D. Dentre os dois finalistas, o projeto ‘MARSHA’ surpreendeu com a resistência final que resistiu aos testes de impacto e compressão.

Figura 3.39 – Perspectiva 3D do projeto *AI Space Factory*



Fonte: Website da NASA (NASA, 2023)

Figura 3.40 – Fotografia do protótipo fabricado por impressora 3D durante a terceira etapa da 3DPH



Fonte: Artigo científico (MUELLER et al., 2019, p. 8)

O resultado da competição foi o desenvolvimento de tecnologias para a habitação (seja em Marte ou na Terra) com o uso da impressão 3D de casas, além da exploração de materiais inovadores. As tecnologias adotadas para executar os projetos finalistas foram baseadas em braços robóticos, assim como em equipamentos que fixam um módulo extrusor em uma base que percorre três eixos cartesianos (“x”, “y” e “z”), esse último similar ao mecanismo utilizado por impressoras 3D das mais variadas formas e tamanhos⁴⁸.

⁴⁸ Termo original em inglês: ‘gantry-style systems’ (MUELLER et al., 2019, p. 10)

Quanto aos materiais, houve um avanço no conhecimento de diversas possibilidades de uso de materiais nessas impressoras, sendo que esses materiais deveriam ser depositados pelo sistema extrusor com facilidade, além de permitir um tempo de cura que pudesse suportar as camadas seguintes da extrusão e garantir resistência suficiente para suportar adversidades de um ambiente inóspito, como é o espaço.

Segundo os autores Mueller et al. (2019, p. 10), a competição 3DPH não apenas deixou um legado tecnológico para a concretização de infraestruturas em operações na superfície de planetas, mas também para a indústria da construção. Os resultados obtidos com a resistência mecânica dos materiais empregados no projeto 'MARSHA' e a tecnologia desenvolvida remaneceram para desenvolver habitações personalizadas na Terra. O projeto 'Tera' (figura 3.41) é o resultado dessas tecnologias desenvolvidas durante a competição da NASA.

Os autores desenvolveram a cabana 'Tera' como exemplo de uma casa feita com a tecnologia de impressão 3D da competição 3DPH, que será alugada para finais de semana com o objetivo de promover os projetos 'Tera' e 'MARSHA' (AI SPACE FACTORY, 2023). É importante salientar que o projeto "Tera" apresenta planta baixa, ambientes e aberturas diferentes do projeto 'MARSHA', demonstrando a possibilidade do 'Tera' se customizar em massa. Inclusive, o interior da 'Tera' (figura 3.42) demonstra a possibilidade formal do *layout*, que é adaptado para as necessidades de um abrigo a ser utilizado em finais de semana. A escada mescla com o mobiliário da cozinha, assim como com o do quarto situado no andar superior.

Figura 3.41 – Perspectiva 3D do projeto 'Tera'



Fonte: Artigo científico (AI SPACE FACTORY, 2023)

Figura 3.42 – Perspectiva 3D do interior do projeto 'Tera'



Fonte: Artigo científico (AI SPACE FACTORY, 2023)

3.1.2.1.4 Extrusão de Plástico como Matéria-prima com o Uso de Impressoras 3D

As impressoras 3D utilizadas para a prototipagem também têm sido utilizadas para a impressão de casas (GIBSON, ASHBY, 1997). A '*3D-Printed Micro Home*' (figuras 3.43/3.44/3.45), Amsterdã, Holanda, 2015, é um exemplo disso. Trata-se de uma cabana de final de semana com oito metros quadrados (DUS ARCHITECTS, 2021), cujo conceito de projeto parte do princípio da fabricação de componentes arquitetônicos em impressoras 3D caseiras para a fabricação de casas.

As impressoras 3D que utilizam o plástico como material normalmente são utilizadas para a prototipagem rápida, vendidas em lojas de departamento. Esta casa foi dividida em diversos blocos que serviram como componentes construtivos, sendo do tamanho máximo que uma impressora 3D permite imprimir.

Dentre os pontos positivos do uso de impressoras 3D encontradas no varejo: a facilidade de transporte dos componentes construtivos facilita na montagem, abre-se precedente para pessoas com equipamentos de impressão 3D caseiros poderem imprimir suas próprias casas, o material utilizado é plástico biodegradável, e, o plástico já é um material estanque (não requer muito cuidado com impermeabilizações ou gastos adicionais com telhas

e estruturas para telhados). Já dentre os pontos negativos, ressalta-se que pouco se sabe a respeito da resistência e da durabilidade do material.

Figura 3.43 – Fotografia externa da '3D-Printed Micro Home'



Fonte: Website da Dezeen (FREARSON, 2016)

Figura 3.44 – Fotografia - fachada frontal



Fonte: Website da Dezeen (FREARSON, 2016)

Figura 3.45 – Fotografia - Detalhe da fachada



Fonte: Website da Dezeen (FREARSON, 2016)

3.1.2. Adição de Componentes Construtivos com o Uso da Robótica

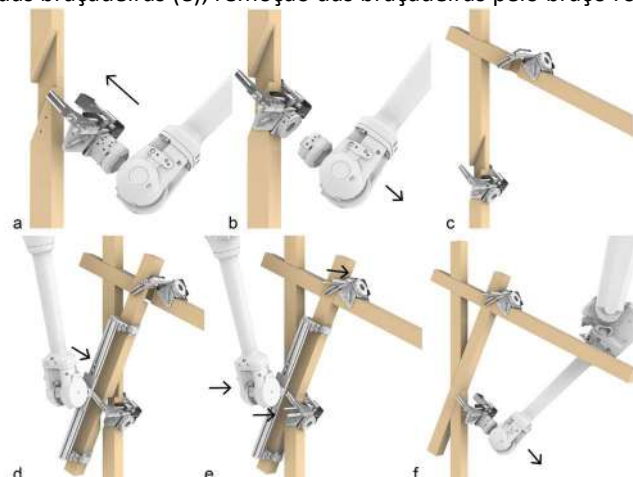
A robótica também tem sido utilizada em estudos que pretendem potencializar a precisão e a qualidade da construção com componentes construtivos que são facilmente encontrados no varejo da construção civil (APOLINARSKA et al., 2021; CHAI et al., 2022; PIRES; CENCI; NETO, 2021). É o caso de tijolos e vigas das mais variadas dimensões e materiais.

Com o uso de braços robóticos para manipular e assentar esses componentes construtivos na obra, foi possível customizar projetos arquitetônicos edificando formas das mais diversas com muita precisão. É o caso de Leung et al. (2021), que estudou a adição de vigotas de madeira, e a pesquisa de Pires, Cenci e Neto (2021), que utilizou o tijolo de barro com furos como componente construtivo. Esses não são exemplos de habitações, mas são exemplos utilizados para demonstrar a aplicabilidade de técnicas de adição de elementos construtivos com o uso da robótica, que poderiam ser utilizados para produzir casas.

A pesquisa da Universidade *ETH Zurich* é um exemplo da adição de vigotas de madeira com o uso de braços robóticos. Neste caso, Leung et al. (2021) utilizaram um braço robótico que trocava o fator final de sua terminação, ora por braçadeiras, utilizadas para pressionar o encaixe das vigotas na posição desejada, ora por garras de fixação, que foram utilizadas para adicionar vigotas durante o processo construtivo (figura 3.46). Apenas um braço robótico foi utilizado, mas ele trocava automaticamente a sua terminação por braçadeiras ou por garras conforme regras pré-definidas na sequência de suas ações (figura 3.47), as quais foram programadas especificamente para este projeto em um software.

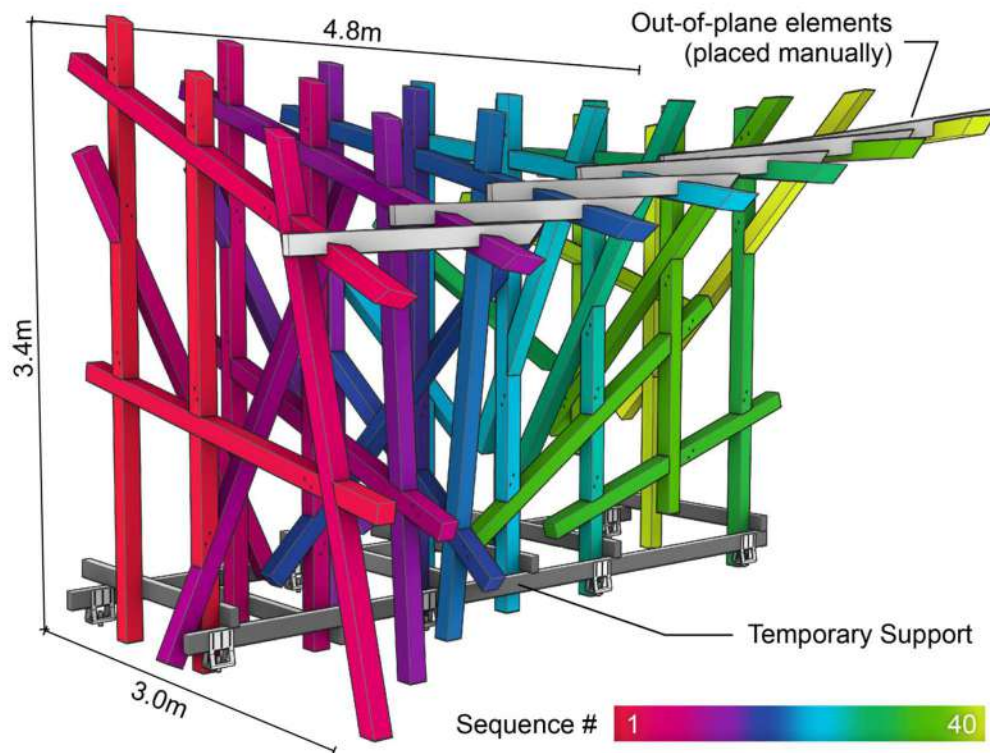
As braçadeiras nesse estudo também são robóticas (figura 3.48) e se acoplam à uma vigota na espera por uma outra. Duas braçadeiras eram requeridas, sendo um motor em cada braçadeira responsável para dar pressão ao encaixe durante a montagem, o que pode ser observado na figura 3.46. Outros autores também desenvolveram estudos similares, como de Thoma et al. (2018) e Apolinarska et al. (2016).

Figura 3.46 – Perspectivas 3D: Detalhes de encaixes de vigotas de madeira adicionadas por braço robótico: Adição da braçadeira à vigota (a); remoção da braçadeira do braço robótico (b); duas braçadeiras a espera de uma vigota (c); garra acoplada ao braço robótico adicionando uma vigota (d); pressão simultânea exercida pelas duas braçadeiras (e); remoção das braçadeiras pelo braço robótico (f)



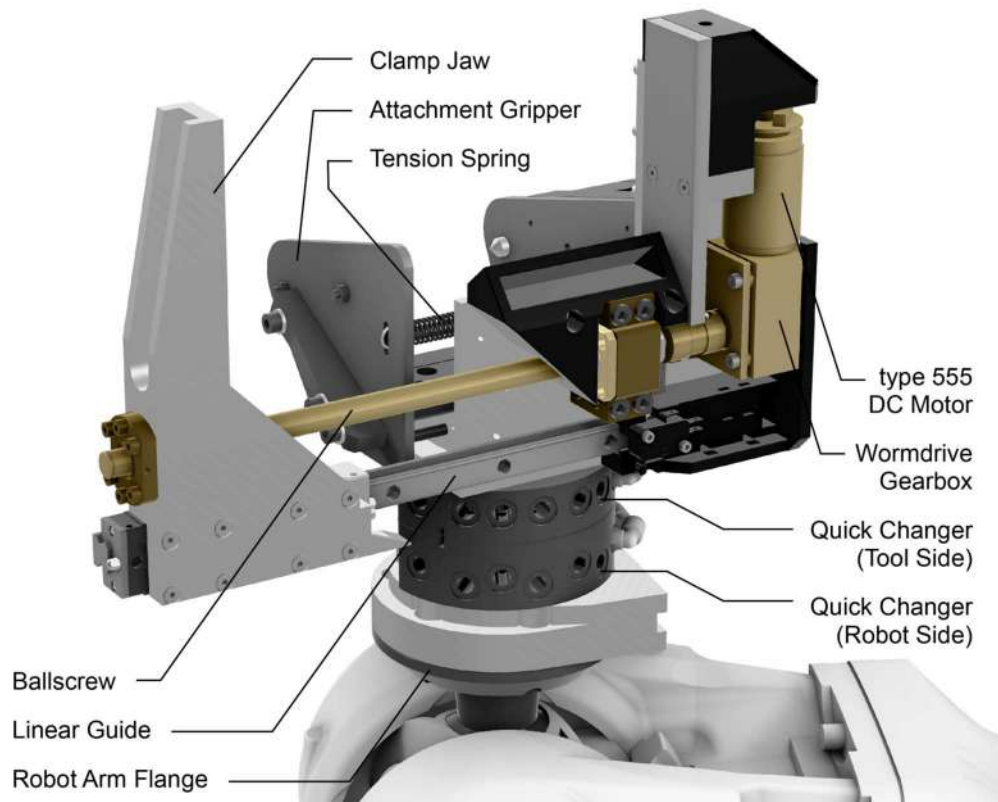
Fonte: Artigo científico (LEUNG et al., 2021, p. 4)

Figura 3.47 – Ilustração gráfica da sequência de ações desempenhadas por um braço robótico para a adição de 40 vigotas de madeira



Fonte: Artigo científico (LEUNG et al., 2021, p. 8)

Figura 3.48 – Perspectiva 3D de braçadeira robotizada utilizada para pressionar as vigotas



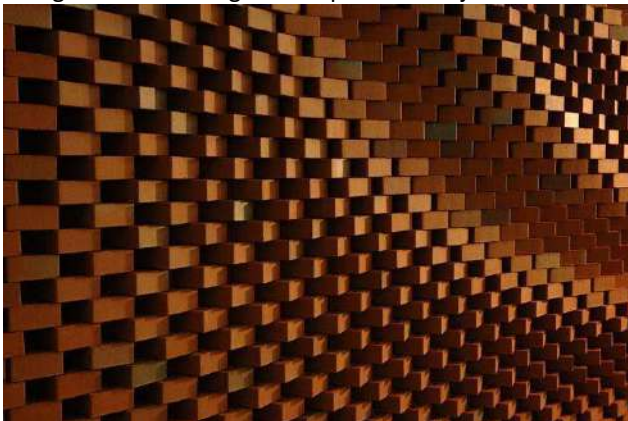
Fonte: Artigo científico (LEUNG et al., 2021, p. 3)

Os tijolos também têm sido objeto de estudo por pesquisadores da área da construção civil que os utilizaram para assentar paredes por intermédio da robótica (GRAMAZIO; KOHLER, 2023; PIRES; CENCI; NETO; 2021). Os pesquisadores Gramazio e Kohler (2006) são pioneiros dessas pesquisas, onde esses lecionaram em disciplinas eletivas para a faculdade de arquitetura de Zurique em 2006 (figuras 3.49/3.50). O objetivo dessas pesquisas, entre outros, foi explorar diversos modos como as paredes podem ser edificadas por robôs, de modo a ter mais precisão na execução e menos desperdícios.

A exploração de customização de paredes é um grande atributo deste método construtivo. Pires, Cenci e Neto (2021) desenvolveram um estudo similar no Brasil com o objetivo de assentar tijolos cerâmicos com furos com a colaboração de um robô (figura 3.51). Devido às limitações econômicas da pesquisa, a escala da análise foi reduzida a qual foram utilizados tijolos menores do que o convencional e um braço robótico caseiro para testar a programação do assentamento de tijolos por intermédio da robótica.

Apesar das dificuldades e da falta de investimentos para pesquisas desse tipo, cuja ausência é frequente no Brasil, o estudo demonstrou que a programação paramétrica para executar paredes com a robótica é possível (PIRES; CENCI; NETO; 2021, p. 191).

Figura 3.49 – Fotografia de parede de tijolos de barro



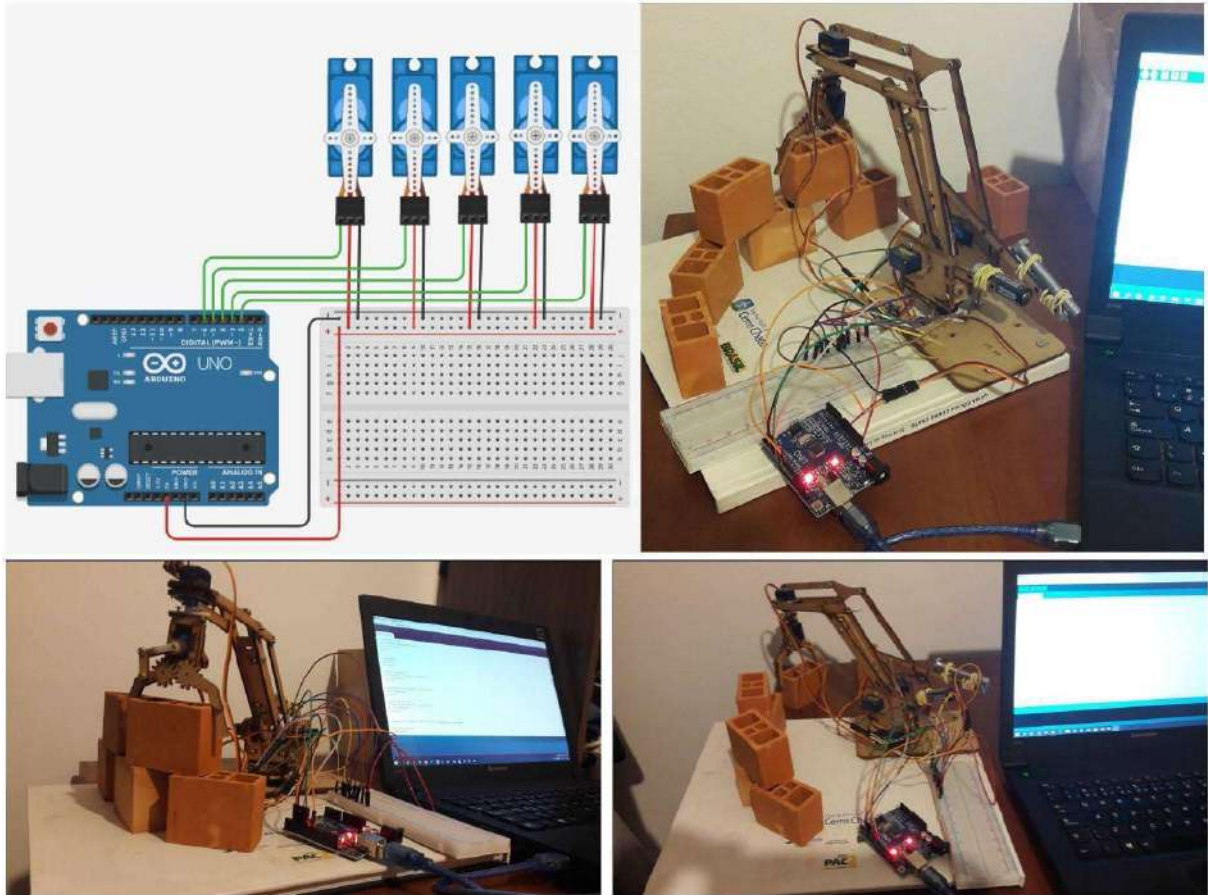
Fonte: Website (GRAMAZIO; KOHLER, 2006)

Figura 3.50 – Fotografia de braço robótico e parede



Fonte: Website (GRAMAZIO; KOHLER, 2006)

Figura 3.51 – Fotografias de um robô caseiro feito a partir de 5 mini servo motores SG90 Tower Pro, *jumpers*, cabos, um microcontrolador Arduino UNO, uma placa de ensaio para realizar as ligações e um computador



Fonte: Artigo científico (PIRES; CENCI; NETO, 2021, p. 190)

3.1.3 Formativa

A produção formativa é uso de uma força mecânica para a deformação ou reformulação de um material a partir de uma geometria original, de modo que esse material assuma outra forma diferente da inicial.

Segundo Kolarevic (2001, p. 273), na fabricação formativa:

forças mecânicas, restrição de formas, calor ou vapor quando aplicados em um material de modo que esse possa adquirir uma forma desejada, por meio da reformulação ou da deformação, sendo que essa pode ser restringida axialmente ou na superfície⁴⁹ (KOLAREVIC, 2001, p. 273, tradução nossa).

Existem equipamentos formativos que são digitalmente controlados por tecnologias NC (*Numerical Control*) ou CNC (*Computer Numerical Control*). Exemplos de equipamentos NC comumente encontrados no comércio de serviços são as máquinas que dobram chapas de aço

⁴⁹ "In formative fabrication mechanical forces, restricting forms, heat, or steam are applied on a material so as to form it into the desired shape through reshaping or deformation, which can be axially or surface constrained."

utilizadas para a confecção de perfis diversos. A tecnologia NC nesse caso permite pré-programar o ângulo de dobra desejado para a chapa de aço ser conformada. Essa tecnologia CNC permite maior precisão a partir de um modelo digital. É o caso das fôrmas adaptativas da *Adapa Moulds* (figura 3.52).

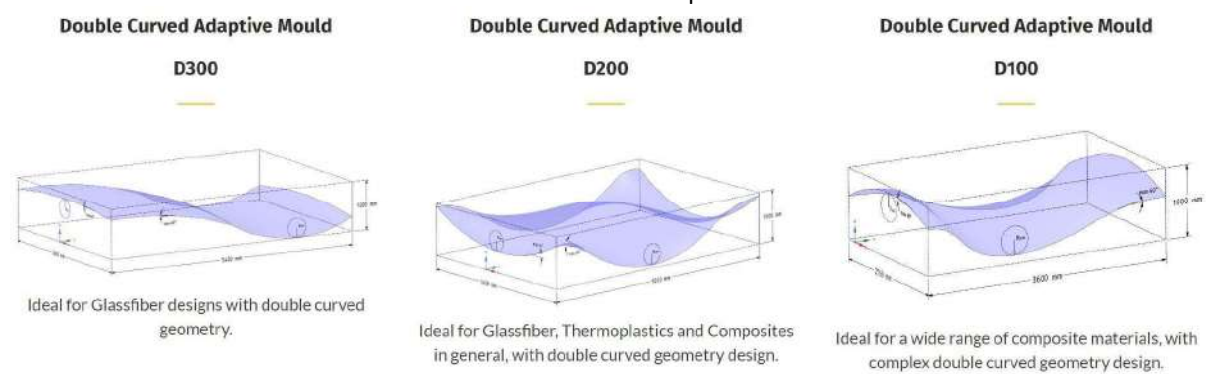
Figura 3.52 – Fotografia de equipamento da *Adapa Moulds* para a conformação de materiais a base de pistões



Fonte: Website da *Adapa Moulds* (ADAPA MOULDS, 2023)

Essas fôrmas copiam a curvatura de superfícies curvas (figura 3.53) de um modelo tridimensional, que é copiado mecanicamente em uma mesa de trabalho com inúmeros pistões cujas alturas variam conforme a necessidade do projeto. Uma chapa metálica é disposta acima dos pistões, a qual recebe o material com que se deseja trabalhar. Os materiais comportados são materiais diversos, como é o caso de fibra de vidro, termoplásticos e concreto (figura 3.54). Uma grande vantagem do sistema de molde adaptativo é a sustentabilidade do processo que dispensa a necessidade de se descartar fôrmas.

Figura 3.53 – Representação gráfica da linha de equipamentos de moldes adaptativos da *Adapa Moulds* para conformar materiais com dupla curvatura



Fonte: Website da *Adapa Moulds* (ADAPA MOULDS, 2023)

Figura 3.54 – Fotografia de abrigo em concreto moldado pela *Adapa Moulds*



Fonte: Website da *Adapa Moulds* (ADAPA MOULDS, 2023)

3.1.3.1 Formativa - Conformação a Partir de Fôrmas

Não é uma regra para a fabricação formativa, o material é transformado de um estado original para um outro por intermédio de uma força mecânica. Este método não é o mais utilizado, portanto, foi selecionado um pavilhão para ilustrar a possibilidade formal da técnica em questão.

'*The Bubble*' (figura 3.55), nome em inglês do pavilhão de exposição da BMW exibido no *International Auto Show* (IAA) de 1999 em Frankfurt, Alemanha, e na Expo 2000, edição de 2000, realizada em Munique, na Alemanha. O Projeto de autoria de Bernhard Franken (KOLAREVIC, 2001, p. 273), cujo conceito lúdico do pavilhão foi a junção de duas bolhas d'água. A relevância deste projeto para a fabricação formativa é ressaltada por autores como Kolarevic (2001), Henriques e Esteves (2005) e Dunn (2012).

Figura 3.55 – Fotografia do pavilhão da BMW, '*The Bubble*'



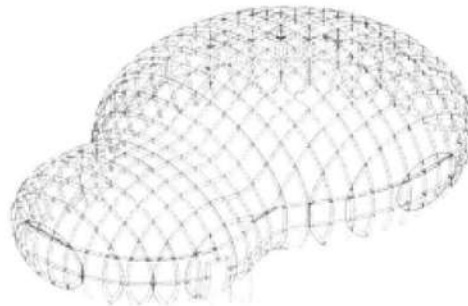
Fonte: (DUNN, 2012, p. 154)

A estrutura do '*The Bubble*' (figura 3.56) foi desenvolvida em um *software*, sendo as soluções técnico-construtivas adotadas a de seccionamento; técnica utilizada para desenvolver a estrutura metálica e de criação de fôrmas – solução adotada para resolver a questão da curvatura dos vidros -.

A vedação dessas bolhas metálicas ocorre por meio de diversos vidros curvos, cuja área de cada peça é de aproximadamente 1,00m² a 1,20m² (HENRIQUES; ESTEVES, 2005). Inicialmente, para realizar a deformação dos vidros das fachadas, foi necessário a criação de fôrmas em blocos de EPS recortados por fresadora CNC (figura 3.57). Posteriormente, os vidros foram aquecidos sobre essas fôrmas de isopor (EPS), de modo que copiassem a geometria destas fôrmas até atingirem a forma curva durante o processo de resfriamento do material (figura 3.58).

Vale ressaltar que dentre essas duas técnicas construtivas oriundas da fabricação digital, apenas a última, a etapa de deformação dos vidros, é considerada como fabricação formativa, enquanto a primeira é um procedimento de fabricação subtrativa.

Figura 3.56 – Perspectiva da estrutura digital em 3D do '*The Bubble*'



Fonte: (KOLAREVIC, 2003, p. 67)

Figura 3.57 – Fotografia do processo de corte do isopor que serviu de molde para a fabricação dos vidros curvos do pavilhão da BMW, '*The Bubble*'



Fonte: (HENRIQUES; ESTEVES, 2005)

Figura 3.58 – Fotografia dos vidros encurvados por calor e a partir de fôrmas recortadas em *router* CNC



Fonte: (DUNN, 2012, p. 153)

Essa técnica é pertinente já que é possível executar formas curvas de alta complexidade. No entanto, é um procedimento que pode demandar equipamentos específicos. O resultado, porém, da união entre a técnica conformativa e a subtrativa é capaz de criar componentes construtivos, como portas formalmente complexas, por exemplo (figura 3.59).

Figura 3.59 – Fotografia da porta de acesso do projeto da BMW, 'The Bubble'



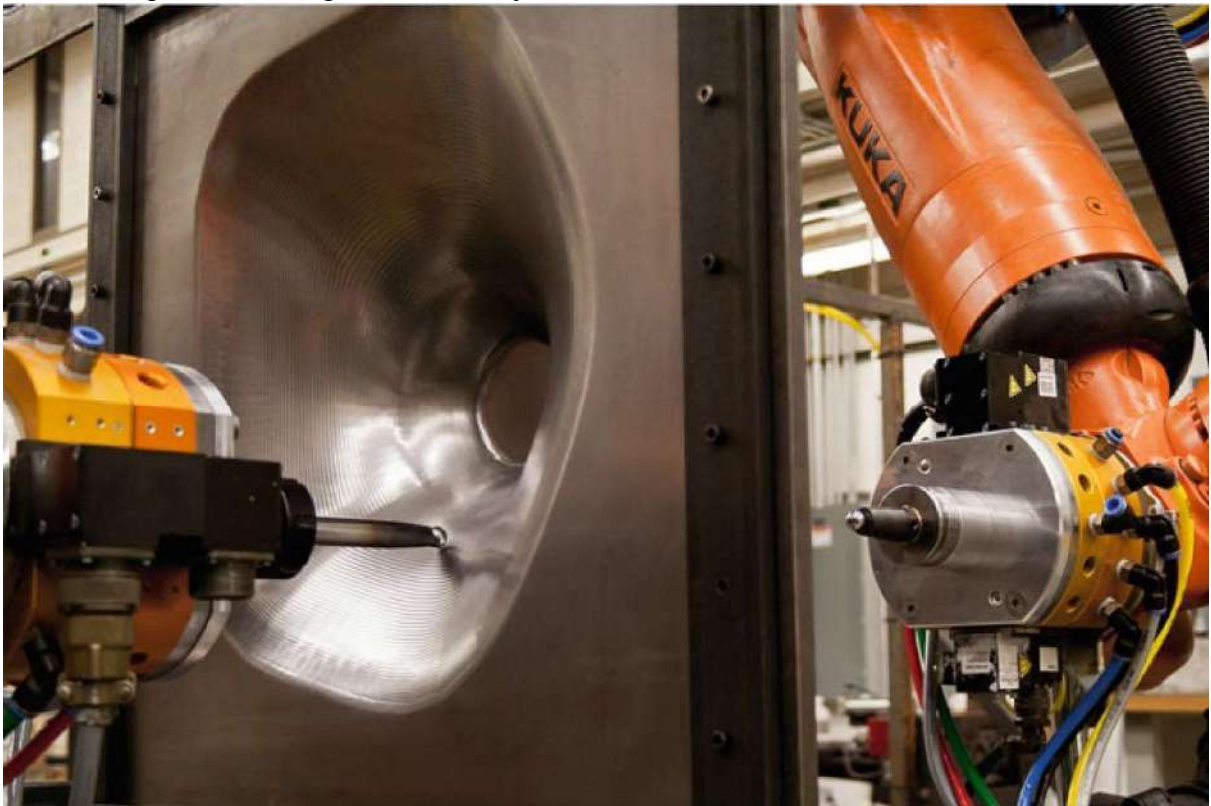
Fonte: (HENRIQUES; ESTEVES, 2005)

3.1.3.2 Formativa - Conformação sem o Uso de Fôrmas

Os braços robóticos também podem ser utilizados para a conformação de materiais a partir de um modelo tridimensional. É o caso do estudo de Kalo e Newsum (2014) em que foi utilizado dois braços robóticos simultaneamente com pinos de aço em seus ‘fatores finais’ (figura 3.60) para formar curvaturas em chapas metálicas. O resultado do estudo foi a fabricação de diversas peças com concavidades sem a necessidade de fôrmas, ou seja, sem desperdiçar outros materiais durante o processo de conformação.

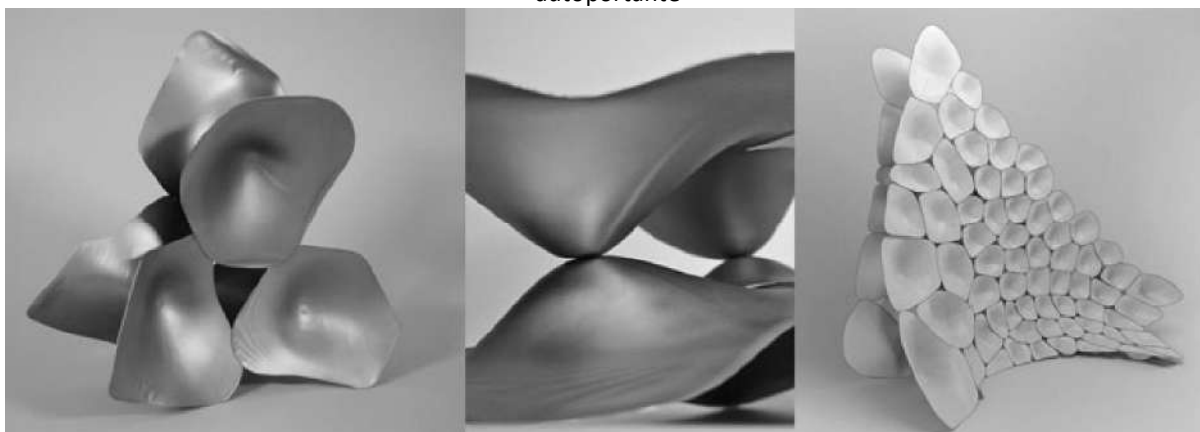
A figura 3.61 demonstra a união dessas peças conformadas, que unidas por soldas formam uma pele porosa autoportante. Após a produção das concavidades nas chapas metálicas, um *laser scanner* observou o desvio de percurso, comparando o percurso percorrido com aquele do projeto tridimensional que foi utilizado como referência (figura 3.62). Os resultados demonstram muita precisão, apesar de haver desvios mínimos nas quinas.

Figura 3.60 – Fotografia de dois braços robóticos conformando metais simultaneamente



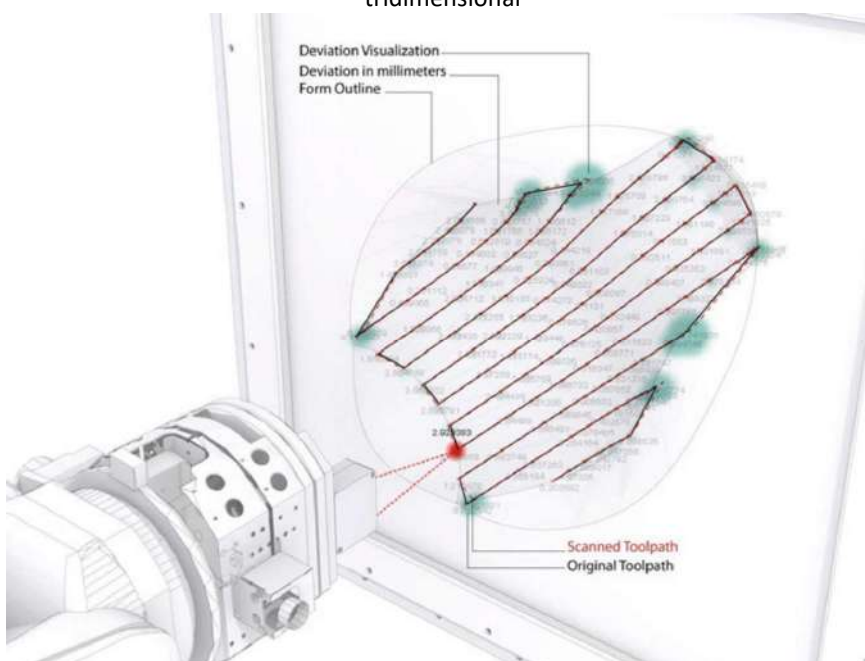
Fonte: Artigo científico (KALO; NEWSUM, 2014, p. 40)

Figura 3.61 – Fotografia de peças de metal conformadas e unidas - juntas formam uma pele porosa autoportante



Fonte: Artigo científico (KALO; NEWSUM, 2014, p. 43)

Figura 3.62 – Perspectiva 3D do scanner a *laser* verificando o trajeto percorrido pelo braço robótico após a formação de chapas metálicas, comparando a desvio desse trajeto com o original a partir do modelo tridimensional



Fonte: Artigo científico (KALO; NEWSUM, 2014, p. 39)

3.2 A Produção Automatizada de Habitação Adotando Combinações de Diferentes Maneiras de Produção Digital

No exemplo do protejo '*The Bubble*' demonstrado anteriormente, foi possível observar a utilização de dois métodos da fabricação digital em um único projeto, sendo esses o subtrativo e o conformativo. Esta seção tem o intuito de apresentar essa possibilidade: diversificar as escolhas por técnicas da fabricação digital que possam ser articuladas de maneira conjunta.

Dois projetos são demonstrados para a referida exemplificação, sendo esses projetos a cabana 'ASHIN Cabin' (HANNAH, 2021) e o pavilhão de Chai et al. (2022). A 'ASHIN Cabin' (figuras 3.63, 3.64 e 3.65), por *Hannah Design Office LLC* (HANNAH, 2021), em *Ithaca*, Estados Unidos, adotou em seu projeto as técnicas subtrativa e aditiva. Subtrativa, por intermédio de cortes em toras de madeira com o uso de braço robótico, realizado para os fechamentos laterais da cabana, e aditiva, com a adição de concreto extrudado por meio de impressoras 3D, para a fabricação das fundações e do piso elevado da respectiva construção.

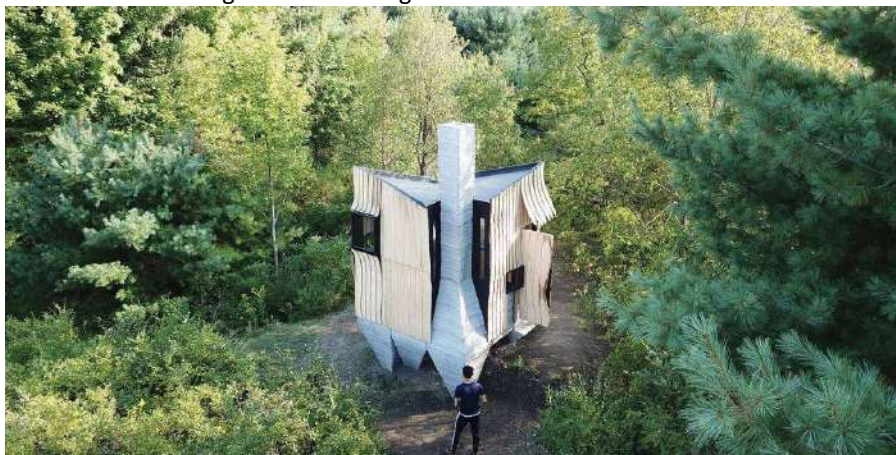
Em contrapartida, o pavilhão de Chai et al. (2022), figuras 3.67 a 3.76, utilizou a abordagem aditiva por meio de um braço robótico acoplado a um sistema móvel para adicionar vigotas de madeira à estrutura do pavilhão, sendo que esse sistema também permitiu a realização de cortes (maneira subtrativa) nessas vigotas antes que fossem adicionadas à estrutura.

Figura 3.63 – Fotografia da fachada lateral da 'Ashin Cabin'



Fonte: Website da *Hannah Design Office LLC* (HANNAH, 2021)

Figura 3.64 – Fotografia aérea da 'Ashin Cabin'



Fonte: Website da *Hannah Design Office LLC* (HANNAH, 2021)

Figura 3.65 – Fotografia interna da 'Ashin Cabin'



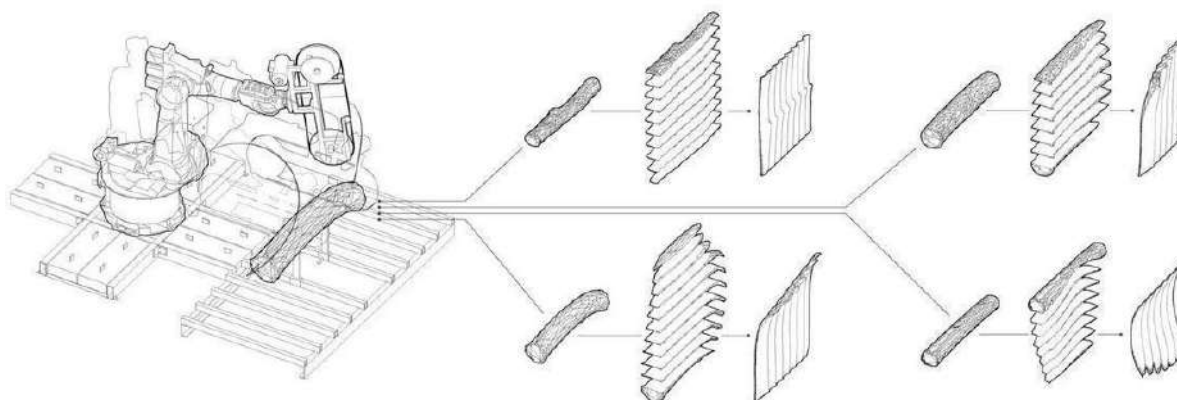
Fonte: Website da Hannah Design Office LLC (HANNAH, 2021)

A 'Ashin Cabin' é uma cabana, cujo partido arquitetônico tem premissas sustentáveis, por se tratar de um projeto situado dentro de uma floresta que forneceu a madeira utilizada no próprio projeto. As madeiras escolhidas foram aquelas contaminadas com um inseto que é comum na região. Este drena a vida da árvore culminando em sua morte e a sua madeira seria utilizada como lenha, causando a emissão de gás carbônico.

Pode-se dizer que essa é uma solução neo-vernacular, no sentido que tecnologias de ponta foram utilizadas para fabricar uma cabana com o material construtivo oriundo do próprio sítio de sua implantação. A logística da construção foi dividida em duas etapas: a primeira, consiste na utilização de impressoras 3D que utilizam o concreto via sistema aditivo para a fabricação da estrutura da casa e a segunda etapa é o fechamento em madeira, sendo trabalhada em duas fases.

Inicialmente, as toras de madeira foram escaneadas tridimensionalmente, partindo do modelo físico para o digital. Posteriormente, com o modelo digital da tora, um *software* foi utilizado para maximizar o uso do material de modo a não ter desperdício. Como a tora da madeira é curva e irregular, um braço robótico (figura 3.66) foi usado para cortar a madeira em formato de tábua, facilitando no corte curvilíneo com precisão, conforme o formato original da tora. Logo, é possível verificar a utilização dos métodos aditivos e subtrativos.

Figura 3.66 – Perspectiva do corte da tora de madeira como processo construtivo da 'Ashin Cabin'



Fonte: Website da Hannah Design Office LLC (HANNAH, 2021)

A utilização de matéria-prima barata proveniente da própria natureza é um ponto forte deste projeto, pois reduz o custo evitando a aquisição de outros materiais. Também há alto grau de sustentabilidade devido a utilização da madeira presente no próprio local, e a sua queima como lenha, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa.

No entanto, um fator dificultador é o acesso aos equipamentos e à tecnologia adotada, afinal, este requer elevado nível de conhecimento técnico dos projetistas mediante as técnicas utilizadas, assim como demanda por três tipos de equipamentos não usuais na construção, fato que eventualmente encarece o projeto caso sejam de difícil acesso para os executores.

O pavilhão de Chai et al. (2022), realizado por pesquisadores advindos de um histórico profissional multidisciplinar das áreas de engenharia, robótica e arquitetura, foi um estudo cuja pretensão foi edificar uma estrutura espacial formada por vigotas em madeira laminada colada (figura 3.67) utilizando a colaboração de um robô.

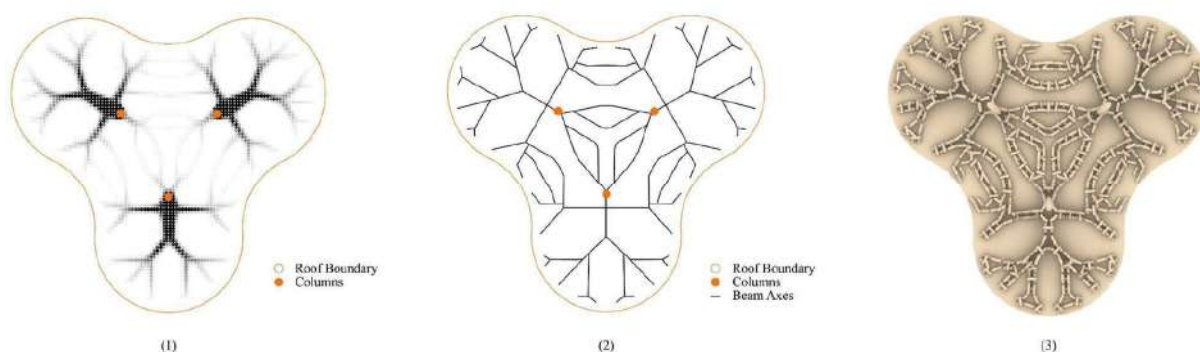
A intenção daquele estudo foi utilizar os componentes construtivos (vigotas) de uma maneira não ortogonal, de modo que fugisse do padrão retilíneo das peças pré-fabricadas disponibilizadas no comércio de construção, por meio da customização auxiliada por um equipamento de robótica. A planta da cobertura (figura 3.68) evidencia esse anseio da fuga de formas retas.

Figura 3.67 – Fotografia externa do pavilhão de Chai et al. (2021) concluído



Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 2)

Figura 3.68 – Imagens da planta da estrutura do telhado: Área de trabalho com pilares (1), eixos dos vigamentos do telhado (2) e estrutura espacial do telhado representada a partir de seus eixos (3)



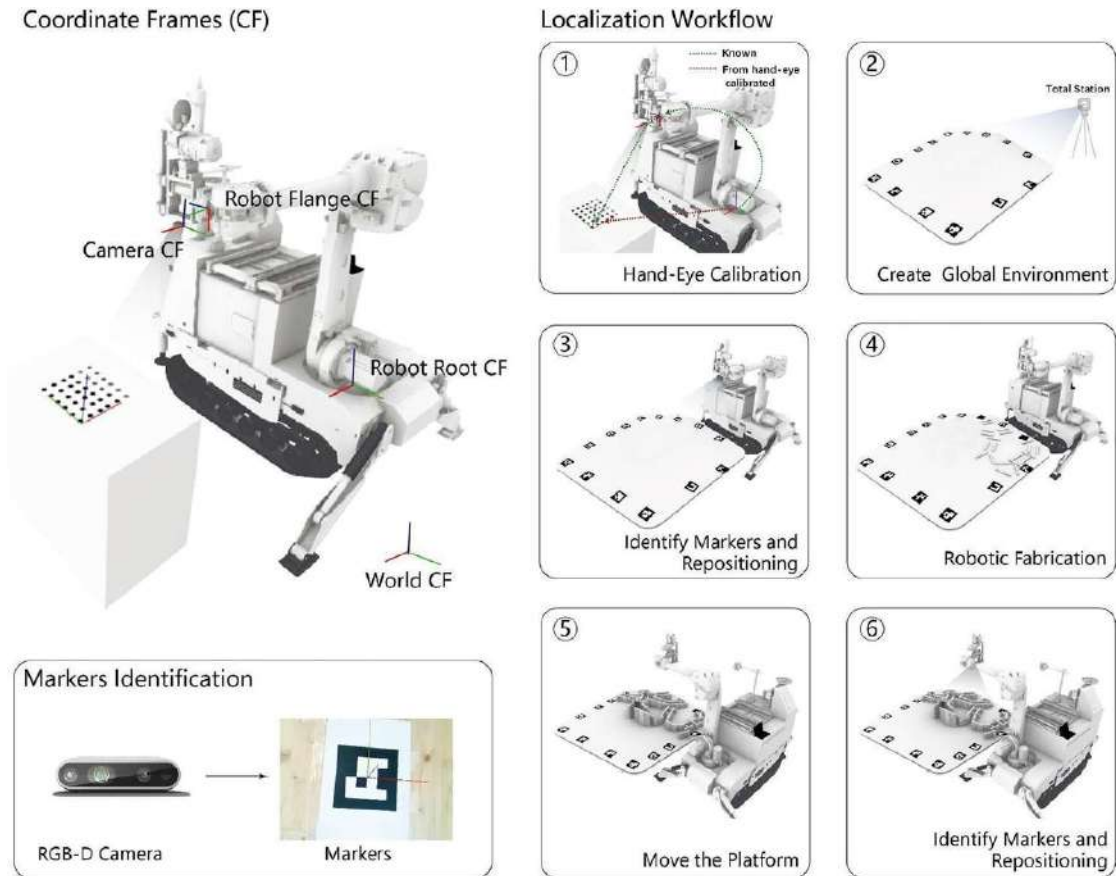
Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 9)

O equipamento utilizado nesse estudo é considerado um equipamento de pequeno porte, formado por um braço robótico de cinco eixos que foi acoplado acima de outro robô, sendo esse último móvel e com câmera. Isso garante mobilidade ao braço mecânico e a câmera permite o equipamento ser geolocalizado por meio de pontos referenciais, onde a equipe usou adesivos codificados para informar ao robô a sua localização (figuras 3.69, 3.70 e 3.75).

O resultado desse conjunto de robôs foi um alcance de aproximadamente três metros (figura 3.71). Além disso, a equipe desenvolveu uma bancada de trabalho sobre o robô móvel, que poderia ser totalmente manipulada pelo braço robotizado, permitindo realizar até quatro operações frequentes em marcenarias: corte, furo, tupia e aplicação de cola (figura 3.72).

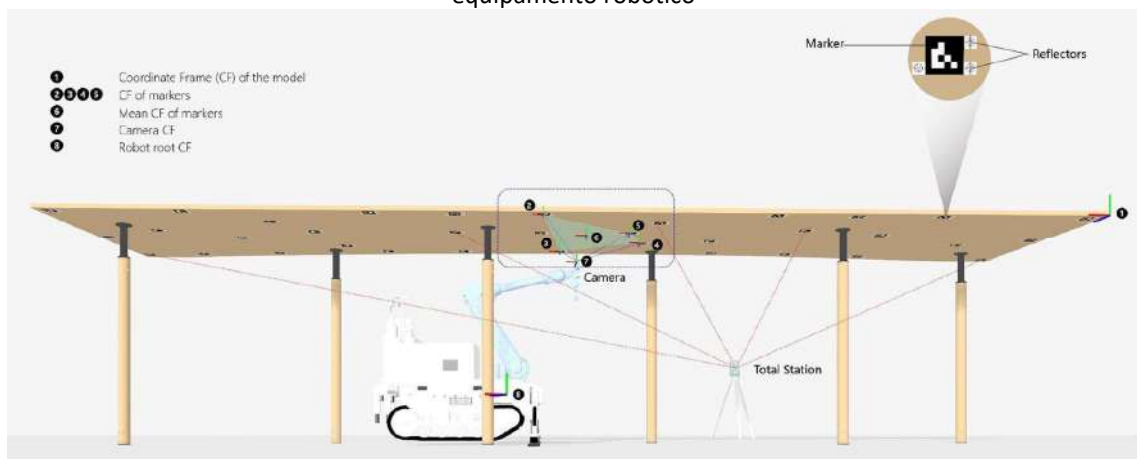
O ‘fator final’ acoplado ao braço robótico (figura 3.73) é composto por um equipamento com três funções: câmera para auxiliar na localização do equipamento e para fixar as peças com precisão, garra para segurar as vigotas e uma pistola de pregos para fixá-las (CHAI et al., 2022).

Figura 3.69 – Ilustrações gráficas dos adesivos codificados para informar ao robô a sua localização



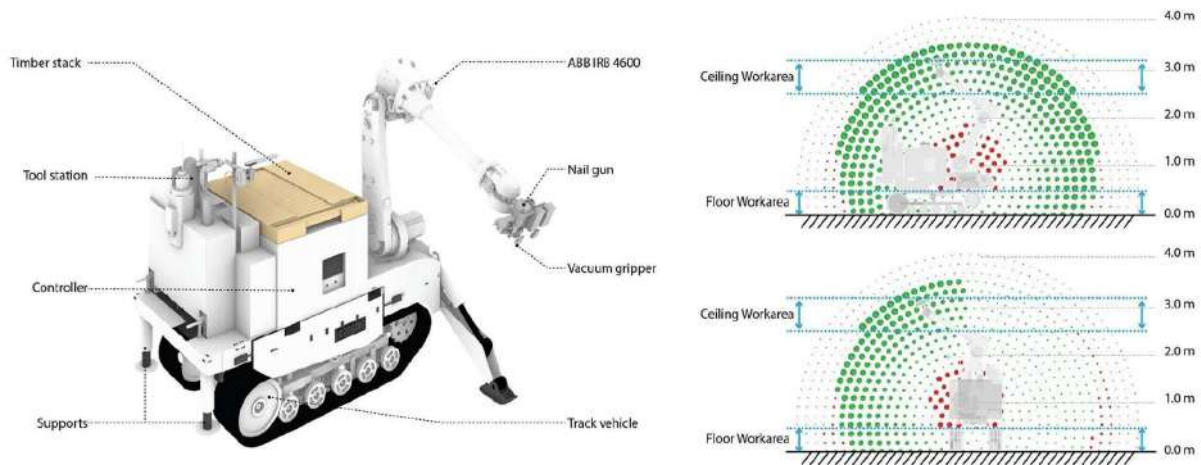
Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 7)

Figura 3.70 – Ilustração gráfica da fachada do pavilhão com marcadores para referenciar o posicionamento do equipamento robótico



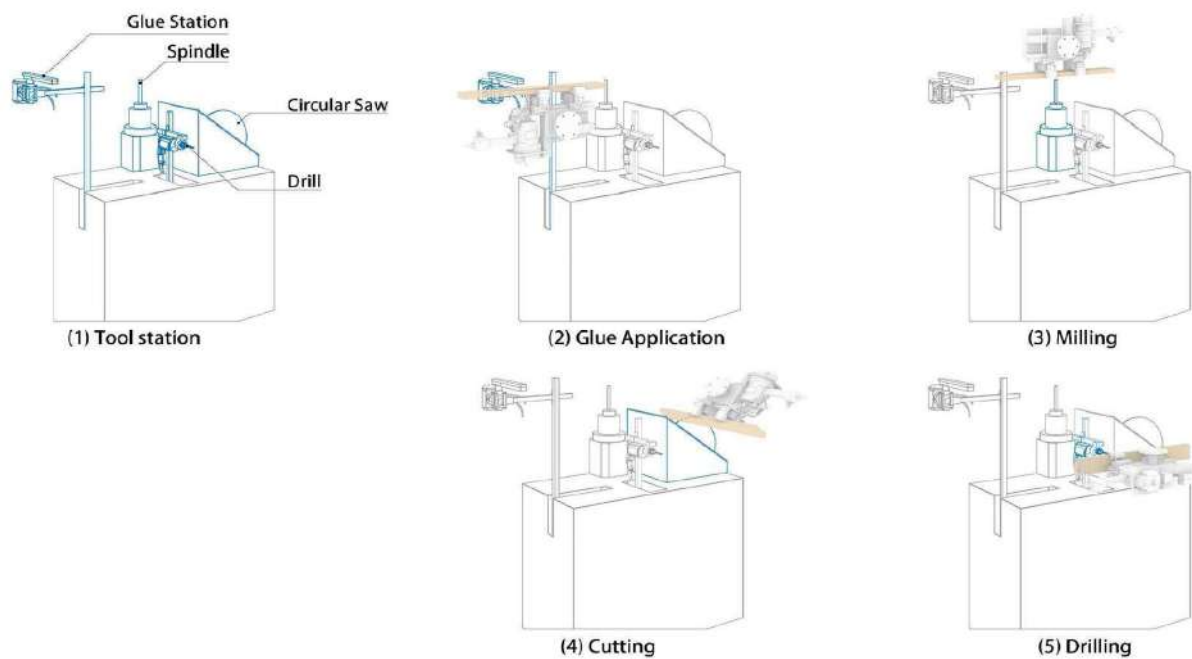
Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 15)

Figura 3.71 – Ilustrações gráficas: do braço robótico, estação de trabalho e veículo de transporte (figura à esquerda) e alcance do braço robótico (figura à direita)



Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 5)

Figura 3.72 – Ilustração gráfica da estação de trabalho multiuso (1): aplicação de cola (2) furo com broca (3), corte com serra circular (4) e serviços de tupia (5)



Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 6)

Figura 3.73 – Fotografia do equipamento com ampliação à esquerda do ‘fator final’ do braço robótico, composto por câmera (*camera*), garra (*gripper*) e pistola de pregos (*nail gun*)



Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 5)

Duas pessoas acompanharam as operações: uma responsável por controlar o equipamento e outra para auxiliar (figura 3.74). A adição de vigotas foi realizada de baixo para cima, sempre tendo a sua localização referenciada por meio dos pontos fixados na cobertura (figura 3.75). Com a estrutura finalizada, utilizou-se um *scanner* 3D para coletar os dados *in loco* do posicionamento final dos componentes construtivos, para serem comparados com o modelo 3D virtual (figura 3.76).

A equipe chegou à conclusão de que a precisão de todo o sistema poderia ser mais bem estudada para um próximo estudo de caso. O equipamento foi posicionado recorrentemente em quatro áreas de trabalho previamente definidas. Entretanto, essas realocações prejudicaram o tempo e a precisão do conjunto estrutural.

O intercâmbio entre as plataformas foi um fator relevante, sendo que as operações da robótica e o modelo tridimensional foram realizados no *software Grasshopper*, enquanto os algoritmos de georreferenciação estavam no *software PyCharm*, o que prejudicou a comunicação dos arquivos entre as plataformas. Outro fator positivo foi o tempo de realocação do equipamento nesses quatro pontos, que durava entre vinte e cinco a trinta e cinco minutos cada. No entanto, constatou-se que a imprecisão final foi de aproximadamente três milímetros (CHAI et al., 2022, p. 18).

Figura 3.74 – Fotografia do equipamento em fase de execução da estrutura da cobertura



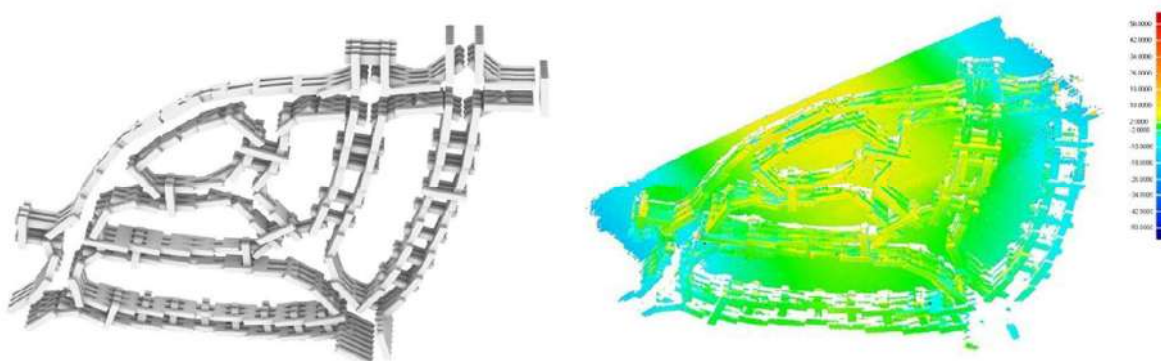
Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 16)

Figura 3.75 – Fotografias do equipamento durante a execução da estrutura: vista inferior da cobertura com os pontos de referência (à esquerda) e o braço robótico instalando as vigotas (à direita)



Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 16)

Figura 3.76 – Ilustrações gráficas da estrutura espacial à esquerda e o resultado da simulação de um scanner 3D que verificou a precisão da localização *as built* da respectiva estrutura (a cor azul representa maior grau de precisão)



Fonte: Artigo científico (CHAI et al., 2022, p. 16)

3.3 A Produção de Habitação Por Meio da Fabricação Digital no Brasil

O cenário da produção de casas que utilizam as tecnologias CAD/CAM ou a robótica no Brasil não é dos mais difundidos. Não há, até o momento, casos de habitações que tenham sido executadas com a robótica. Quanto ao CAD/CAM, podem ser citados alguns casos, sendo em sua maioria experimentos, ou seja, protótipos.

Alguns dos protótipos tiveram os seus projetos executados na íntegra e outros parcialmente (representado por apenas uma seção da residência ou pavilhão temporário), são eles respectivamente: a ‘Casa G’ (2010), a técnica construtiva para habitação de Brasil e Franco (2019), a ‘Casa Revista’ (PASSARO; ROHDE, 2016), proposta desenvolvida por Mendonça, Passaro e Henriques (2018), assim como o estudo de uma casa projetada com a técnica construtiva da *Wikihouse* para o programa Minha Casa, Minha Vida, realizado pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (Mackenzie) (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016).

No entanto, destes protótipos, a ‘Casa Revista’ (PASSARO; ROHDE, 2016) é a única que apresenta as características de uma casa totalmente funcional. É importante ressaltar que todos os casos mencionados anteriormente - exceto pela ‘Casa G’ e pela pesquisa de Brasil e Franco (2019) -, tanto as pesquisas quanto as casas fabricadas em escala real, são *Wikihouses*⁵⁰.

As *Wikihouses* são um sistema construtivo de código aberto que utiliza madeira como matéria-prima, cortada com fresadoras CNC (*Computer Numerical Control*) por meio do método subtrativo. Os detalhes de encaixes são padronizados, tendo por base o tamanho padrão da chapa de OSB (*Oriented Strand Board*), disponível no varejo.

Uma observação a ser feita é que apesar deste método construtivo ter se difundido por todo o mundo desde a sua criação, inclusive no Brasil, há outras possibilidades que poderiam ser pesquisadas de modo a explorar a fabricação digital para a fabricação de casas, como os apresentados anteriormente. No entanto, há um exemplo de uma habitação desenvolvida no Brasil detentora de um método construtivo singular, a ‘Casa G’ (2010), de autoria do departamento de arquitetura e urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

⁵⁰ As *Wikihouses* foram iniciadas em 2011 por Alastair Parvin e Nick Lerodiamonou, sendo um sistema construtivo *open source* baseado em uma licença *creative-commons* (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016). Um manual sobre o sistema é disponibilizado no site da *Wikihouse* (WIKIHOUSE, 2022) para incentivar e difundir o uso deste método construtivo.

O projeto desenvolvido pela UFRGS, a 'Casa G' (2010) - figuras 3.77 e 3.78, é um projeto do ano de 2010 cuja solução técnica assemelha-se ao da *Wikihouse*, porém, é precursor. O sistema construtivo idealizado parte do princípio de utilizar chapas de madeira (ou derivados de madeira) para a construção de casas, por meio de encaixes que dispensam conexões metálicas, realizados a partir da furação das chapas com o uso das *routers* CNC (figura 3.81), o que permite agilidade e precisão no processo construtivo. A figura 3.77 ilustra a maquete prototipada pelos autores com cortadora a *laser*, que muito se assemelha ao protótipo da casa fabricada em escala 1:1 (figura 3.78).

Figura 3.77 – Fotografia da maquete da 'Casa G'



Fonte: Website da 'Casa G' (CASA G, 2023)

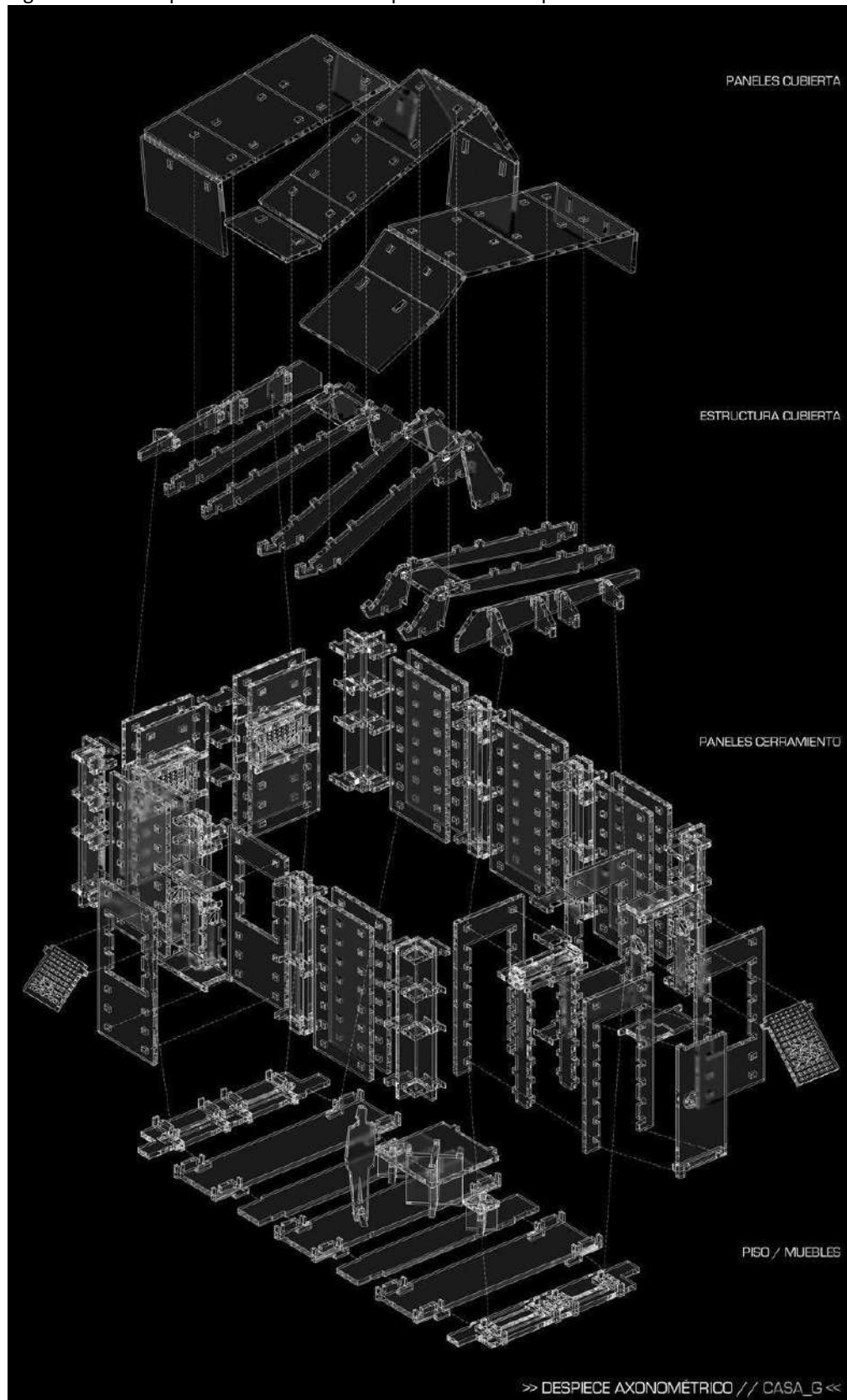
Figura 3.78 – Fotografia do protótipo da 'Casa G'



Fonte: Website da 'Casa G' (CASA G, 2023)

Todas as conexões e os componentes construtivos foram idealizados durante a fase de projeto (figura 3.79), assemelhando-se à montagem de um determinado quebra cabeça, porém, habitável. As paredes são formadas por duas placas de MDF, as quais uma peça disposta ortogonalmente no vazio entre essas placas é a única conexão entre elas. (figura 3.80).

Figura 3.79 – Perspectiva axonométrica explodida dos componentes construtivos da ‘Casa G’



Fonte: Website 'Casa G' (CASA G, 2023)

Figura 3.80 – Fotografia de Detalhe construtivo da ‘Casa G’



Fonte: Website ‘Casa G’ (CASA G, 2023)

Figura 3.81 – Fotografia de CNC router cortando componentes da ‘Casa G’

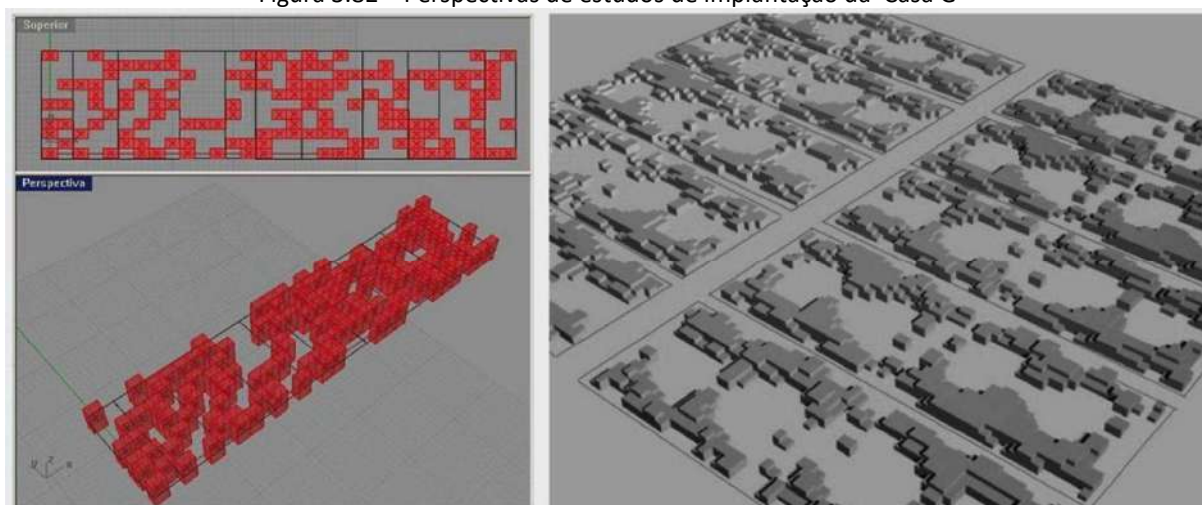


Fonte: Website ‘Casa G’ (CASA G, 2023)

Além de incorporar a produção de seus componentes em equipamentos controlados numericamente (CNC), a ‘Casa G’ foi idealizada em ambiente virtual paramétrico, o que permite variar ambientes internos e suas fachadas de acordo com as necessidades e com os interesses dos moradores.

O telhado, por exemplo, poderia ser customizado para se adaptar ao sítio de implantação, de modo a obter melhores resultados de conforto térmico. O ambiente virtual de projeto adotado foi o *plugin Grasshopper*, que inclusive, foi uma ferramenta que auxiliou na disposição aleatória das casas em um estudo de implantação em um determinado conjunto habitacional de HIS (figura 3.82).

Figura 3.82 – Perspectivas de estudos de implantação da ‘Casa G’



Fonte: Tese de Doutorado (MENDES, 2014, p. 91)

Outra instituição que tem desenvolvido pesquisas que envolvem a produção de habitação por meio de tecnologias digitais é o laboratório PRO URB da Universidade Federal

do Rio de Janeiro. Em 2015, houve a produção do primeiro protótipo de uma *Wikihouse* no Brasil, a 'Casa Revista', executada no campus da UFRJ. A 'Casa Revista' (figura 3.83) foi uma iniciativa de estudantes da UFRJ que produziram uma residência nos moldes da *Wikihouse* para poderem estudar a montagem desse sistema construtivo no campus da própria instituição. O processo de montagem (figura 3.84) procurou compreender a autoconstrução, cuja proposta é o ideal do conceito das *Wikihouses* (WIKIHOUSE, 2022).

Figura 3.83 – Fotografia da 'Casa Revista' edificada no campus da UFRJ em 2015



Fonte: (PASSARO; ROHDE, 2016, p. 25)

Figura 3.84 – Fotografia da montagem da 'Casa Revista' desempenhada por alunos da FAU-UFRJ em 2015



Fonte: (PASSARO; ROHDE, 2016, p. 35)

Os autores Mendonça, Passaro e Henriques (2018, p. 1), mediante a verificação das limitações da plataforma da *Wikihouse* e gerando dificuldades na manipulação e interação com a geração das peças, desenvolveram uma programação no *plugin Grasshopper* do *software Rhinoceros*, de modo a facilitar a produção de componentes que já foram programados de acordo com o sistema construtivo *Wikihouse*.

O objetivo desses pesquisadores foi prover a customização de componentes que permitissem curvaturas, o que até então não era visto nas *Wikihouses*, com base em encaixes já utilizados por esse sistema construtivo (figura 3.85).

Figura 3.85 – Ilustração gráfica da montagem de uma seção da casa

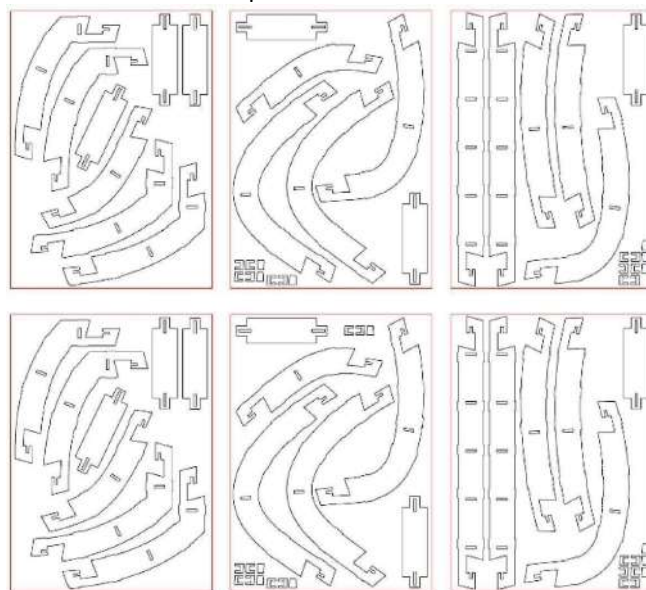


Fonte: (MENDONÇA; PASSARO, 2018, p. 4)

Embora as estruturas sejam curvilíneas, procurou-se a planificação de componentes construtivos que coubesse dentro dos limites de uma chapa inteira de compensado de madeira. Essa planificação é demonstrada pela figura 3.86, que ilustra o limite das chapas com os perfis estruturais desenhados prontos para serem enviados à *router* CNC para serem cortados.

Um protótipo de um pórtico que representa uma seção desta casa pode ser observado na figura 3.87. As chapas mais rígidas, de espessura de 18mm, foram utilizadas como peças estruturais, enquanto as de 6mm corresponderam ao fechamento interior e exterior dos pórticos estruturais da residência.

Figura 3.86 – Ilustração gráfica do esquema de corte de componentes construtivos delimitados pela chapa de compensado de 18mm de espessura a serem cortados em fresadora CNC



Fonte: (MENDONÇA; PASSARO, 2018, p. 4)

Figura 3.87 – Fotografia do protótipo de casa fabricado com estrutura em compensados de 18mm e vedação em compensado de 6mm



Fonte: (MENDONÇA; PASSARO, 2018, p. 4)

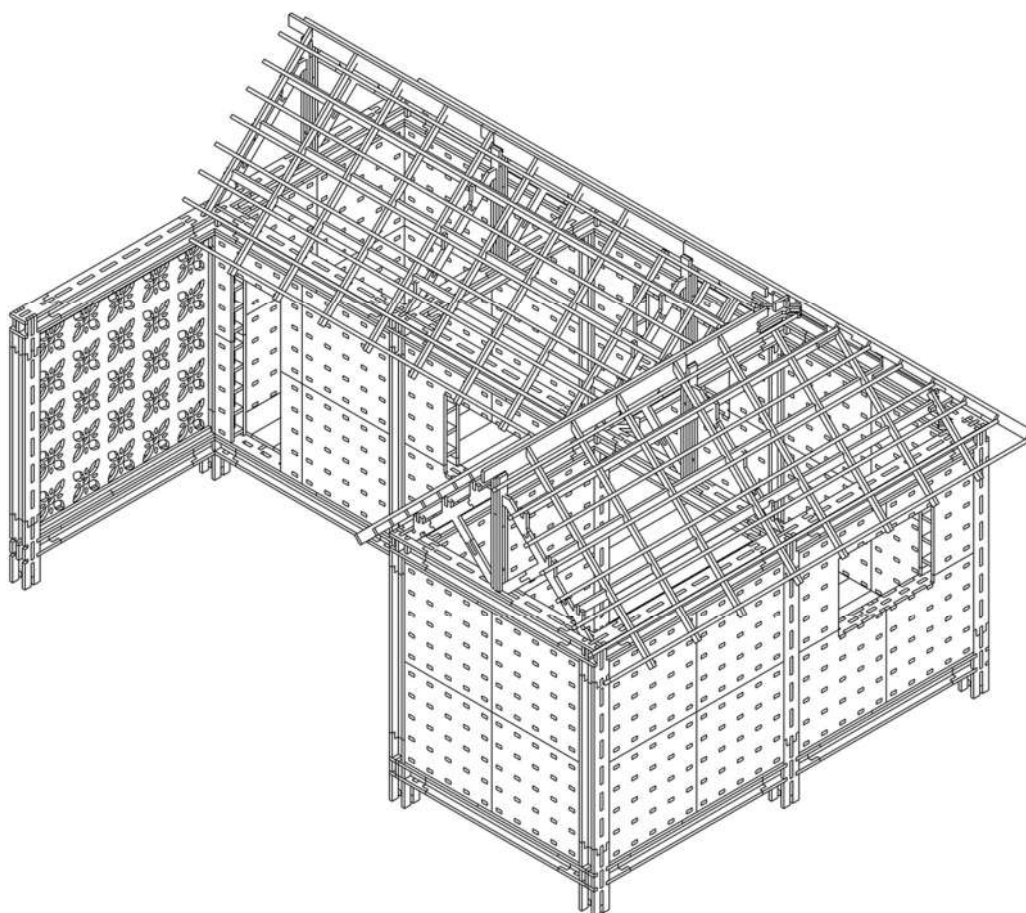
Outro exemplo de pesquisa com habitação do laboratório PROURB da UFRJ é o sistema construtivo parametrizado para habitação, de Brasil e Franco (2019). Esses autores desenvolveram uma programação parametrizada em um ambiente virtual, por meio dos softwares *Rhinoceros* e respectivo plugin *Grasshopper*. Foi idealizado um sistema construtivo controlado por essa programação, que consistia em algumas restrições. Por exemplo, a casa

deveria contemplar materiais e aspectos inerentes da cultura brasileira. Logo, optou-se pelo uso da madeira por ser um material disponível nos varejos de distribuição em todo o país.

Toda a linguagem de projeto deveria ser parametrizável para contemplar geometrias e ambientes arquitetônicos que viessem a ser customizados em série. Essa customização, além de ser controlada por parâmetros, deveria utilizar fresadoras CNC, por ser de fácil acesso e transportável para qualquer região do Brasil.

Com isso, toda a geometria da arquitetura proposta deveria ser planificada durante a fase de projeto, de modo que a fresadora CNC pudesse comportar as chapas de OSB, madeira laminada colada ou compensado de madeira para realizar cortes a partir do modelo tridimensional. O sistema construtivo pode ser observado na figura 3.88.

Figura 3.88 – Perspectiva 3D do sistema construtivo

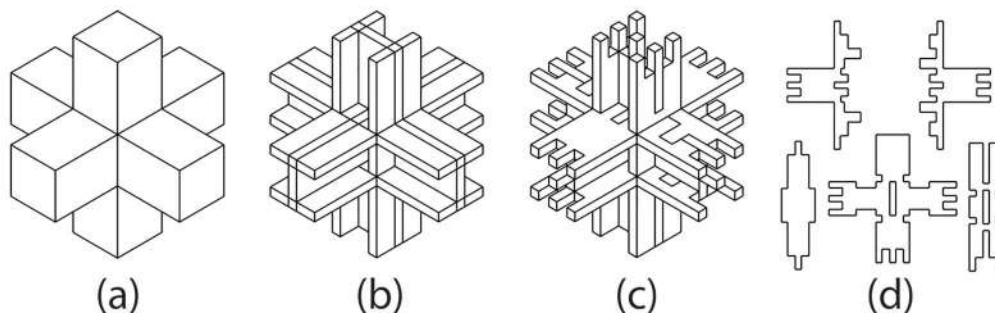


Fonte: (BRASIL; FRANCO, 2019, p. 608)

A partir dos parâmetros pré-estabelecidos, o software reconhecia as geometrias 3D, planificava essas geometrias conforme as dimensões do material adotado, desenvolvia encaixes e separava os objetos bidirecionais em peças a serem recortadas pela *router* CNC

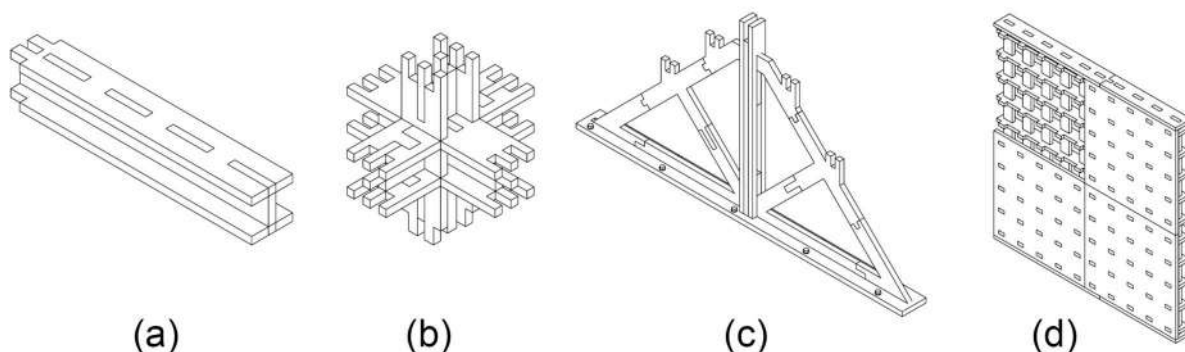
(figura 3.89). Dessa forma, criou-se uma família de componentes construtivos, formados por vigas, encaixes, treliças e vedações (figura 3.90).

Figura 3.89 – Perspectivas 3D do processo criativo do sistema construtivo: um objeto 3D é identificado (a); Volumes 3D são seccionados em peças planificadas (b); Junções são criadas (c); objetos bidimensionais são criados (d)



Fonte: (BRASIL; FRANCO, 2019, p. 607)

Figura 3.90 – Perspectivas 3D das famílias de componentes construtivos: vigas (a); conexões (b); treliças (c); vedações (d)

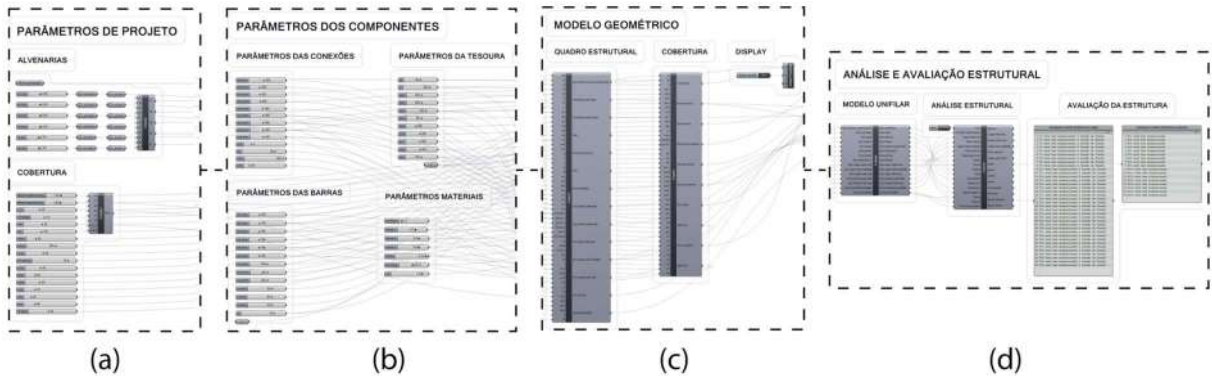


Fonte: (BRASIL; FRANCO, 2019, p. 609)

Todas essas informações foram organizadas em parâmetros, divididos em quatro momentos: parâmetros de projeto, dos componentes, do modelo geométrico e por conseguinte, o momento de análise e avaliação estrutural (figura 3.91). As diversas soluções arquitetônicas poderiam ser formuladas a partir do algoritmo que organizava esses parâmetros (figura 3.92).

Não houve a prototipagem de uma habitação desse sistema construtivo em sua totalidade, no entanto, foram prototipados em escala 1:1 algumas peças das famílias de componentes de uma habitação desenvolvida por meio dessa técnica construtiva (figura 3.93).

Figura 3.91 – Diagramas: (a) Algoritmo de geração de possibilidades de desenhos a partir do sistema construtivo adotado; (b) parâmetros de desenho de arquitetura; (c) modelo geométrico; (d) simulação estrutural e análise



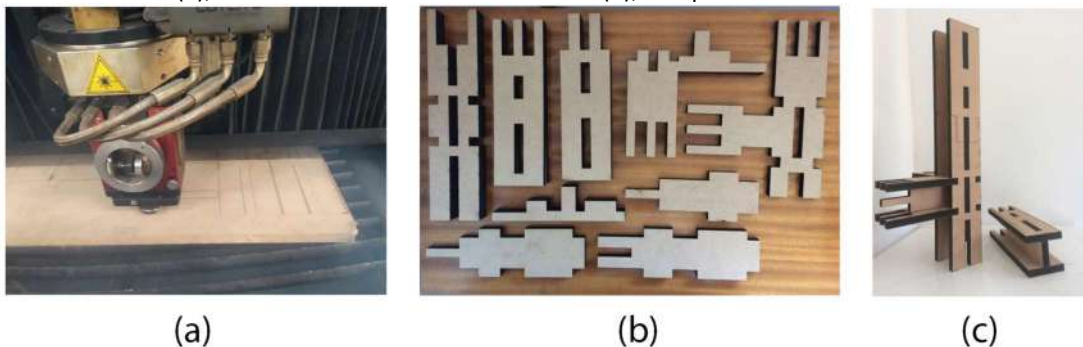
Fonte: (BRASIL; FRANCO, 2019, p. 610)

Figura 3.92 – Perspectivas 3D de variações a partir das possibilidades geométricas simuladas pelo algoritmo



Fonte: (BRASIL; FRANCO, 2019, p. 610)

Figura 3.93 – Fotografias: Processo de manufatura dos componentes construtivos com equipamento de corte CNC de dois eixos (a); elementos bidirecionais fabricados (b); componentes encaixados uns aos outros (c)

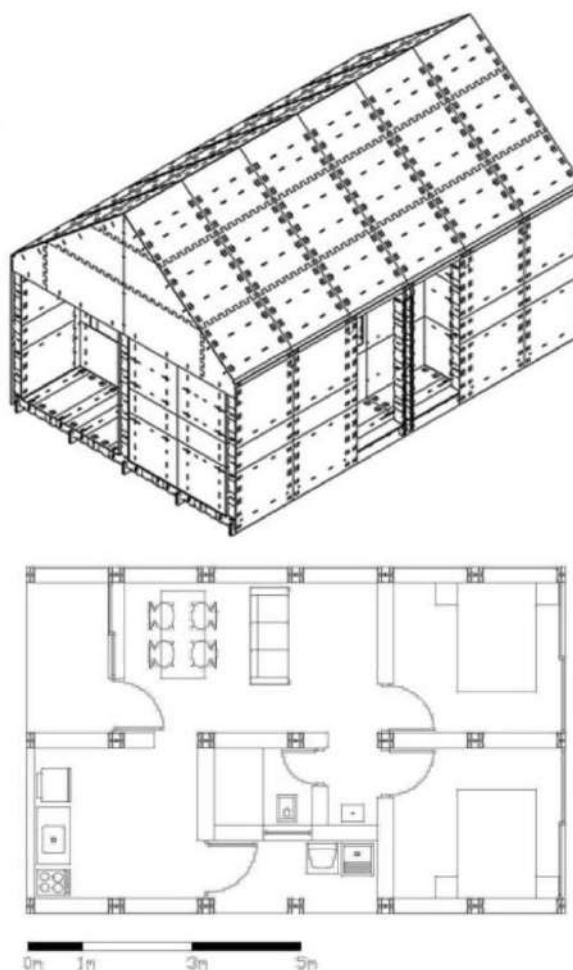


Fonte: (BRASIL; FRANCO, 2019, p. 612)

Outro projeto de caráter experimental foi a casa projetada pelo grupo de pesquisa Teoria e Projeto na Era Digital (TPED), da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, que também utilizando a técnica construtiva da *Wikihouse*, mas nos conformes do Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV - (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016).

Inicialmente, foram utilizadas as diretrizes do PMCMV para desenvolver o projeto da residência (figura 3.94), como os ambientes solicitados e a área de 36m² ⁵¹. Um protótipo deste projeto foi desenvolvido na escala 1:6 para avaliar a estrutura da casa, assim como os encaixes de suas peças (figura 3.95). Neste caso, por ser uma escala menor, utilizou-se uma impressora a *laser* para recortar as peças.

Figura 3.94 – Ilustração do projeto residencial desenvolvido pelo grupo TPED (perspectiva da casa posicionada acima seguida por sua respectiva planta baixa)



Fonte: (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016)

⁵¹ As diretrizes do PMCMV utilizadas pelo grupo de pesquisa referem-se ao período em que o projeto foi desenvolvido, que foi em 2015, podendo essas terem sofrido ajustes com o decorrer dos anos.

Figura 3.95 – Fotografia do protótipo da residência em escala 1:6, com peças recortadas em equipamento de corte a *laser*



Fonte: (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016)

Para desenvolver o protótipo em escala 1:1, o material escolhido para a estrutura e as vedações foi o OSB, por ser um material econômico e um dos indicados pelo sistema *Wikihouse*. O projeto total da casa demandaria 1.200 chapas de OSB de 18,3mm, no entanto, em razão de limitações financeiras, o grupo de pesquisa teve acesso a 90 chapas, o que permitiu desenvolver dois pórticos com seus respectivos travamentos. Esses pórticos foram recortados em uma fresadora CNC pertencente à instituição de ensino e posteriormente montados em um pátio próximo ao laboratório utilizado para o recorte das peças (figura 3.96).

Para a montagem dos pórticos, foi necessário um dia de serviço e seis pessoas para contribuírem com o manuseio de seus componentes (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016).

Figura 3.96 – Fotografia do pórtico da casa em escala 1:1



Fonte: (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016)

Apesar de a equipe executar apenas dois pórticos, houve aprendizados significativos durante todo o processo. Segundo Nardelli e Backheuser (2016), observou-se que cada chapa de OSB levou aproximadamente uma hora para ser recortada pela fresadora CNC. Devido à espessura de 18,3mm das chapas, a fresa fez o mesmo percurso de corte três vezes, o que levaria muito tempo para recortar todas as 417 chapas, caso toda a casa fosse executada.

Quanto aos encaixes transversais do sistema *Wikihouse*, esses demandaram por detalhes de recorte conhecidos como ‘*pocketing*’, um furo dentro da chapa onde todo o material deve ser removido, o que desenvolve muito pó de serragem a ser retirado pelo sistema de sucção do equipamento CNC. Com isso, o sistema de sucção obstruiu-se por diversas vezes e as fresas estragaram recorrentemente.

Outro desafio foi a recorrência de peças quebradas nos pontos de junção entre chapas, como demonstra a fotografia de um determinado encaixe (figura 3.97), onde o encaixe central foi quebrado devido aos esforços oriundos da montagem. Portanto, caso a casa fosse executada em sua totalidade, seriam necessários 417 painéis OSB, o que representaria 417 horas apenas para o corte das peças (aproximadamente 52 dias, considerando oito horas de usinagem por dia). O tempo aproximado para a montagem dos 12 pórticos seria de seis dias, isso apenas para a estrutura da casa.

Figura 3.97 – Fotografia à esquerda demonstra uma conexão com êxito / fotografia à direita exemplifica um encaixe com o material danificado por conta de uso de força excessiva durante a montagem



Fonte: (NARDELLI; BACKHEUSER, 2016)

Contudo, é possível citar dois projetos habitacionais desenvolvidos não como protótipos, mas com o objetivo de ocupação por usuários, de modo a atender os aspectos funcionais de uma habitação: a ‘Casa Conectada’ (ESTÚDIO GUTO REQUENA, 2021) e a ‘Casa do Sr. Manoel’ (ROCHA; ALVARENGA; BOLSONNI, 2021).

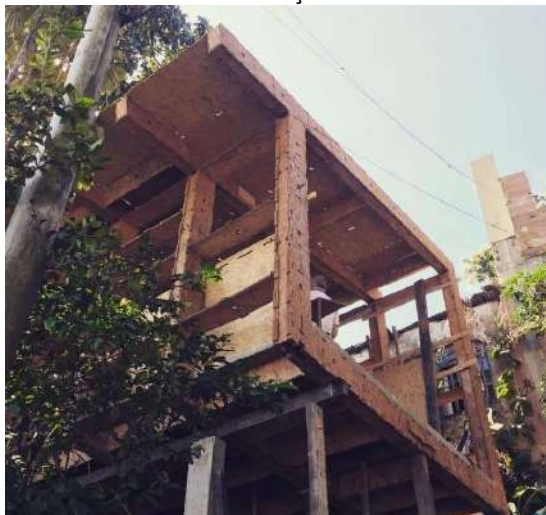
A Casa Conectada é um projeto do arquiteto Guto Requena/PAX Arquitetura e dos demais colaboradores que também utilizaram o método construtivo da *Wikihouse* como exemplo para fabricar uma residência temporária no evento CASACOR de São Paulo de 2021. No entanto, apenas a casa do Senhor Manoel foi executada com a finalidade de prover uma habitação para um morador de uma comunidade carente do Espírito Santo. A casa foi entregue com sucesso e, atualmente, é habitada por um morador da Região Metropolitana da Grande Vitória.

A casa projetada para o 'Sr. Manoel' (figura 3.98), em Vitória, Espírito Santo, é um objeto de estudo da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), que angariou recursos para a produção desta residência, cuja intenção foi aprender mais sobre este método construtivo junto aos alunos da faculdade de arquitetura desta instituição (ROCHA; ALVARENGA; BOLSONNI, 2021).

O contexto de produção foi a demanda de uma residência de baixo custo para um morador de bairro humilde da grande Vitória, que pudesse ser erguida com a ajuda da comunidade local e que causasse pouco impacto ambiental em seu entorno.

A logística de construção foi a produção dos componentes por uma empresa local, utilizando madeira cortada por uma fresadora CNC. Posteriormente, alguns componentes construtivos foram montados no sítio da empresa que recortou o material (figura 3.99). Os pórticos que formam as casas *Wikihouses* foram previamente montados para que coubessem no interior do caminhão de transporte, para que a montagem final das casas fosse realizada no próprio sítio de implantação da residência. Esta foi a primeira *Wikihouse* habitada do Brasil.

Figura 3.98 – Fotografia demonstrando a finalização da estrutura da Casa 'Sr. Manoel'



Fonte: (VIX CONEXÃO, 2022)

Figura 3.99 – Fotografias do transporte e montagem dos pórticos da Casa ‘Sr. Manoel’



Fonte: (ROCHA; ALVARENGA; BOLSONNI, 2021, p.99)

A priori, o conceito da *Wikihouse* aparenta ser uma alternativa para sanar o *déficit* habitacional, por se tratar de uma solução cujos projetos são acessíveis à toda a população, por serem de fonte aberta, e a montagem ocorrer preferencialmente por meio da colaboração da comunidade (*do-it-yourself*), soluções essas que reduzem os custos da construção.

Além disso, o uso de materiais a base de madeira permite construir com menor impacto ambiental. No entanto, os autores Rocha, Alvarenga e Bolsonni (2021) relatam que a experiência adquirida a partir da construção da *Wikihouse* do ‘Sr. Manoel’ mostra diversos desafios que devem ser pautados.

A empresa que recortou as peças não tinha experiência o suficiente com a produção de componentes arquitetônicos. Além disso, houve um gasto adicional de mão de obra com essa empresa que produziu as peças, o que difere da casa de Passaro e Rohde (2016), onde o equipamento CNC utilizado era de propriedade da instituição. Além disso, os voluntários, para montar o projeto da UFRJ, foram ajudados por estudantes de arquitetura, detentores de maior conhecimento técnico a respeito de construção do que os voluntários da comunidade que auxiliaram a montagem da casa do ‘Sr. Manoel’.

Outro desafio apontado foi o transporte das peças até o sítio de construção, mesmo com a ajuda do caminhão. Por se tratar de um bairro com pouca infraestrutura e sem acesso a veículos, o caminhão não conseguiu entrar em suas ruas estreitas, o que demandou pelo transporte a pé das peças da casa. A topografia do morro, com alta inclinação, também dificultou ainda mais o transporte das peças, agravado pelo peso elevado delas.

Logo, os autores da casa do ‘Sr. Manoel’, Rocha, Alvarenga e Bolsonni (2021), discordam com os ideais de Passaro e Rohde (2016), que concluíram que as *Wikihouses* seriam

solução a curto prazo para a sociedade mais oprimida (ROCHA; ALVARENGA; BOLSONNI, 2021, p. 95).

A ‘Casa Conectada’ (figura 3.100) é outro projeto executado em escala real e ocupado, produzida pelos escritórios Estúdio Guto Requena (ESTÚDIO GUTO REQUENA, 2022) e PAX Arquitetura (PAX ARQUITETURA, 2022), desenvolvido para a edição de 2021 da CASACOR São Paulo (CASACOR SÃO PAULO, 2022).

Trata-se de uma casa feita para ser temporariamente visitável, cuja estrutura é derivada do método construtivo *Wikihouse* (WIKIHOUSE, 2022). A concepção do projeto buscou desenvolver novas soluções para amenizar a emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Para tanto, o escritório do arquiteto Guto Requena (2022) relata que a construção em madeira é capaz de sequestrar da atmosfera uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂), enquanto o uso do concreto na construção civil produz a mesma quantidade de CO₂.

Toda a estrutura da ‘Casa Conectada’ e os seus revestimentos internos são em chapas de compensado naval de madeira pinus. Segundo os autores, a escolha por um método construtivo que utiliza cortes de chapas em equipamentos CNC, que posteriormente são montados no sítio da instalação (figura 3.101), é capaz de minimizar o desperdício de matéria-prima em obras para praticamente zero (ESTÚDIO GUTO REQUENA, 2022).

O interior daquela residência (figura 3.102) também privilegia o aspecto *in natura* das chapas de compensado naval, de modo a não haver a necessidade de adicionar revestimentos que possam agredir o meio ambiente. Além disso, a curadoria dos móveis optou pelos fabricados similarmente ao processo construtivo da casa, que utilizam a madeira e a tecnologia CNC.

Figura 3.100 – Fotografia do exterior da ‘Casa Conectada’ em exposição na CASACOR São Paulo edição de 2021



Fonte: (ESTÚDIO GUTO REQUENA, 2022)

Figura 3.101 – Fotografia do processo de montagem da 'Casa Conectada'



Fonte: (ESTÚDIO GUTO REQUENA, 2022)

Figura 3.102 – Fotografia do interior da 'Casa Conectada' em exposição na CASACOR São Paulo edição de 2021



Fonte: (ESTÚDIO GUTO REQUENA, 2022)

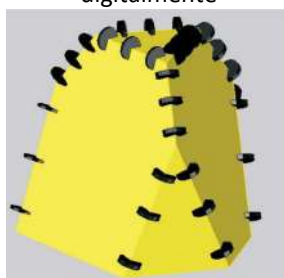
Nos exemplos anteriores, foi possível observar a predominância da tecnologia de corte com fresadoras CNC no Brasil, sendo que as casas demonstradas resultam do conceito construtivo da *Wikihouse*. Entretanto, a produção de componentes arquitetônicos para residências não requer, necessariamente, que todo o projeto seja idealizado para utilizar as tecnologias digitais.

Dessa forma, é possível mesclar as soluções construtivas, por exemplo, o analógico e o digital, de modo que essas soluções representem uma parcela de uma casa. Por exemplo, o artefato poderia ser um cobogó, uma esquadria, uma clarabóia, ou até mesmo utilizar a tecnologia CAD/CAM para fabricar uma fôrma de um elemento de concreto, sendo esse o caso de uma pesquisa desenvolvida por Rocha e Celani (2010), cujo objetivo foi explorar a possibilidade de poder variar geometricamente fôrmas de concreto com o auxílio de equipamentos CAD/CAM.

Nesse caso, a produção de fôrmas de concreto foi desenvolvida tridimensionalmente em um ambiente virtual (figura 3.103) que seria posteriormente enviada para a produção na indústria conforme o preceito *file-to-factory*. A geometria da respectiva fôrma foi idealizada para ser feita com madeira recortada por fresadoras CNC, para justamente permitir inúmeras possibilidades de formas ímpares que pudessem ser facilmente enviadas para o comércio detentor dos equipamentos de corte cuja tecnologia é a CAD/CAM.

A figura 3.104 ilustra essa fôrma de madeira para elemento de concreto ao lado do protótipo resultante desse estudo. Portanto, esse bloco de concreto poderia ser uma sapata de uma casa, um pilar, ou um componente qualquer de uma residência.

Figura 3.103 – Modelo 3D digital de uma fôrma de madeira para elemento de concreto desenvolvida digitalmente



Fonte: (ROCHA; CELANI, 2010)

Figura 3.104 – Fotografia de fôrma de concreto à direita e seu respectivo subproduto à esquerda



Fonte: (ROCHA; CELANI, 2010)

Outro exemplo da possibilidade de utilização das tecnologias da área da fabricação digital para a produção de partes de uma arquitetura, e não a sua totalidade, é o projeto 'CoBLOGó' (COBLOGÓ/SUBDV, 2020), do escritório de arquitetura SUBdV (SUBDV, 2023). Nesse exemplo, os projetistas, os arquitetos Anne Save de Beaurecueil e Franklin Lee, utilizaram o conceito de projeto *High, Low*, que significa a utilização de tecnologia de ponta (*high-end*) com materiais de baixo custo e mão de obra sem conhecimento técnico a respeito das tecnologias de última geração (*low cost*).

Desse modo, os equipamentos utilizados pela fabricação digital, por exemplo, são para maximizar o potencial de uso de materiais que são comumente usados na construção civil, como é o caso nesse projeto do bloco de concreto (*low*). Esse projeto é o principal material de construção do projeto 'CoBLOGó' (figura 3.105), onde uma mão de obra sem conhecimento prévio em tecnologias da fabricação digital pôde executar este projeto sem dificuldades.

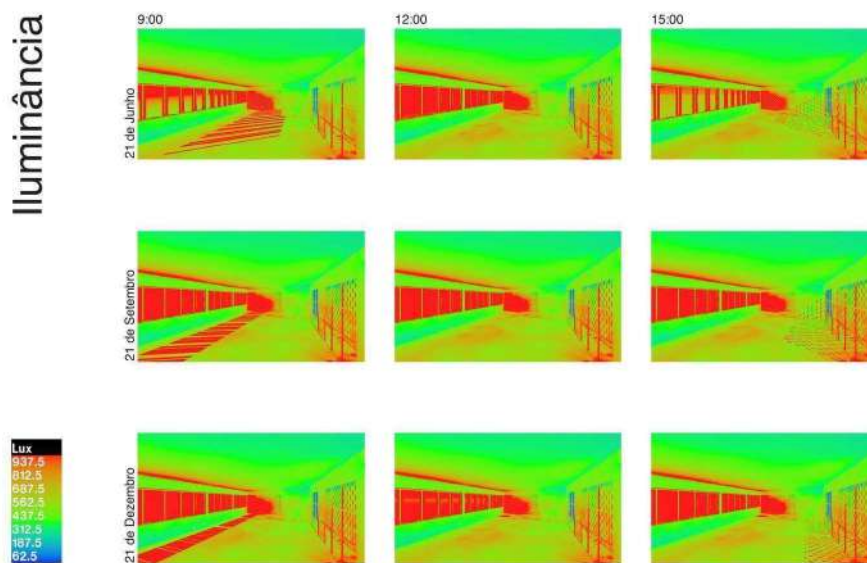
Porém, projetado em um *software* que utiliza parâmetros para gerar arquitetura (*high*), os blocos de concreto foram assentados no projeto de maneira inusitada, de modo a otimizar a penetração de luz no ambiente interno (para que ilumine sem incomodar os usuários a partir do excesso de calor gerado pela iluminação solar). Dessa forma, as tecnologias elaboradas por meio das técnicas da computação paramétrica, da fabricação digital e da simulação de conforto térmico (figura 3.106) contribuíram com a qualidade do projeto e a sua respectiva construção (COBLOGÓ/SUBDV, 2020).

Figura 3.105 – Fotografia da fachada do projeto 'CoBLOGó'



Fonte: (COBLOGÓ/SUBDV, 2020)

Figura 3.106 – Diagramas de Iluminância no interior da edificação ‘CoBLOGó’ no decorrer do ano - resultante da fachada em cobogós



Fonte: (COBLOGÓ/SUBDV, 2020)

A complexidade de execução da fachada foi vencida pela solução técnica-construtiva desenvolvida pelos arquitetos. Esses arquitetos idealizaram um método que utilizou papelão recortado (figura 3.107) em equipamento de corte a *laser* para servir de referência *in loco* para que os pedreiros assentassem os blocos de concreto exatamente onde o projeto digital os posicionou.

Uma estrutura auxiliar em MDF, recortada em fresadoras CNC, foi utilizada para sustentar o gabarito de construção (papelões). A figura 3.108 demonstra essa estrutura temporária desenvolvida atrás da fachada de blocos de concreto para facilitar a sua execução. O resultado interno desta fachada pode ser observado na figura 3.109, onde a luz adentra o interior da edificação sem incomodar os usuários com excessos de iluminação.

Outrossim, a ventilação natural permeia todo o pavimento tipo como resultado da disposição dos blocos de concreto, assemelhando-se às fachadas em cobogó, que são comumente utilizadas na arquitetura brasileira.

Portando, o projeto ‘CoBLOGó’ (COBLOGÓ/SUBDV, 2020), apesar de ser uma edificação comercial, demonstra como as tecnologias da fabricação digital podem auxiliar na produção de partes de uma edificação e a baixo custo, solução que poderia ser utilizada em uma residência, por exemplo.

Figura 3.107 – Fotografia do detalhe de execução da fachada do projeto 'CoBLOGó'



Fonte: (COBLOGÓ/SUBDV, 2020)

Figura 3.108 – Fotografia da fachada do projeto 'CoBLOGó' em fase de execução



Fonte: (COBLOGÓ/SUBDV, 2020)

Figura 3.109 – Fotografia do interior da edificação ‘CoBLOGó’



Fonte: (COBLOGÓ/SUBDV, 2020)

4. OS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS NA INDÚSTRIA DA GRANDE VITÓRIA

4.1 Metodologia de Pesquisa

A pesquisa de campo concentrou-se na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), no estado do Espírito Santo. Empresas e instituições foram contatadas em busca daquelas que utilizassem equipamentos cuja tecnologia é CAD/CAM ou da robótica. Inicialmente, foram consideradas apenas aquelas com disponibilidade dos serviços para o uso acadêmico ou disponibilizados por meio de prestações de serviços à comunidade, considerando tanto pessoas físicas como pessoas jurídicas.

Posteriormente, foram pesquisadas instituições acadêmicas na RMGV que detêm equipamentos CAD/CAM em seus laboratórios, de modo a compreender se os futuros profissionais tiveram contatos com esses recursos e conhecimentos relacionados. Esses dados foram organizados em um quadro síntese (Apêndice 1), possibilitando reconhecer a disponibilidade e o acesso daquelas tecnologias na RMGV.

Foram utilizados e-mails, buscas na internet, ligações telefônicas e indicações de profissionais para encontrar as empresas e as instituições citadas nesta pesquisa. O SINDUSCON ES (SINDUSCON-ES, 2022) foi contatado com a intenção de investigar as empresas que possuíssem as tecnologias mencionadas, no entanto, não existe uma catalogação deste tipo na respectiva instituição.

Dentre as empresas que permitiram a visita, foram entrevistados empresários e funcionários que se prontificaram a responder tais questionamentos. Essas perguntas, no entanto, não representam os objetivos desta pesquisa, mas elas foram organizadas para que houvesse melhor compreensão, caso haja demanda pelos serviços ofertados pelas empresas e instituições contatadas.

Trata-se de um balizador para a pesquisa de campo e essas perguntas não assumem caráter de questionário, afinal, o objetivo não é traçar um perfil estatístico. Portanto, as seguintes perguntas foram formuladas:

- Já receberam encomendas para a produção de componentes arquitetônicos?
- Das oito horas de trabalho de um dia útil, quanto tempo o equipamento fica ativo?
- A população conhece e utiliza bem a tecnologia CNC?
- O investimento no equipamento traz retorno financeiro? Qual é o tempo médio de retorno de capital?
- Houve treinamento da equipe? Como ocorreu? Houve suporte do fabricante?
- A manutenção é realizada pela empresa fornecedora? Existe assistência técnica no estado ou há dependência do fornecedor?
- Como é feita a reposição de peças?
- Qual é a frequência de desgaste de partes do equipamento?
- Atualmente existe uma abertura para a produção por parte do público externo?

Dentre as dezesseis⁵² empresas contatadas que utilizam a tecnologia CAD/CAM na RMGV, três se prontificaram para a visita em seus estabelecimentos, sendo essas a Q'arte (2022), Imagiton (2022) e Cemaço (2023). Os dados coletados das demais empresas ocorreram por meio de ligação telefônica ou por meio de pesquisa em seus *websites*. Os dados das empresas podem ser observados no quadro 4.01.

⁵² Uma dessas empresas (Metal One) foi desconsiderada dos gráficos na seção de análise de dados pela falta de comprovação de equipamentos CAD/CAM. Em duas conversas telefônicas entre o pesquisador e o proprietário dessa empresa, o proprietário confirmou ter os equipamentos e ficou de entregar os respectivos dados. No entanto, isso não ocorreu.

Quadro 4.01 – Empresas Contatadas na RMGV

QUADRO 4.01: EMPRESAS CONTATADAS NA RMGV					
#	Razão Social	Ramo	Obteve retorno?	Visita ao estabelecimento?	Dados coletados
1	Q'Arte	Artesanato	Sim	Sim	Sim - <i>in loco</i> -
2	Imagiton	Comunicação Visual	Sim	Sim	Sim - <i>in loco</i> -
3	Exclusiva Laser	Comunicação Visual	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
4	FTR Soluções	Comunicação Visual	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
5	Cut Solution	Comunicação Visual	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
6	Proart Digital	Comunicação Visual	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
7	LM Marcenaria	Marcenaria	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
8	Cemaço	Metalúrgica	Sim	Sim	Sim - <i>in loco</i> -
9	Delga Inox	Metalúrgica	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
10	Goronci	Metalúrgica	Sim	Não	Sim - no website da empresa e via ligação telefônica -
11	Baldo	Metalúrgica	Sim	Não	Sim - no website da empresa e via ligação telefônica -
12	Tungstek	Metalúrgica	Não	Sim - mas não permitiram visita -	Sim - dados coletados no website da empresa -
13	Steel Moldes	Metalúrgica	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
14	JR Mecânica	Metalúrgica	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
15	Usicorte	Metalúrgica	Sim	Não	Sim - via ligação telefônica -
16	Metal One	Metalúrgica	Não	Não	Não - sem retorno -

Fonte: Elaborado pelo autor

A respeito das instituições acadêmicas, optou-se por contatar aquelas que contemplam o ensino do bacharelado em arquitetura e urbanismo na RMGV, sendo sete ao todo encontradas por meio de pesquisa no portal e-MEC⁵³ (E-MEC, 2022), que podem ser visualizadas no quadro 4.02.

O objetivo do contato com essas instituições foi compreender se existe uma aproximação de seus estudantes com os equipamentos da robótica ou com a tecnologia CAD/CAM, de modo a analisar se os profissionais graduados nessas instituições obtiveram ou não compreensão sobre a aplicação e utilização desses equipamentos em um ambiente acadêmico.

Vale ressaltar que a investigação no meio acadêmico serviu apenas como dados demonstrativos de uma possível aproximação de futuros profissionais com os equipamentos abordados nesta pesquisa. O SENAI-ES (2022), embora seja um curso técnico, há em seu campus equipamentos CAD/CAM que, por meio de instituições conveniadas, possibilita o acesso à serviços por parte da comunidade, sendo essas o FINDESLAB (2022) e o Instituto Senai de Tecnologia em Eficiência Operacional-ISTEO (2022).

⁵³ Apesar do portal e-MEC possuir em seu cadastro sete instituições com o curso de bacharelado em arquitetura e urbanismo, uma não foi considerada por não ofertar mais o curso, sendo essa a instituição Pitágoras Guarapari. As seis consideradas são: UFES, UVV, MULTIVIX, SALESIANO, FINAC e FAESA.

A faculdade Pitágoras, apesar de constar no portal e-MEC (2022), não disponibiliza mais o curso de arquitetura e urbanismo em Guarapari (RMGV). O FINDESLAB, ISTOE, SENAI e UFES permitiram acesso às suas instalações. As instituições contatadas podem ser observadas no Quadro 4.02.

Quadro 4.02 – Instituições Contatadas na RMGV

QUADRO 4.02: INSTITUIÇÕES CONTATADAS NA RMGV					
#	Razão Social	Atende quais públicos?	Obteve retorno?	Visita ao estabelecimento?	Dados coletados
1	FINDESLAB	Pessoas físicas e jurídicas	Sim	Sim	Sim
2	ISTEO	Pessoas jurídicas	Sim	Sim	Sim
3	SENAI	Acadêmicos*	Sim	Sim	Sim
4	UFES	Acadêmicos*	Sim	Não	Sim
5	MULTIVIX	Acadêmicos*	E-mail enviado - sem retorno -	Não	Não
6	SALESIANO	Acadêmicos*	E-mail enviado - sem retorno -	Não	Não
7	FINAC	Acadêmicos*	Sem e-mail - sem retorno tel. -	Não	Não
8	FAESA	Acadêmicos*	E-mail enviado - Não -	Não	Não
9	UVV	Acadêmicos*	E-mail enviado - Não -	Não	Não
Observações:					
*Matriculados na instituição.					

Fonte: Elaborado pelo autor

Além das entrevistas, houve a realização de levantamento fotográfico com as empresas e instituições que deram permissão para a visita. Ademais, gráficos e tabelas⁵⁴ foram utilizados para sistematizar e comparar os dados (registrados no quadro Apêndice 1) obtidos dos equipamentos disponíveis na RMGV, sendo esses:

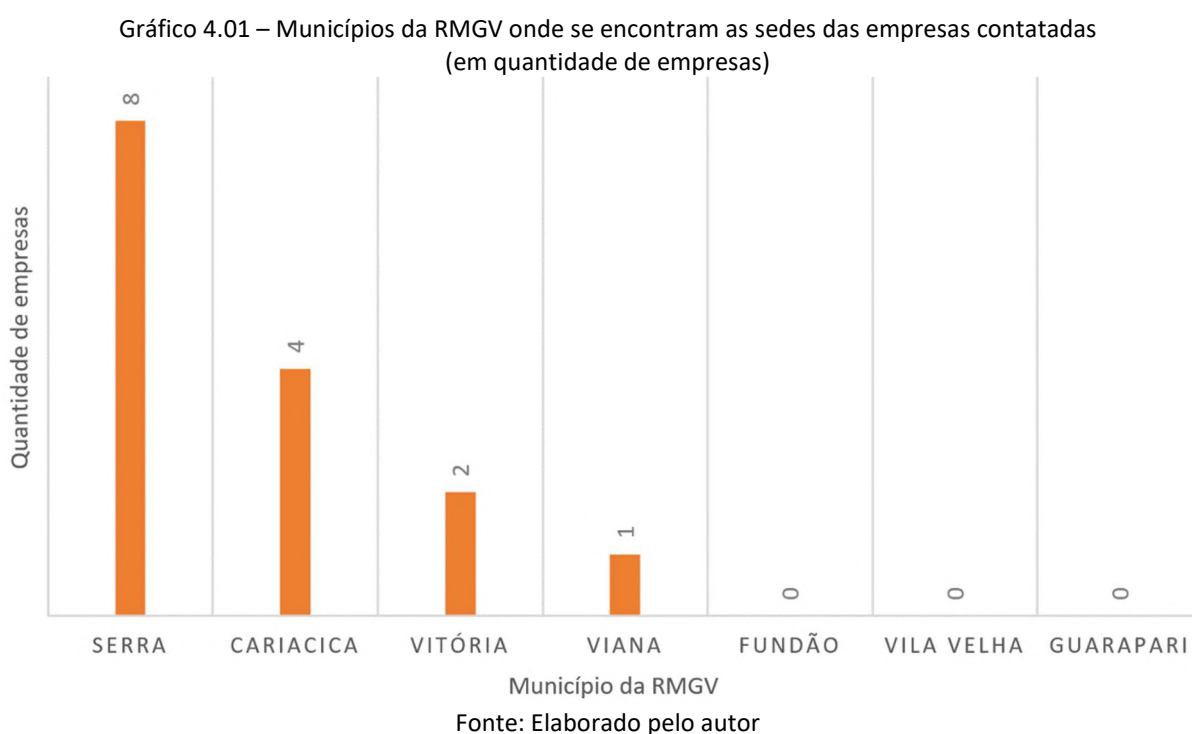
- Gráfico 4.01: Municípios da RMGV onde se encontram as sedes das empresas contatadas;
- Gráfico 4.02: Área de atuação das empresas detentoras de tecnologia CAD/CAM disponíveis na RMGV;
- Gráfico 4.03: Tecnologia dos equipamentos CAD/CAM disponíveis na RMGV;
- Gráfico 4.04: Tecnologia dos equipamentos CAD/CAM subtrativos disponíveis na RMGV - Considera estabelecimentos comerciais e institucionais;
- Gráfico 4.05: Os materiais comportados dentre os equipamentos CAD/CAM aditivos e subtrativos disponíveis na RMGV (em quantidade de empresas);
- Gráfico 4.06: Tamanho da área de trabalho dos equipamentos CAD/CAM disponíveis na RMGV - Dentre os equipamentos que lidam com chapas - (considerando uma prancha de MDF padrão de 1.830x2.750mm);

⁵⁴ Os gráficos e tabelas foram organizados visualmente por cores, sendo que a cor laranja representa os estabelecimentos comerciais e a azul as instituições. Já a cor cinza representa ambas ou outras categorizações.

- Gráfico 4.07: Volume da área de trabalho dos equipamentos CAD/CAM aditivos disponíveis na RMGV;
- Gráfico 4.08: Equipamentos disponíveis na RMGV para pessoas físicas, jurídicas e comunidade acadêmica.

4.2 Sistematização dos Dados e Análise

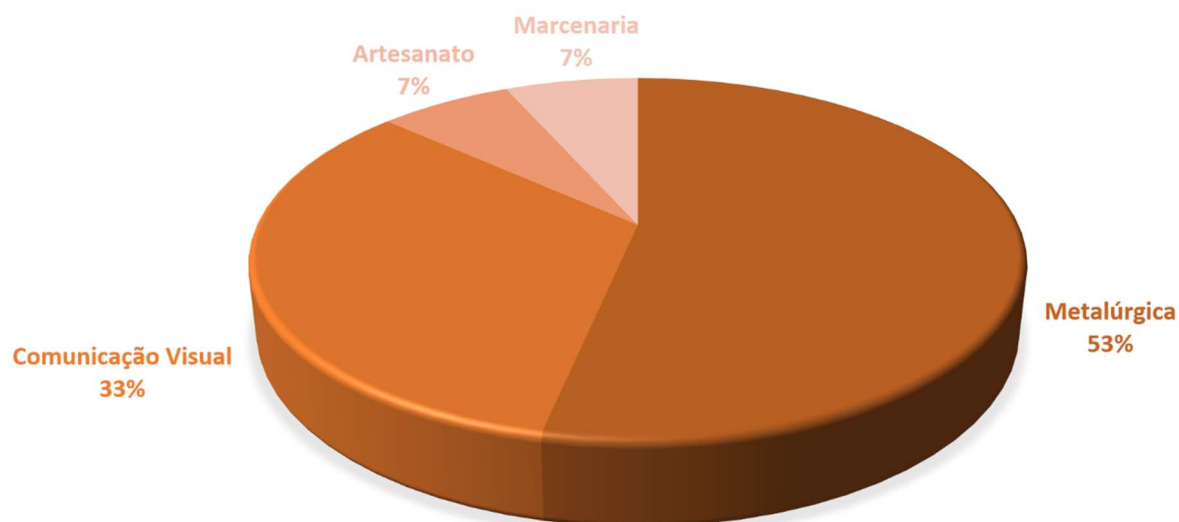
Dentre as quinze⁵⁵ empresas contatadas que utilizam equipamentos CAD/CAM na RMGV, oito possuem sede no município de Serra, quatro em Cariacica, duas em Vitória e uma em Viana, o que pode ser visualizado no gráfico 4.01. Dentre essas, apenas três permitiram visita: Q'arte, Imagiton e Cemaço. Os dados das demais empresas foram coletados via conversa telefônica ou no *website* da empresa.



A respeito da área de atuação dessas quinze empresas detentoras de tecnologia CAD/CAM, oito são do ramo de metalurgia, cinco de comunicação visual, uma de marcenaria e outra de artesanato, o que pode ser observado no gráfico 4.02.

⁵⁵ Uma das 16 empresas foi desconsiderada por não comprovar a existência de equipamentos CAD/CAM em sua sede. Portanto, os gráficos consideram apenas 15 empresas e os equipamentos dessas.

Gráfico 4.02 – Área de atuação das empresas detentoras de tecnologia CAD/CAM disponíveis na RMGV (em porcentagem)



Fonte: Elaborado pelo autor

As empresas metalúrgicas são as mais representativas - 53% do todo dentre as levantadas - em oferta de serviços CAD/CAM na RMGV. A presença de mineradoras no Espírito Santo como a Vale e a Samarco, e de petroleiras, como é o caso da Petrobrás, além da siderúrgica ArcelorMittal⁵⁶ (ARCELORMITTAL, 2023), aumenta a demanda por insumos e produtos à base de aço.

A Cemaço é uma empresa com sede em São Paulo e tem mais outras três filiais, sendo uma no município de Serra, no estado do Espírito Santo. Essa lida com chapas de aço de maior porte e espessuras. Com a tecnologia oxicorte CNC, é capaz de perfurar chapas de aço de até 450mm, em uma área de trabalho máxima de 12.000x2.440mm.

Essa empresa é detentora de quatro equipamentos de corte na RMGV, sendo três oxicorte e uma que atua como oxicorte e plasma, porém, usando a mesma mesa de trabalho de 12.000x2.440mm. A Cemaço também conta com frota própria de caminhões (figura 4.01) de diversos portes para o transporte de insumos e entrega de sua produção.

⁵⁶ A ArcelorMittal é a terceira maior produtora de aços planos laminados do Brasil e está presente na RMGV, onde produz 7,5 milhões de toneladas de aço por ano na unidade de Tubarão.

Figura 4.01 – Fotografia de caminhão da Cemaço saindo para a entrega de seus produtos



Fonte: Acervo do autor

A unidade de Taubaté, em São Paulo, da Cemaço, apesar de estar fora do domínio da RMGV, pode ser utilizada pela filial do ES para produzir peças com outros equipamentos CNC, como é o exemplo da cortadora a *laser*, capaz de produzir acabamentos mais precisos. A variação de precisão de corte deste equipamento é de aproximadamente 0,05mm para mais ou menos, enquanto o oxicorte, ou plasma, é de aproximadamente 3mm. A figura 4.02 ilustra um objeto pequeno com fino acabamento cortado na cortadora a *laser* CNC de Taubaté⁵⁷.

Figura 4.02 – Fotografia de um objeto (bicicleta) cortado no equipamento a *laser* da Cemaço - filial de Taubaté



Fonte: Acervo do autor

⁵⁷ Os equipamentos da Cemaço que não estão no domínio da RMGV não foram considerados no levantamento.

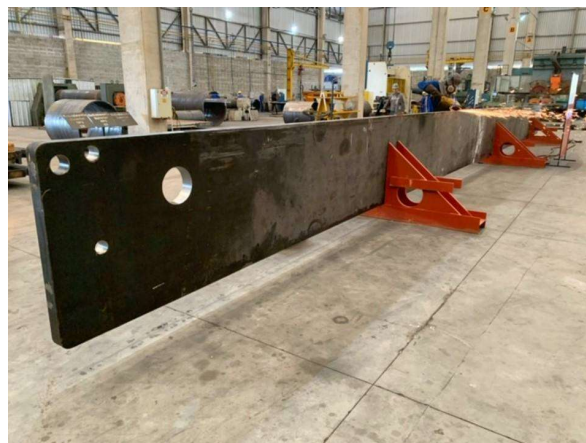
As figuras 4.03, 4.04, 4.05 e 4.06 demonstram o potencial de produção da Cemaço com o auxílio de equipamentos CAD/CAM.

Figura 4.03 – Fotografia de mesa de Corte de 12m de extensão



Fonte: Website da Cemaço (CEMAÇO, 2023)

Figura 4.04 – Fotografia da peça da figura 4.03 fora da mesa de cor



Fonte: Website da Cemaço (CEMAÇO, 2023)

Figura 4.05 – Fotografia do processo de corte de chapa grossa de aço



Fonte: Website da Cemaço (CEMAÇO, 2023)

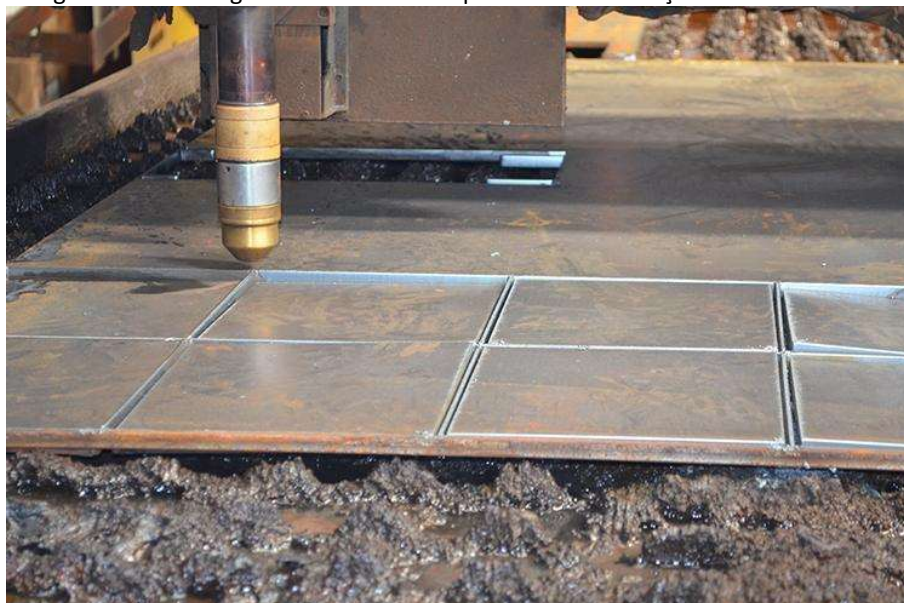
Figura 4.06 – Fotografia de peça cortada pronta para entrega



Fonte: Website da Cemaço (CEMAÇO, 2023)

A Tungstek (2023) possui equipamentos de corte CNC, como é o caso de cortadoras a *laser*, plasma de alta definição e jato d'água de alta pressão. Ademais, uma empresa de destaque na localidade é a Goronci (2022), detentora de equipamentos CAD/CAM que cortam metais a plasma (figura 4.07) e a *laser*, e dobram com a tecnologia CNC.

Figura 4.07 – Fotografia de cortadora a plasma cortando aço na Grande Vitória



Fonte: Website da Goronci Metalúrgica (GORONCI, 2022)

As prestadoras de serviços do ramo da comunicação visual representam 33% das empresas pesquisadas. A Imagiton (2022) é uma gráfica que produz artefatos de comunicação visual. Essa empresa tem em seu acervo dois equipamentos CAD/CAM, a *Cutlite 1000W* (figura 4.08) e a *Multicut Konsberg XN* (figura 4.09). A primeira corta acrílico, MDF, papelão e aço. Já a segunda, acrílico, MDF, papelão e adesivos.

Figura 4.08 – Fotografia de cortadora a *laser* na Imagiton



Fonte: Acervo do autor

Figura 4.09 – Fotografia de cortadora a *laser* Multicut Konsber XN na Imagiton



Fonte: Acervo do autor

As empresas de marcenaria e artesanato representam juntas 14% das empresas consultadas. A Q'arte (2022), do ramo de artesanatos, detém duas fresadoras CNC (figura 4.10) e quatro cortadoras a *laser* (figura 4.11). A maior parte de sua produção é voltada para o ramo de artesanatos, no entanto, essa já desenvolveu componentes arquitetônicos a partir de projetos de arquitetos, como é o caso de componentes para a 'Casa do Senhor Manoel', projeto desenvolvido por professores e alunos do departamento de arquitetura e urbanismo da UFES (2022).

Figura 4.10 – Fotografia de fresadora CNC de 3 eixos na Q'arte



Fonte: Acervo do autor

Figura 4.11 – Fotografia de cortadores a *laser* na Q'arte

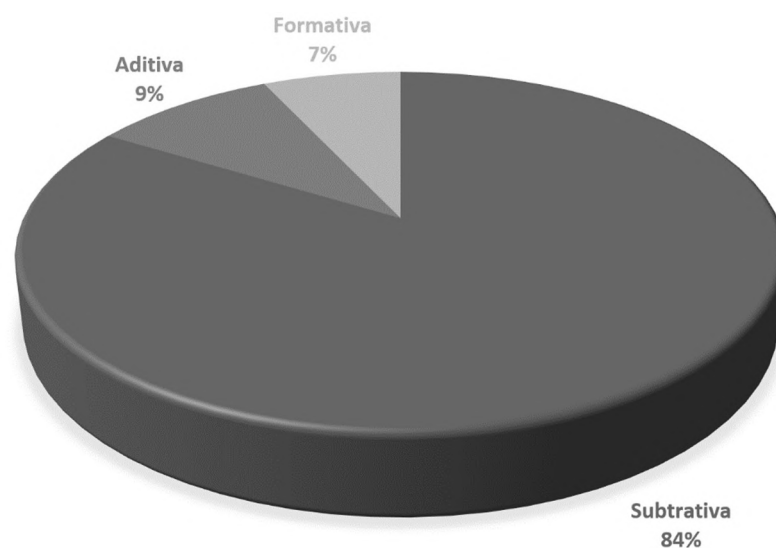
Fonte: Acervo do autor

Tanto a Imagiton como a Q'arte já elaboraram produtos para o ramo da construção civil. O proprietário da primeira, o Sr. Conrado, relata que a empresa desenvolveu inúmeros pedidos para arquitetos, sendo a maior parte dos pedidos componentes de fachadas. No caso da Q'arte, o seu proprietário desenvolveu estandes para eventos temporários que são recorrentemente solicitados, e, esculturas produzidas utilizando os equipamentos CNC.

Os resultados das tecnologias disponíveis na RMGV podem ser observados no Gráfico 4.03, sendo distinguidos a partir da classificação de Kolarevic (2001), ou seja, em subtrativa, aditiva ou conformativa. Esse gráfico considerou o total de equipamentos CAD/CAM disponíveis na RMGV (disponíveis tanto em ambientes comerciais como em institucionais), excluindo-se apenas os equipamentos de robótica. Desses, 84% são subtrativos, 9% aditivos e 7% formativos. Esse valor do total de 43 equipamentos, sem considerar os da robótica, mas somente os disponíveis tanto no comércio de serviços como nas instituições.

Para efeito de comparação, em uma pesquisa similar, quanto ao tipo de equipamento CNC predisponente na indústria do Distrito Federal ocorrida em 2010 (SILVA; BRIDGES; LIMA, 2010, p. 165), foi constatado que 62% dos equipamentos levantados eram subtrativos, 38% formativos e 0% aditivos. Isso demonstra que tanto no Distrito Federal como na Região Metropolitana da Grande Vitória os equipamentos subtrativos têm maior ocorrência do que os formativos e aditivos.

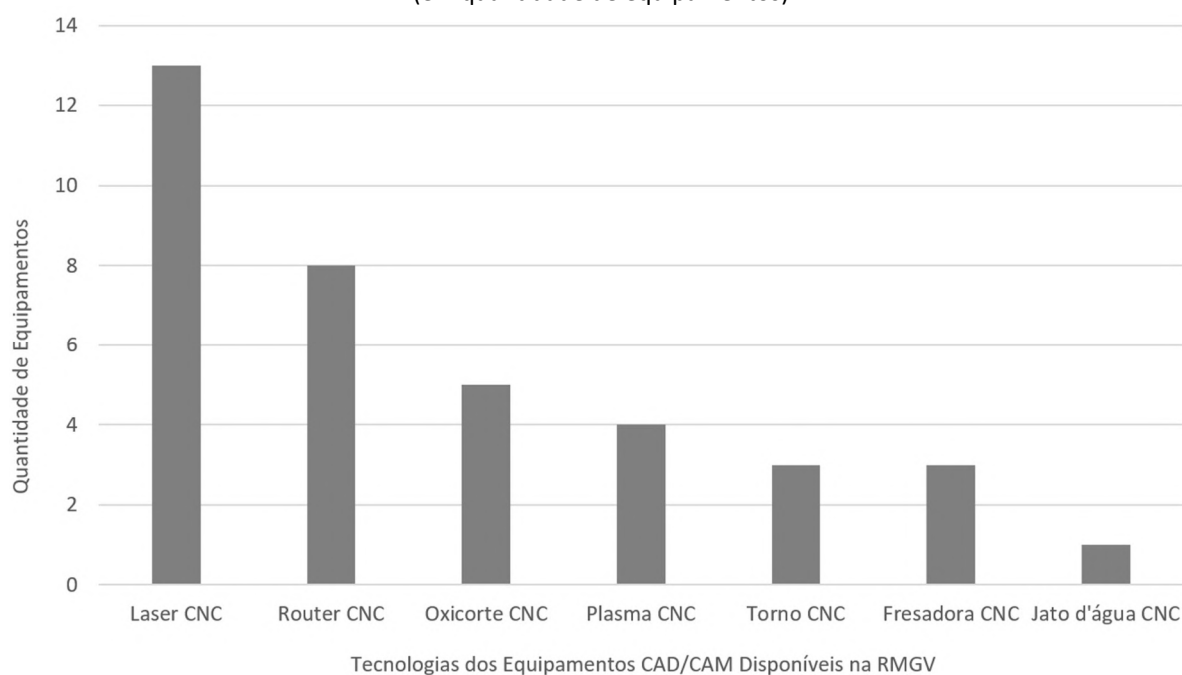
Gráfico 4.03 – Tecnologia dos equipamentos CAD/CAM disponíveis na RMGV
(em porcentagem)



Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre todos os equipamentos CAD/CAM levantados - considerando tanto os estabelecimentos comerciais como os institucionais - 37 são subtrativos (gráfico 4.04), dos quais possuem as tecnologias de corte a *laser*, *router*, plasma, oxicorte e jato d'água. Existem também os da categoria de usinagem: torno CNC. As máquinas movidas a *laser* são as mais utilizadas, 13 ao todo, seguidas pelas *routers*, com 8 unidades.

Gráfico 4.04 – Tecnologia dos equipamentos CAD/CAM subtrativos disponíveis na RMGV
- Considera estabelecimentos comerciais e institucionais -
(em quantidade de equipamentos)



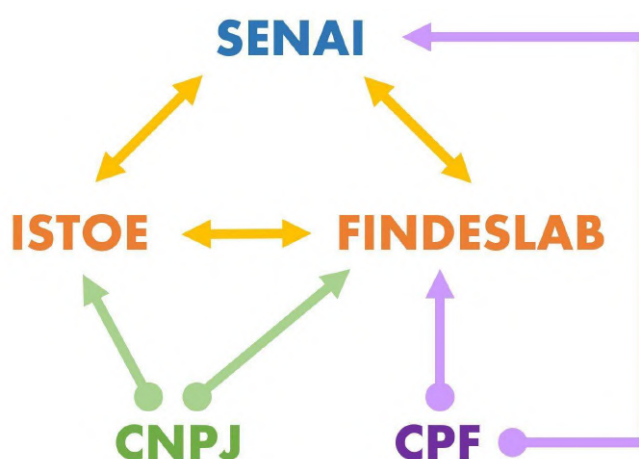
Fonte: Elaborado pelo autor

No rol das instituições contatadas, apenas uma está disponível para acesso por pessoas jurídicas: o Instituto SENAI de Tecnologia Eficiência Operacional-ISTOE (2022). A FINDESLAB (2022) se disponibiliza para pessoas físicas e jurídicas. E o SENAI (2022), campus Vitória, opera em conjunto com o ISTOE (2022), sendo localizado no mesmo campus, porém em edifícios adjacentes. No entanto, o SENAI (2022) utiliza seus equipamentos CAD/CAM apenas para o ensino de seus alunos, não disponibilizando serviços para o público externo. O SENAI campus Vitória possui em seu acervo uma fresadora CNC (figuras 4.17 e 4.18) e um torno CNC (figura 4.19).

Para tirar maior proveito do SENAI, da FINDESLAB e do ISTOE, é preciso compreender como ocorre a operabilidade entre essas instituições (figura 4.12). Caso uma pessoa física ou jurídica queira utilizar um espaço colaborativo, em um ambiente *maker*⁵⁸, o FINDESLAB (2022) se mostra disponível para a comunidade, no entanto, um contato prévio deve ser feito via e-mail em seu *website*.

É importante frisar que o FINDESLAB não está comercialmente aberto para visitas às suas instalações sem um contato prévio. No entanto, por meio de contato via e-mail, o interessado deve demonstrar um projeto com o qual deseja colaboração deste instituto. Após uma análise do projeto, uma reunião pode ser agendada para melhor esclarecer as intenções do interessado, e, para o FINDESLAB verificar se pode contribuir com o referido projeto.

Figura 4.12 – Diagrama da interoperabilidade entre instituições da RMGV



Fonte: Elaborado pelo autor

⁵⁸ Um ambiente *maker* reúne equipamentos diversos - CAD/CAM, robóticos ou mecânicos - juntamente com pessoas com conhecimentos ímpares, como profissionais de diversas áreas de conhecimento, como arquitetos, engenheiros, programadores e especialistas em automação e robótica, para a manufatura de produtos e soluções diversas.

Ressalta-se que o FINDESLAB cobra pelo uso de seu espaço, de profissionais e de matéria-prima, caso seja necessário, mas tudo isso será analisado e informado previamente aos interessados. O FINDESLAB de Vitória pode acionar outros laboratórios em todo o Brasil, caso suas instalações ou profissionais não tenham um determinado conhecimento ou equipamento.

Quanto à instituição ISTEIO (2022), essa está disponível apenas para pessoas jurídicas ou pode ser acionado diretamente pelo SENAI (2022) ou FINDESLAB (2022). Instalações e profissionais tanto do SENAI, FINDESLAB e do próprio ISTEIO podem ser contatados para colaborar com projetos em andamento neste instituto. A figura 4.13 demonstra os cinco equipamentos CAD/CAM do acervo da FINDESLAB que estão disponíveis em seu laboratório de prototipagem. Sendo esses: dois subtrativos, dois aditivos e um formativo.

Figura 4.13 – Montagem fotográfica com o acervo de equipamentos CAD/CAM da FINDESLAB



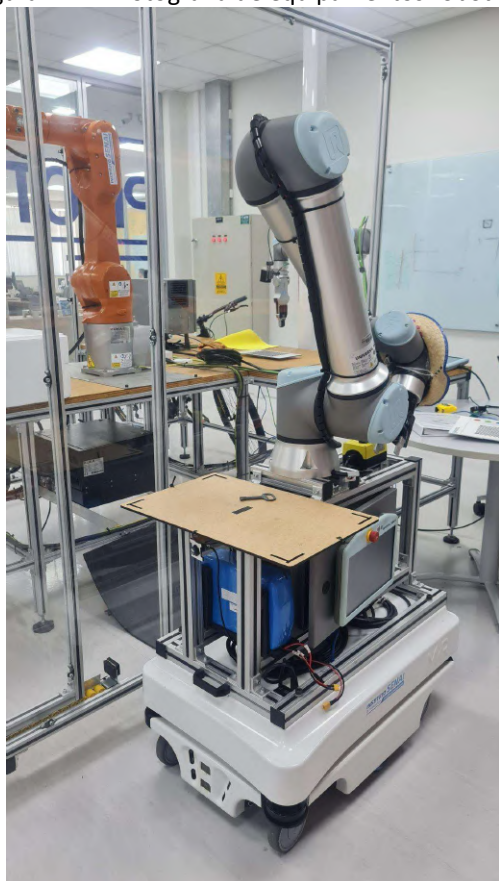
Fonte: Website da Findeslab (FINDESLAB, 2022)

O enfoque do ISTEIO é na eficiência operacional de empresas, onde profissionais de diversas áreas do saber podem colaborar para melhorar o processo produtivo de empresas, tendo um viés voltado para a engenharia de produção. As suas instalações se situam dentro do campus SENAI Vitória, é composto por salas de reunião e laboratório *maker* e é equipado com equipamentos da robótica, como por exemplo braços robóticos (figuras 4.14 e 4.15) e carros robóticos colaborativos (figura 4.14).

No que diz respeito ao SENAI (figuras 4.17, 4.18 e 4.19), este instituto é responsável tanto pelo FINDESLAB (no caso parceria entre o SENAI e a FINDES) quanto pelo ISTEIO. Apesar dos seus equipamentos serem disponíveis apenas aos seus estudantes, durante visita ao ISTEIO, foi informado que haverá um projeto de integração entre o SENAI (2022) e o ISTEIO (2022), para que possa haver colaboração entre essas instituições para permitir o uso

compartilhado de seus equipamentos e instalações, visando um melhor aproveitamento das pesquisas em andamento entre ambas as instituições.

Figura 4.14 – Fotografia de equipamentos robóticos



Fonte: Acervo do autor

Figura 4.15 – Fotografia de braço robótico no ISTEIO



Fonte: Acervo do autor

A figura 4.16 demonstra um dos equipamentos CAD/CAM disponíveis no FINDESLAB, sendo essa uma cortadora a *laser* CNC.

Figura 4.16 – Fotografia de cortadora a *laser* no FINDESLAB



Fonte: Acervo do autor

Figura 4.17 – Fotografia de fresadora CNC de metais no SENAI



Fonte: Acervo do autor

Figura 4.18 – Fotografia de produto gerado em fresadora CNC de metais no SENAI



Fonte: Acervo do autor

Figura 4.19 – Fotografia de torno CNC de metais no SENAI



Fonte: Acervo do autor

Os materiais comportados nos equipamentos tanto no comércio como nas instituições acadêmicas são diversos, o que pode ser visualizado no gráfico 4.05. A indústria metalúrgica restringe o nicho de sua atuação apenas para metais, sendo os equipamentos a corte a plasma, o que permite cortes em chapas grossas⁵⁹.

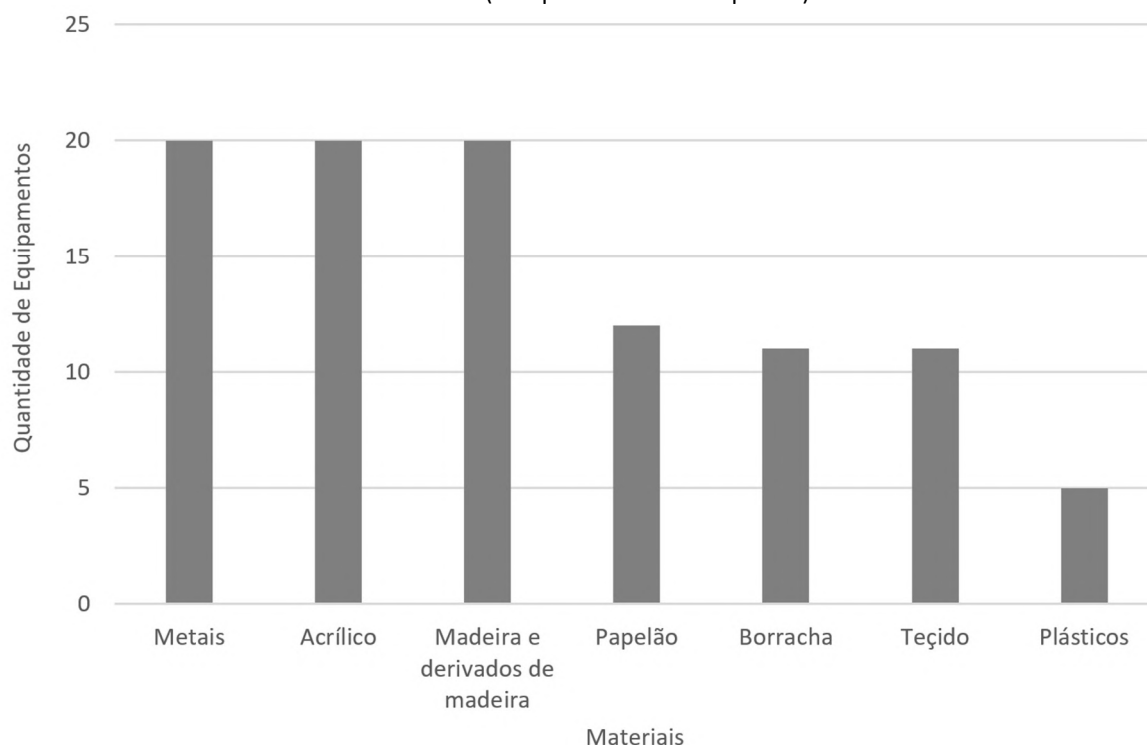
No ramo de gráficas e artesanatos, os equipamentos são todos subtrativos, os quais usa-se *routers* CNC ou cortadoras a *laser* CNC. Os materiais utilizados são variados nesse nicho de atuação, que é possível cortar, a depender do modelo do equipamento: acrílico, borracha, papelão, madeira e derivados de madeira. Em alguns desses é possível cortar também metais, sendo na grande maioria chapas mais finas do que os equipamentos a corte a plasma.

Um exemplo de equipamento versátil é a *Multicut* da *Konsberg*, da Imagiton (2022). Esse equipamento corta MDF, acrílico, papelão e adesivos, basta trocar o aparelho de corte que é mais propício a cortar um determinado material, como ilustra a figura 4.20. Nessa figura é possível observar um terminal de corte da *Multicut* que contém uma lâmina para o corte de papéis.

Tendo em vista a gama de materiais comportados desses setores comerciais, desde artigos de comunicação visual, como panfletos e letreiros, assim como objetos artesanais com o uso de acrílico, madeira e metais, a possibilidade de produção de produtos é muito versátil. Essa grande variabilidade fabril permite estender a produção desses estabelecimentos para além do nicho para o qual essas empresas foram criadas. Por exemplo, a Q'arte (2022), do ramo de artesanatos, e a Imagiton (2022), do ramo de gráfica, como mencionado anteriormente, já produziram componentes arquitetônicos estruturais, decorativos e moveleiros.

⁵⁹ São consideradas chapas grossas aquelas cujas espessuras são superiores a 6mm.

Gráfico 4.05 – Os materiais comportados dentro os equipamentos CAD/CAM aditivos e subtrativos disponíveis na RMGV (em quantidade de empresas)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.20 – Fotografia da peça final de corte de material da *Multicut* da *Konsberg*

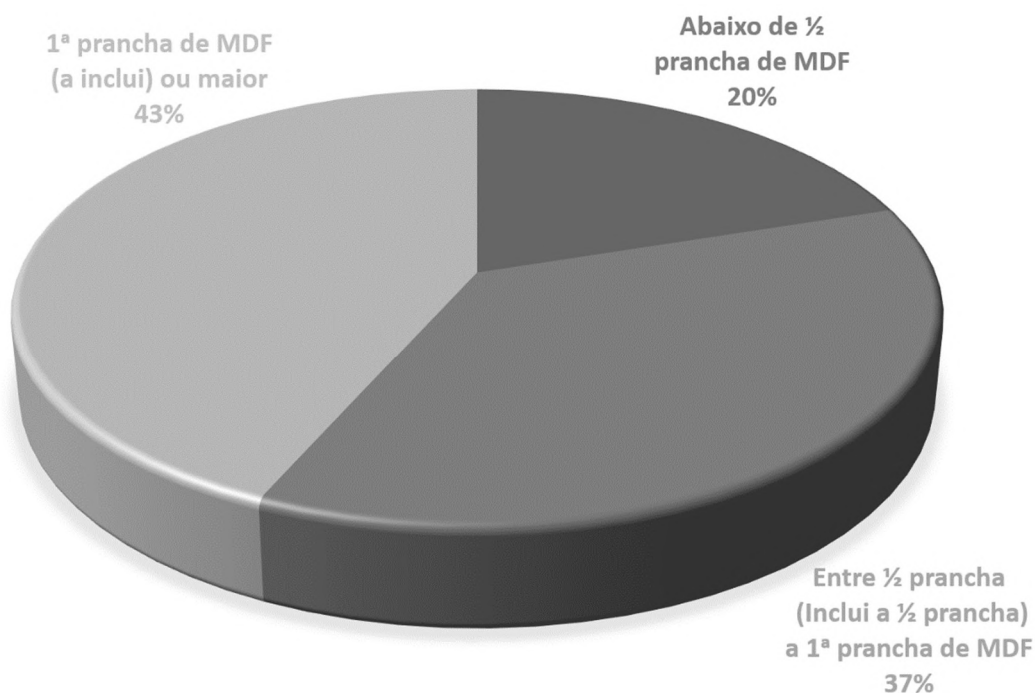


Fonte: Acervo do autor

No que diz respeito ao tamanho da área de trabalho dos equipamentos, distinguiu-se os equipamentos subtrativos dos aditivos, a saber que todos os equipamentos encontrados na RMGV subtrativos trabalham com chapas e os aditivos com adição de filamentos. Os equipamentos subtrativos atuam primordialmente com os eixos “x” e “y”, apesar da maior parte desses também atuar com o eixo “z”, mas é limitada a utilização deste último. O maior eixo “z” é o da *Multicut Konsberg*, sendo possível atingir até 17cm de altura.

Já os equipamentos aditivos exploram a percepção do eixo “z”. O gráfico 4.06 demonstra o tamanho do equipamento subtrativo, utilizando-se como referência as dimensões de uma chapa de MDF. Com isso, esse gráfico demonstra equipamentos que comportam realizar cortes ou gravações em substratos com dimensões abaixo de meia prancha de MDF, entre meia prancha a uma prancha de MDF, e, acima de uma prancha de MDF. Os resultados evidenciam que a maior parcela de equipamentos na RMGV que lidam com peças planas é formada por equipamentos de dimensões medianas, representado por 47% de equipamentos que comportam abaixo de meia chapa de MDF.

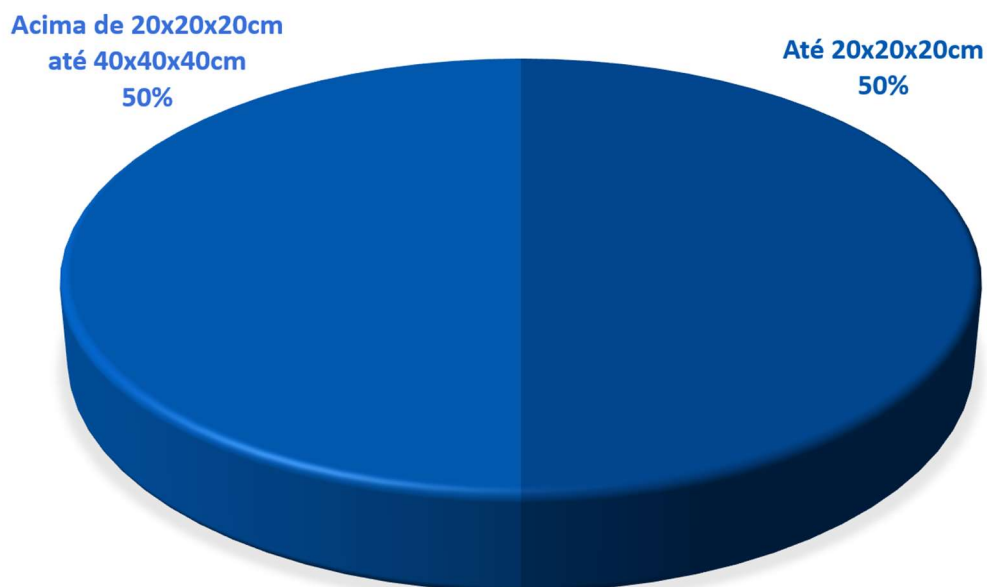
Gráfico 4.06 – Tamanho da área de trabalho dos equipamentos CAD/CAM disponíveis na RMGV
- Dentre os equipamentos que lidam com chapas -
(considerando uma prancha de MDF padrão de 1.830x2.750mm)



Fonte: Elaborado pelo autor

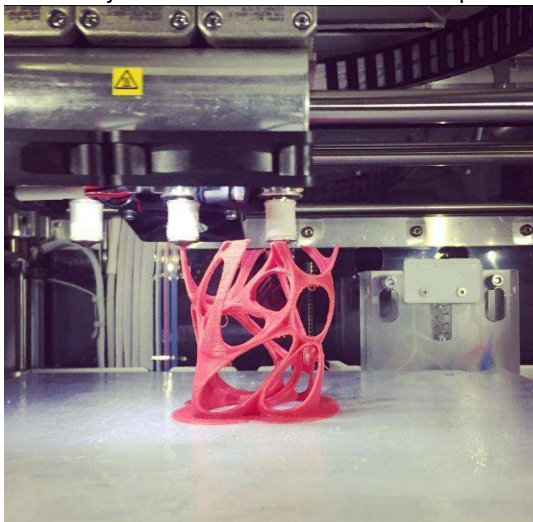
A respeito dos equipamentos aditivos, utilizou-se como parâmetro o volume da área de trabalho, onde o eixo “z” é maior do que os equipamentos subtrativos. Apesar disso, todos os equipamentos aditivos encontrados são pequenos, possuindo volume máximo de 40x40x40cm (comprimento x profundidade x altura). Esses equipamentos podem ser observados no gráfico 4.07. Já a figura 4.21 retrata o processo de fabricação de uma maquete em uma impressora-3D de adição de filamento de material plástico no PPGAU da UFES.

Gráfico 4.07 – Volume da área de trabalho dos equipamentos CAD/CAM aditivos disponíveis na RMGV
(4 ao todo: disponíveis em ambientes institucionais)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.21 – Fotografia de um objeto sendo fabricado em uma impressora-3D no PPGAU da UFES



Fonte: (CONEXÃO VIX, 2022)

Diferente das tecnologias CNC, a robótica não está presente nos diversos segmentos da área de prestação de serviços na RMGV (gráfico 4.08), apenas o ISTEIO, que detém quatro unidades de pequenas dimensões. Existem empresas no Espírito Santo (*Robotics Engenharia*; *Autvix Engenharia*) que oferecem prestação de serviços relacionados à instalação tanto de equipamentos como de sistemas de programação para empresas que procuram maximizar as suas produções ao reduzir o quadro de funcionários e otimizar o tempo despendido em suas operações com a implementação da robótica.

No entanto, essas empresas usualmente não terceirizam serviços de robótica, apenas usam esses equipamentos para colaborar em suas produções. É o caso das mineradoras, por exemplo, como a Vale e a Samarco, que exportam minérios por meio de portos navais localizados no estado.

Segundo o fundador da empresa *Robotics Engenharia* (2013), o Sr. Zenilson, há aproximadamente trinta robôs industriais em operação no estado do Espírito Santo, mas nenhum disponível ao público externo⁶⁰. Ademais, não há conhecimento de nenhum equipamento da robótica que desempenhe atividades para o setor da construção civil.

Apesar disso, o Sr. Zenilson já atuou na implementação de soluções de engenharia robótica para empresas fora do Brasil. É o caso da utilização de braços robóticos para cortar chapas de granito (figuras 4.22, 4.23 e 4.24) e manipular elementos construtivos, como telhas cerâmicas (figura 4.25) e tijolos cerâmicos (figura 4.26).

Figura 4.22 – Fotografia de braço robótico no processo de corte de chapa de granito



Fonte: (ROBOTICS ENGENHARIA, 2023)

Figura 4.23 – Fotografia de braço robótico no processo de corte de chapa de granito



Fonte: (ROBOTICS ENGENHARIA, 2023)

⁶⁰ Dados obtidos em conversa telefônica entre o pesquisador e o Sr. Zenilson, ocorrida no dia 28 de janeiro de 2023.

Figura 4.24 – Fotografia em detalhe do corte de granito



Fonte: (ROBOTICS ENGENHARIA, 2023)

Figura 4.25 – Fotografia de robô manuseando telhas



Fonte: (ROBOTICS ENGENHARIA, 2023)

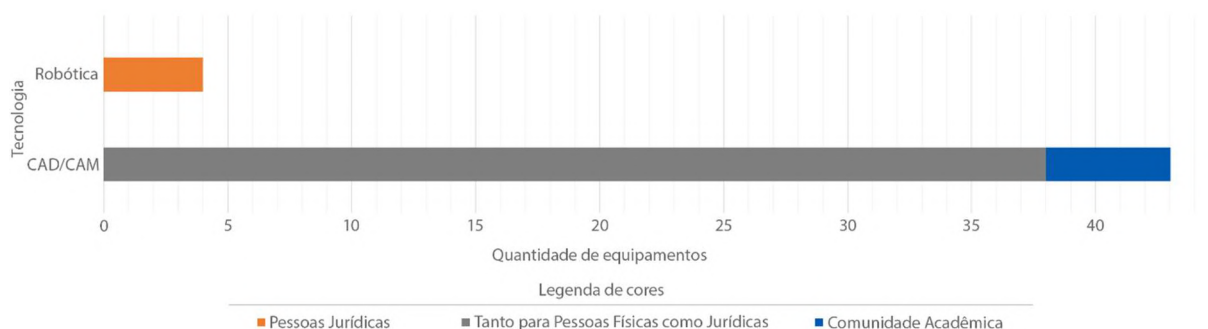
Figura 4.26 – Fotografia de braço robótico manuseando tijolos cerâmicos



Fonte: (ROBOTICS ENGENHARIA, 2023)

Como conclusão da pesquisa de campo, foram levantados 48 equipamentos CAD/CAM (com os robóticos) que estão disponíveis no comércio de serviços e nas instituições da RMGV. Desses, cinco são da robótica, cujo acesso restringe-se apenas a pessoas jurídicas, que podem ter acesso a esses por meio da colaboração com o ISTEIO (2022). Outros cinco estão restritos à comunidade acadêmica, tanto na UFES como no SENAI campus Vitória (2022). Os demais, disponíveis para o público, seja em ambientes comerciais ou acadêmicos, somam 38 unidades (gráfico 4.08).

Gráfico 4.08 – Equipamentos disponíveis na RMGV para pessoas físicas, jurídicas e comunidade acadêmica



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar dessa restrição, existe uma interoperabilidade entre as instituições acadêmicas, como ocorre entre o ISTEIO, o SENAI e a FINDESLAB, havendo colaboração para o avanço de pesquisas assim como para a produção de produtos diversos por parte da comunidade e de empresas pertencentes à RMGV.

O laboratório da FINDESLAB está constantemente permitindo o acesso tanto de empresas como pessoas físicas com interesse no desenvolvimento de produtos diferenciados, que poderiam ser otimizados pelo ambiente *maker*, sendo este auxiliado por tecnologias de última geração. Esses espaços multiprofissionais colaborativos são tendência em todo o mundo.

A palestra ministrada pela professora Gabriela Celani⁶¹ no Graphica 2022 (2022) ressaltou como os laboratórios de departamentos diversos em ambientes acadêmicos estão unindo-se em um único espaço de modo a compartilhar o saber de áreas diversas. Desse modo, tanto os equipamentos como os intelectos de áreas distintas podem ser mais bem aproveitados em projetos diversos, no que são chamados de ambientes *fab-lab* ou *maker*. O programador pode atuar com a equipe da robótica para solucionar demandas da construção civil, por exemplo.

Essa interoperabilidade entre instituições, empresas, intelectuais, equipamentos, tecnologia CAD/CAM e robótica são tendência global e estão acessíveis para a comunidade capixaba. Portanto, é preciso incentivar essa interoperabilidade e o conhecimento a respeito dos meios de produção para otimizar o potencial arquitetônico que a fabricação digital permite à produção de componentes arquitetônicos.

A UFES, por exemplo, desenvolveu a fabricação digital com o projeto da ‘Casa do Senhor Manoel’, onde um protótipo (figura 4.27) foi fabricado com estudantes tanto no laboratório Conexão VIX como no FINDESLAB, que posteriormente foi fabricado em escala real em OSB, utilizando *routers* CNC na Q’arte.

Como apresentado anteriormente, o comércio e as instituições estão equipados com equipamentos digitais e em busca por inovação, tornando possível uma mudança de paradigma.

⁶¹ Arquiteta e Urbanista, mestre pela USP e doutora pelo MIT. Fundou o Laboratório de Prototipagem e Automação para Arquitetura e Construção (LAPAC) da Universidade Estadual de Campinas, onde é professora (LATTES, 2023).

Figura 4.27 – Fotografia de componentes do protótipo da ‘Casa do Senhor Manoel’, projeto desenvolvido por professores e alunos do PPGAU da UFES



Fonte: (CONEXÃO VIX, 2022)

Na área da construção civil, os projetistas têm executado na RMGV, entre outros, estruturas metálicas, fachadas em alumínio composto (ACM), cobogós, painéis, portas, pergolados (figura 4.28), esculturas (figura 3.29), mobiliário e elementos decorativos com os equipamentos CAD/CAM disponíveis na região.

Figura 4.28 – Fotografia de pergolado na RMGV recortado em cortadora CNC a *laser*



Fonte: (EXCLUSIVA LASER, 2023)

Figura 4.29 – Fotografia de escultura em aço na RMGV



Fonte: Acervo do autor

A decoradora Vivyan Modesto projetou para a CASACOR ES 2022 luminárias externas que se assemelham a pétalas (figuras 4.30 e 4.31). Essas luminárias foram recortadas por meio de equipamento a *laser* pela empresa Tungstek do Brasil.

Figura 4.30 – Fotografia da CASACOR ES 2022-luminárias recortadas em CNC *laser cutter*



Fonte: (COELHO, 2022)

Figura 4.31 – Fotografia da CASACOR ES 2022-luminárias executadas pela Tungstek



Fonte: (TUNGSTEK-INSTAGRAM, 2022)

A Tungstek já executou painel decorativo (figura 4.32) e porta (figura 4.33) em aço. A porta feita para a Igreja Católica de Porto Canoa (figura 4.33), localizada no município de Serra, possui na fachada frontal da edificação uma chapa com dizeres bíblicos recortados em cortadora a *laser*.

Figura 4.32 – Fotografia de painel da CASACOR ES 2019 executado pela Tungstek



Fonte: (TUNGSTEK-INSTAGRAM, 2022)

Figura 4.33 – Fotografia da porta da Igreja Católica de Porto Canoa, Serra, ES, executada pela Tungstek



Fonte: Acervo do autor

5. CONCLUSÃO

A partir da pesquisa bibliográfica, foi possível verificar o grande potencial que as tecnologias vinculadas à fabricação digital possuem no processo de produção de casas. Inúmeras empresas em todo o mundo estão investindo em tecnologias digitais para a fabricação de habitações que sejam ecologicamente corretas, com menos desperdício de material e com maior otimização da logística de construção como um todo. No entanto, deve-se ter o cuidado para aproveitar ao máximo o potencial dos equipamentos relacionados à fabricação digital, fazendo com que o resultado positivo disto seja a possibilidade da customização em massa, a fim de satisfazer as necessidades dos usuários.

É preciso tirar partido deste preceito, principalmente em conjuntos habitacionais de baixo custo, onde exista a demanda por muitas residências, de modo a explorar a variabilidade formal das arquiteturas, associando técnicas construtivas que utilizam a fabricação digital integradas aos processos de projetos digitais. Os equipamentos CAD/CAM, apesar de existirem na indústria no Brasil, ainda permanecem restritos e pouco difundidos, inclusive quanto aos seus respectivos usos na arquitetura, especialmente para a fabricação de casas. Além disso, o projeto de arquitetura deveria explorar melhor as possibilidades encontradas nas soluções técnicas da área de fabricação digital, o que é devido principalmente pela ausência de profissionais e de técnicos qualificados nesse setor.

Os equipamentos vinculados à tecnologia CAD/CAM estão presentes no Brasil, mas o seu uso para a fabricação de residências ainda é pouco explorado. A RMGV é um exemplo disso, onde foi possível encontrar nessa região *routers* CNC, braços robóticos, tornos CNC mecânico, cortadoras a plasma, *laser*, oxicorte e jato d'água CNC, dobradeiras de aço CNC, fresadora CNC, assim como impressoras 3D.

Todos esses equipamentos podem ser utilizados por meio de projetos que contemplem o uso da fabricação digital para a manufatura de arquitetura, mas essa ocorrência ainda é muito baixa, haja vista o potencial tecnológico ofertado na RMGV. Além disso, o setor industrial e comercial detentor dessas tecnologias pouco sabe a respeito do seu emprego para a fabricação de arquitetura, sendo essa realidade constatada em conversas com empresários e funcionários das empresas contatadas.

Diante do exposto, podemos deduzir que a demanda gerada por profissionais da área da construção precisa ser mais bem explorada no âmbito da produção digital na arquitetura,

mediante o fomento do conhecimento a respeito da fabricação digital, principalmente para profissionais e acadêmicos da área da construção civil.

Deve ser frisado que há um potencial de incentivo ao uso dessas tecnologias no âmbito do comércio e da indústria, como se verifica com a implantação do FINDESLAB na RMGV, sendo o primeiro laboratório *maker* a ser montado pela FINDES/SENAI no Brasil.

Contudo, no âmbito educacional, dentre as sete instituições da RMGV que oferecem o curso de bacharelado em arquitetura e urbanismo, apenas uma detém equipamentos de fabricação digital, que dão indícios da necessidade de maiores investimentos.

A respeito dos projetos auxiliados pela computação, por meio da utilização de softwares generativos, é possível, ao realizar a customização em massa, criar variações formais, reduzir os custos, promover a sustentabilidade e, principalmente, atender às demandas do usuário. Nesse sentido, o projeto de arquitetura exerce papel protagonista para que isso ocorra. Por isso a importância da atuação dos profissionais da área da construção como agentes fomentadores dessa mudança de paradigma.

A respeito da hipótese inicial de pesquisa, é possível constatar a oferta de equipamentos CAD/CAM nas indústrias brasileiras, como afirmam Simon (2001), Silva et al. (2009) e Silva, Bridges e Lima (2010). Estes equipamentos estão disponíveis ao público, como observou-se no comércio de prestação de serviços na RMGV, a exemplo das empresas do ramo de metalurgia, comunicação visual, artesanato e marcenaria; além de verificar a existência em ambientes institucionais e acadêmicos. Ao todo, foram contabilizados 47 equipamentos do rol da fabricação digital que estão acessíveis aos projetistas nessa região, sendo 33⁶² apenas no comércio de prestação de serviços e 14 em ambientes institucionais⁶³.

A maior parcela das empresas que prestam esses serviços na RMGV está na região de Serra (8), seguido por Cariacica (4). A respeito do ramo de atuação dessas empresas, 53% são do ramo de metalurgia, 33% de comunicação visual, 7% de marcenaria e outros 7% de artesanato. Os equipamentos de subtração são a grande maioria, representando 84% do total dentre os subtrativos. Desses subtrativos, 43% comportam placas maiores ou igual a uma placa de MDF, 37% entre meia placa e uma inteira, e, 20% abaixo de meia placa.

⁶² O equipamento 2 em 1 (oxicorte ou plasma) de corte CNC da Cemaço foi considerado como uma unidade, exceto no gráfico 4.04, onde foi considerado os tipos de corte separadamente.

⁶³ Este é o número da amostra levantado na pesquisa de campo, podendo ser maior em empresas que não divulgam serviços diversos com equipamentos CAD/CAM, ou, naquelas que não se predispuseram a colaborar com a pesquisa.

Os materiais comportados nestes equipamentos são diversos, sendo metais e madeira em geral, assim como acrílico, os mais recorrentes. Dessa forma, conclui-se que há tecnologias disponíveis para a produção da arquitetura por meio de equipamentos digitais na RMGV, sendo necessário estimular a sua inserção no planejamento. Embora os equipamentos possuam porte médio, ainda assim é possível gerar partes ou componentes que possam contribuir para uma produção de arquitetura customizada por meio de recursos digitais, a exemplo do que foi apresentado na pesquisa de Rocha e Celani (2010) e no projeto do escritório SUBdV (2020).

Portanto, será necessário produzir projetos geradores de demanda pelo uso daqueles equipamentos. Entende-se que, ao desenvolver esta cultura, gradativamente teremos uma nova percepção da sociedade sobre a potencialidade desses recursos reverberando em uma nova produção arquitetônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAPA MOULDS. **Adapa Moulds**, 2023. Disponível em: <<https://adapamoulds.com/>>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- AGENCIA. Issue 2: Interview with Isaac Michan by Gabriel Esquivel. Disponível em: <<https://www.agencia-arq.com/contenido-content/issue-2-interview-with-isaac-michan-by-gabriel-esquivel>>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- AGOSTINHO, O. L.; MASTRELLI, N. C.; SIMON, A. T. Influências das técnicas de pré-ajustagem de ferramentas na utilização de tecnologia CNC no Brasil. In: **XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Curitiba, 2002.
- AI SPACE FACTORY. Projeto 'Tera'. **AI Space Factory**. Disponível em: <<https://www.aispacefactory.com/tera>>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- ALARCÓN, Luis (ed.). **Lean Construction**. Nova Iorque: Taylor e Francis, 1997.
- APOLINARSKA, Aleksandra Anna; BÄRTSCHI, Ralph; FURRER, Reto; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Mastering the "Sequential Roof". ADRIAENSSENS, Sigrid; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias; MENGES, Achim; PAULY, Mark (edit.). In: **Advances in Architectural Geometry 2016**, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, p. 240-258, 2016.
- APOLINARSKA, Aleksandra Anna; KNAUSS, Michael; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. The Sequential Roof. MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (ed.). In: **Advanced Wood Architecture: a computational approach**, Londres: Routledge, p. 45-57, 2017.
- APOLINARSKA, Aleksandra Anna et al. Robotic assembly of timber joints using reinforcement learning. In: **Automation in Construction**, v. 125, p. 103569, 2021.
- ALMEIDA, Lucas Gomes et al. Estudo das vantagens na aquisição de um CNC de plasma. In: **Humanidades e Tecnologia (FINOM)**, v. 22, n. 1, p. 219-232, 2020.
- AMORIM, S.; MELLO, L. C. O subsector de edificações da construção civil no Brasil: uma análise comparativa em relação à União Europeia e aos Estados Unidos. In: **Produção**, v. 9, n. 2, 2009.
- ARCELORMITTAL. ArcelorMittal Tubarão. **ArcelorMittal**, 2023. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/a-arcelormittal/quem-somos/arcelormittal-tubarao#construcao-civil>>. Acesso em: 31 jan. 2023.
- ARCHDAILY. **TECLA Technology and clay 3D Printed House / Mario Cucinella Architects**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/960714/tecla-technology-and-clay-3d-printed-house-mario-cucinella-architects>>. Acesso em: 9 dez. 2021.
- AUTVIX ENGENHARIA. **Autvix Engenharia**, 2023. Disponível em: <<https://autvix.com.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- BORGES, Marina Ferreira. A Fabricação Digital e o Papel da Arquitetura para uma Mudança de Paradigma Tecno-Econômico no Setor da Construção Civil, p. 290-296. In: **XX Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital**, Blucher Design Proceedings, São Paulo: Blucher, v.3, n. 1, 2016. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/despro-sigradi2016-356.
- BRANDÃO, D. Q. Disposições Técnicas e Diretrizes Para Projeto de Habitações Sociais Evolutivas. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 73-96, abr./jun., 2011.
- BRASIL, Alexander Lopes de Aquino; FRANCO, Juarez Moara Santos. Customizing Mass Housing in Brazil: Introduction to an Integrated System. In: SOUSA, José Pedro; HENRIQUES, Gonçalo Castro; XAVIER, João Pedro (eds.). **Proceedings of 37 eCAADe and XXIII SIGraDi Joint Conference, Architecture in the Age of the 4Th Industrial Revolution, Porto 2019**, p. 605-612, 2019. São Paulo: Blucher, 2019. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/proceedings-eaadesigradi2019_202.
- BROWN, Tim et al. Design Thinking. In: **Harvard Business Review**, v. 86, n. 6, p. 84, 2008.

BUSWELL, Richard A. et al. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. In: **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37-49, 2018.

CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. In: **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, ed. 2, p. 287-300, Science Direct, 2020.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Casa Verde e Amarela. **Caixa Econômica Federal**, 2023. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/voce/habitacao/casa-verde-e-amarela/urbana/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 4 jan. 2023.

CANEPARO, L. **Digital fabrication in architecture, engineering and construction**. Springer, 2014.

CARLOTA, V. **A 3D printed and recycled wood cabin**. 3D Natives, 2020. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-and-recycled-wood-cabin-140520205/#!>>. Acesso em: 18 nov. 2021.

CARNEIRO, Ádila Klicie Perez et al. Projeto integrador: processo de fabricação de arruelas em torno mecânico e torno CNC mecânico. In: **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 2, n. 2, 2017.

CASACOR SÃO PAULO. **CASACOR São Paulo**, 2022. Disponível em: <<https://casacor.abril.com.br/mostras/sao-paulo/>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

CASA DO SERRALHEIRO. **Casa do Serralheiro**, 2022. Disponível em: <<https://casaserralheiro.com.br/>>. Acesso em: 23 out. 2022.

CASA G. Casa Geradora para o Rio Grande do Sul. **Casa G**, 2010. Porto Alegre: PVE Capes - PROPAR UFRGS. Acesso em: 28 jan. 2023. Disponível em: <<https://casagenerativa.blogspot.com/>>.

CELANI, Gabriela; VAZ, Carlos; PUPO, Regiane. Sistemas generativos de projeto: classificação e reflexão sob o ponto de vista da representação e dos meios de produção. In: **Revista Brasileira de Expressão Gráfica**, v. 1, n. 1, 2013.

CEMAÇO. **Cemaço**, 2023. Disponível em: <<http://www.cemacobr.com.br/#produtos>>. Acesso em: 31 jan. 2023.

CHAI, Hua et al. Computational design and on-site mobile robotic construction of an adaptive reinforcement beam network for cross-laminated timber slab panels. In: **Automation in Construction**, v. 142, p. 104536, 2022.

CHIUSOLI, Alberto. TECLA - A 3D printed global habitat for sustainable living. **WASP**, 2021. Disponível em: <<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>>. Acesso em: 18 nov. 2021.

COBLOGÓ/SUBDV. **ArchDaily Brasil**, 24 jul. 2020, ISSN 0719-8906. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

COELHO, Yeska. Beach club urbano não esquece raízes “pé na areia” e se destaca na CASACOR. **CASACOR**, 24 nov. 2022. Disponível em: <<https://casacor.abril.com.br/ambientes/beach-club-urbano-raizes-pe-na-areia-casacor/>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

COMDEVIT. **Conselho Metropolitano de Desenvolvimento da Grande Vitória**, 2023. Disponível em: <<https://planometropolitano.es.gov.br/comdevit>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

COSTA, Eduardo; SEPHERD, Paul; VELASCO, Rodrigo; HUDSON, Roland. Automating Concrete Construction: Sustainable Social Housing in Columbia. In: **Congresso SIGraDI 2020**, Medellín: SIGraDI, p. 254-259, 2020.

COSTA, Heliara; FABRÍCIO, Márcio. Diversidade em Série: Processo de projeto e tecnologias físico-digitais para customização de moradias. In: **Caderno de Resumos do 7º Seminário de Acompanhamento do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo IAU USP**, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2020.

DUARTE, José P. A discursive grammar for customizing mass housing: the case of Siza's houses at Malagueira. In: **Automation in construction**, v. 14, n. 2, p. 265-275, 2005.

DUNN, Nick. **Digital Fabrication in Architecture**. Londres: Laurence King Publishing, 2012.

DUS ARCHITECTS. Disponível em: <<https://houseofdus.com/work/#project-urban-cabin>>. **DUS Architects**. Acesso em: 18 dez. 2021.

E-MEC. Cadastro Nacional de Cursos e Instituições de Curso Superior. **Ministério da Educação**, 2022. Disponível em: <emec.mec.gov.br>. Acesso em: 1 out. 2022.

ESTÚDIO GUTO REQUENA. **Estúdio Guto Requena**, 2022. Disponível em: <<https://gutorequena.com/casaconectada/>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

FAESA. **FAESA**, 2022. Disponível em: <<https://www.faesa.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

FINAC. **Faculdade Nacional**, 2022. Disponível em: <<https://unisales.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

FINDESLAB. **FINDESLAB**, 2022. Disponível em: <www.findeslab.com.br>. Acesso em: 1 out. 2022.

FISCHER, T.; HERR, C. M. Teaching generative design. In: **Proceedings of the 4th International Generative Art Conference**, Milão: Ed. SODDU, 2001. Disponível em: <<http://www.generativeart.com>>. Acesso em: 10 abr. 2004.

FREARSON, Amy. DUS Architects builds 3D-printed micro home in Amsterdam. **Dezeen**, 2016. Disponível em: <<https://www.dezeen.com/2016/08/30/dus-architects-3d-printed-micro-home-amsterdam-cabin-bathtub/>>. Acesso em: 9 dez. 2021.

GIBSON, Lorna J; ASHBY, Michael F. Cellular solids: structure and properties. **Press Syndicate of the University of Cambridge**, Cambridge, Reino Unido, p. 175-231, 1997.

GIL, C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3ª Ed. São Paulo: Atlas, 1993.

GORONCI. **Goronci Metalúrgica**, 2022. Disponível em: <www.metalurgicagoronci.com.br>. Acesso em: 28 set. 2022.

GOUVÊA, L. A. C. **Habitação popular no Brasil: uma história de exclusão, segregação e construção de ocas, senzalas, casas e apartamentos**. 1ª Ed. São Paulo: Annablume Geografias, 2016.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale**. John Wiley and Sons, 2014.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. **Digital materiality in architecture**. Lars Müller Publishers, 2008.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. The Programmed Wall. **Gramazio Kohler Research**, 2006. Disponível em: <<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/81.html>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

GRAPHICA 2022. **XIV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design**. 7 a 11 nov. 2022. Palestra da Gabriela Celani ocorrida no dia 8 nov. 2022.

GRIZ, C.; QUEIROZ, N.; NOME, C. **Edificação Modular: Estudo de caso e protótipo de um sistema construtivo de código aberto utilizando prototipagem rápida**, p. 261-268. Em: São Paulo: Blucher, 2017. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2017-042. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/edificao-modular-estudo-de-caso-e-prottipo-de-um-sistema-construtivo-de-cdigo-aberto-utilizando-prototipagem-rpida-27637>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

HACK, Norman; LAUER, Willi Viktor; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias; LANGENBERG, Silke. **Mesh-mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement**. Wiley, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/261702089_Mesh-Mould_Robotically_Fabricated_Spatial_Meshes_as_Reinforced_Concrete_Formwork>. Acesso em: 26 jan. 2022.

HANNAH. Hannah-Work-Ashen. Ithaca: **Hannah Design Office LLC**, 2021. Disponível em: <<https://www.hannah-office.org/work/ashen>>. Acesso em: 9 dez. 2021.

HENRIQUES, Gonçalo Castro; ESTEVES, Luís Pedro. Novos processos de construção em arquitetura. In: **Arquitextos**, Vitruvius, ISSN 1809-6298, 2005. Disponível em: <<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/05.060/460>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

HOSSAIN, Md Aslam et al. A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market. In: **Sustainability**, v. 12, n. 20, p. 8492, 2020.

IJSN. **Déficit Habitacional no Espírito Santo com base no Cadúnico**. Vitória: Instituto Jones dos Santos Neves, 2019. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/artigos/5498-deficit-habitacional-no-espirito-santo-com-base-no-cadunico-2019>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

IMAGITON. **Imagiton**, 2022. Disponível em: <https://imagiton.com.br/>. Acesso em: 22 out. 2022.

ISSA, Rajaa. **Essential Mathematics for Computational Design**. 3a Ed. Robert McNeel and Associates, 2013. Disponível em: <https://math.okstate.edu/people/segerman/4423/EssentialMathematicsForComputationalDesign_ThirdEdition_rev3.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

ISTEO. **Instituto Senai de Tecnologia em Eficiência Operacional**, 2022. Disponível em: <www.senaies.com.br/isteo/>. Acesso em: 1 de out. 2022.

KAISER, Alex; LARSSON, Magnus; GIRHAMMAR, Ulf Arner. From file to factory: Innovative design solutions for multi-storey timber buildings applied to project Zemblra in Kalmar, Sweden. In: **Frontiers of Architectural Research**, v.8, 2019.

KALO, Ammar; NEWSUM, Michael Jake. An Investigation of Robotic Incremental Sheet Metal Forming as a Method for Prototyping Parametric Architectural Skins. MCGEE, Wes; LEON, Monica Ponce (ed.). In: **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014**, Springer, 2014.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. Nova Iorque e Londres: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, Branko. **Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age**. ACADIA, 2001. Disponível em: <<http://cuminad.scix.net/data/works/att/81b8.content.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. In: **Automation in Construction**, v. 13, Elsevier, p. 5-19, 2004.

KUKA. **KUKA Robots**, 2023. Disponível em: <<https://www.kuka.com/pt-br/produtos-serviços/sistemas-de-robo/robo-industriais/kr-iontec>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

LABONNOTE, Nathalie et al. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. In: **Automation in Construction**, v. 72, p. 347-366, 2016.

LATTES. **Lattes-CNPq**, 2023. Busca: "Gabriela Celani" na base de dados de currículo Lattes-CNPq. Acesso em: 17 fev. 2023.

LEUNG, P. Y. V.; POLINARSKA, A. A.; TANADINE, D.; GRMAZIO, F.; KOHLER, M. Automatic assembly of jointed timber structure using distributed robotic clamps. In: GLOBA; A.; VAN AMEIJDE, J.; FINGRUT, N.; KIM, T.T.S. (eds.). **PROJECTIONS: Proceedings of the 26th CAADRIA Conference**, v. 1, Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong and Online, 29 mar. a 1 abr., p. 583-592, 2021.

LIMA, Erasmo et al. Corte a Plasma. **Revista da Soldagem - ABS - Associação Brasileira de Soldagem**. Disponível em: <https://tobias mugge.files.wordpress.com/2008/10/sup_3_artigo_corte_plasma.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2023.

LORES, Raul Juste. Maluf, BNH e habitação popular. **Folha de São Paulo**, 2012. Disponível em: <<http://rauljustelores.blogfolha.uol.com.br/2012/06/20/maluf-bnh-e-habitacao-popular/>>. Acesso em: 18 nov. 2021.

MARBLE, Scott (ed.). **Digital Workflows in Architecture**: Designing Design-Designing Assembly-Designing Industry. Suíça: Birkhäuser, Basel, 2012.

MARIJNISSEN, Marjolein; ZEE, Aant Van der. 3D Concrete Printing in Architecture: a research on the potential benefits of 3D Concrete Printing in Architecture. In: **Material Studies Methodology**, v. 2. eCAADe 35, 2017.

MARTINO, J. A; ROSA, N. C. P. Crescimento orientado por regras: um estudo de caso aplicado na implantação de edifícios. In: **Anais GRAPHICA 2019 – XIII International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design**, Rio de Janeiro, 24 a 27 set., 2019. Disponível em: <http://www.graphica2019.org/assets/doc/Anais_Graphica_2019.pdf>.

MARTINO, J. A. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade, 2015.

MENDES, L. T. **Personalização de Habitação de Interesse Social no Brasil**: o caso da implantação urbana em conjuntos habitacionais. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade, 2014.

MENDONÇA, D.; PASSARO, A.; HENRIQUES, G. C. Wikihouse: A generative and parametric tool to customize curved geometries. In: **Sigradi 2018**: Technopolíticas, 2018.

METAL ONE. **Metal One**, 2022. Disponível em: <<https://metalone.ind.br/>>. Acesso em: 23 out. 2022.

MITCHELL, W. J. The Theoretical Foundation of Computer-aided Design. In: **Environment and Planning B**, v. 2, p. 127-150, 1975.

MOTTA, S. R. F.; AGUILAR, M. T. P. Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 1, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.4237/gtp.v4i1.79>>.

MUELLER, Robert P. et al. NASA centennial challenge: three dimensional (3D) printed habitat, phase 3. In: **70th International Astronautical Congress (IAC)**, 2019.

MULTIVIX. **MULTIVIX**, 2022. Disponível em: <<https://multivix.edu.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

NARDELI, E.; BACKHEUSER, L. A. Sistema Wikihouse aplicado ao programa Minha Casa Minha Vida. In: **SIGraDI 2016**: Proceedings of the 20th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, p. 297-304, 2016. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2016_461.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2021.

NASA. 3D-Printed Habitat Challenge. **NASA**, 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/index.html>. 12 jan. 2021. Acesso em: 9 jan. 2023.

NOVÁKOVÁ, K.; VELE, J. Prvok: an experiment with 3D printing large double curved concrete structure. In: **Towards a new, configurable architecture**: Proceedings of the 39th eCAADe Conference. Novi Sad, University of Novi Sad, v. 2, p. 137-144, 2021.

OOSTERHUIS, A. et al. **File to Factory and Real Time Behavior in Architecture**. ACADIA, 2004. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/2015%20+dave=2:/Show?acadia04_294>. Acesso em: 29 out. 2021.

OXMAN, R. **Informed tectonics in material-based design**. ELSEVIER LTD., 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/2130797/Oxman_Rivka_2012_Informed_Tectonics_in_Material-based_Design_The_International_Journal_of_Design_Studies>. Acesso em: 7 set. 2021.

OXMAN, N. Get Real: Towards Performance Driven Computational Geometry. In: **International Journal of Architectural Computing**, 4(5), p. 663-684, 2007.

PAOLETTI, Ingrid. Mass Customization in the Era of Industry 4.0: Towards Immaterial Building Technology. In: Hemmerling, M., Cocchiarella, L. (ed.). **Informed Architecture: Computational Strategies in Architectural Design**, Suíça: Springer, 2018.

PASSARO, A.; ROHDE, C. Casa Revista: Arquitetura de fonte aberta. **Gestão e Tecnologias de Projetos**, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 25-41, 2016. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/114437>>. Acesso em: 3 dez. 2022.

PAX ARQUITETURA. **PAX Arquitetura**, 2022. Disponível em: <<https://www.pax.arq.br/arquitetura>>. Acesso em: 19 dez. 2022.

PERINI, A. S. Sustentabilidade na etapa de construção. **Unyleya**, Brasília, 2017.

PINE, B. J. **Mass customization**: The new frontier in business competition. Boston: Harvard Business School Press, 1992.

PIRES, Julio Cesar Pinheiro; CENCI, Laline Elisangela; NETO, Olavo Avalone. Construção automatizada em blocos cerâmicos: do processo paramétrico à aplicação robótica. In: **PIXO-Revista de Arquitetura, Cidade e Contemporaneidade**, v. 5, n. 17, 2021.

PITÁGORAS. **Pitágoras**, 2022. Disponível em: <<https://www.pitagoras.com.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

PRVOK. **Prvok**, 2021. Disponível em: <<https://www.prvokodburinky.cz/en>>. Acesso em: 9 dez. 2021.

PUPO, R. **Inserção da PROTOTIPAGEM e FABRICAÇÃO DIGITAIS no processo de projeto**: um novo desafio para o ensino de arquitetura. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, 2009.

Q'ARTE. **Q'arte**, 2022. Disponível em: <<https://www.instagram.com/qarteartesanato/?hl=en>>. Acesso em: 22 out. 2022.

RAUSCH, M. L. **Henry Ford y el automóvil modelo T**. Milwaukee: Weekly Reader, 2007.

REZENDE, Adalberto; SOUZA, Hellen. VII inventário do parque de máquinas para corte e conformação de metais. In: **Corte e Conformação de Metais**, Aranda, Ano XII, n. 140, 2016. Disponível em: <<https://www.arandanet.com.br/assets/revistas/ccm/2016/dezembro/index.php#page=12>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

ROBOTICS ENGENHARIA. **Robotics Engenharia**, 2023. Disponível em: <<http://roboticsengenharia.com.br/>>. Acesso em: 28 jan. 2023.

ROCHA, Bruno Massara; ALVARENGA, Augusto; BOLSSONI, Gabriela. Open-Source Social Housing Architecture: Wikihouse "Sr. Manoel". In: **Sigradi 2021**: projetando possibilidades, conferência ubíqua, 2021. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1U1oKzUxUhu0IlxmvCKgssK93hZTPdQzE/view?pli=1>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

ROCHA, Danilo; CELANI, Gabriela. Fabricação Digital de fôrmas de concreto: um exercício de projeto. **XVIII Congresso de Iniciação Científica da Unicamp**, 22-23 de setembro de 2010. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xviii-congresso/paineis/060033.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

ROMAN, M. C. et al. From 3D-Printing Lunar and Mars Habitats to Affordable Sustainable Housing on Earth. In: **50th International Conference on Environmental Systems**, Lisboa, Portugal, 12-16 jul., 2020.

ROMI S.A. Torno CNC Centur. **ROMI S.A.**, 2023. Disponível em <<https://www.romi.com/produtos/tornos-cnc-romi-centur/>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

SASS, Lawrence; BOTHA, Marcel. The instant house: a model of design production with digital fabrication. In: **International Journal of Architectural Computing**, v. 4, n. 4, p. 109-123, 2006.

SASS, Lawrence. A Digitally Fabricated House for New Orleans. In: **AIA Report on University Research**, Nova Iorque, v. 4, 2008.

SCHUMACHER, Patrick. Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. In: **AD Architectural Design-Digital Cities**, v. 79, n° 4, 2009.

SCHWINN, Tobias. Landesgartenschau Exhibition Hall. MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, Oliver David (eds.). In: **Advanced Wood Architecture: a computational approach**, Londres: Routledge, p. 111-124, 2017.

SENAI. **Senai Espírito Santo**, 2022. Disponível em: <www.senaies.com.br>. Acesso em: 4 out. 2022.

SILVA, N. F.; BRIDGES, A. H.; LIMA, E. M. Computer Numerical Control, Mass Customization and Architectural Education in an Emergent Economy. In: **Technological Developments in Networking, Education and Automation**, Springer, p. 163-167, 2010.

SILVA, N. F. et al. A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa? Uma pesquisa sobre um caso brasileiro. In: **SIGraDI 2019**, São Paulo: SIGraDi, 2009.

SIMON, Alexandre Tadeu. **Condições de Utilização da Tecnologia CNC: Um Estudo para Máquinas-Ferramenta de Usinagem na Indústria Brasileira**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, 2001.

SINDUSCON-ES. **Sindicato da Indústria da Construção Civil no Espírito Santo**, 2022. Disponível em: <www.sinduscon-es.com.br>. Acesso em: 4 out. 2022.

STANGER, H.; DALEFFE, A.; TINELLI, E. P.; ROSA, M. da. Fabricação mecânica, montagem e ajuste do protótipo didático de uma máquina de corte plasma CNC. In: **Revista Vincici** - Periódico Científico do UniSATC, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 199-222, 2020. Disponível em: <https://revistavincici.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincici/article/view/228>. Acesso em: 7 jan. 2023.

STAVRIC, Milena; MARINA, Ognjen. Parametric Modeling for Advanced Architecture. In: **International Journal of Applied Mathematics and Informatics**, Bridgewater: NAUN, ed. 1, v. 5, p. 9-16, 2011.

SUBDV. Perfil do escritório de arquitetura SUBdV na plataforma LinkedIn. **SUBdV**, 2023. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/company/subdv/about/>>. Acesso em: 4 jan. 2023.

TAUBE, Jaqueline; HIROTA, Ercília. Customização em massa no processo de provisão de Habitações de Interesse Social: um estudo de caso. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 253-268, ISSN 1678-8621, 2017.

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. Londres: Elsevier, 2006.

THOMA, Andreas; ADEL, Arash; HELMREICH, Matthias; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Mathias. Robotic Fabrication of Bespoke Timber frame modules. Willmann, Jan; BLOCK, Philippe; HUTTER, Marco; BYRNE, Kendra; SCHORK, Tim (eds.). In: **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design**, Springer, p. 447-458, 2018.

TUNGSTEK. **Tungstek do Brasil**, 2023. Disponível em: <<https://www.tungstek.com.br/>>. Acesso em: 31 jan. 2023.

TUNGSTEK-INSTAGRAM. Página do Instagram da Tungstek do Brasil. Disponível em: <<https://www.instagram.com/tungstek/?hl=en>>. 19 out. 2022. Acesso em: 31 jan. 2023.

UFES-ARQUITETURA. **Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo**, 2022. Disponível em: <<https://arquitetura.ufes.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

UNISALES. **Centro Universitário Salesiano**, 2022. Disponível em: <<https://unisales.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

USICORTE. **USICORTE**, 2022. Disponível em: <<https://usicorte.com.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

UVV. **Universidade de Vila Velha**, 2022. Disponível em: <<https://uvv.br/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

VIX CONEXÃO. **Laboratório de prototipagem da Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo**, 2022. Disponível em: <<https://www.instagram.com/vixconexao/?hl=en>>. Acesso em: 3 dez. 2022.

WANGLER, T.; GRAMAZIO, F. et al. Digital Concrete: Opportunities and Challenges. In: **Rilem Technical Letters** **2016**, v. 1, p. 67-75, ISSN 2518-0231, 2016.

WIKIHOUSE. **Wikihouse**, 2022. Disponível em: <<https://www.wikihouse.cc/>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

WOODBURY, Robert. **Elements of Parametric Design**. Londres e Nova Iorque: Routledge, 2010.

XU, Weiguo; HUANG, Shuyi; HAN, Dong; ZHANG, Zhiling; GAO, Yuan; FENG, Peng. Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house. In: **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier, v. 17, p. 1-24, 2022.

APÊNDICE

APÊNDICE 1

RAMO DE ATIV.	#	TIPO DE EQUIPAMENTO	TECNOLOGIA	ÁREA DE TRABALHO- comprimento x largura x altura	ESPESSURA DE CORTE	MATERIAL	QUANT. DE EQUIP.	VISITA AO ESTABELECIMENTO	MUNICÍPIO	
INSTITUCIONAL I*	1	1 ISTEIO								
	1.1	Braço robótico de 5 eixos	Robótica ¹⁰	Não informado	Depende do 'fator final'	Depende do 'fator final'	1	Sim	Vitória	
	1.2	Braço robótico de 5 eixos	Robótica ¹⁰	1.300mm (alcance) e 12,5Kg (peso suportado)	Depende do 'fator final'	Depende do 'fator final'	2			
	1.3	Carro com rodízios	Robótica	890x580mm-100Kg (peso suportado)-Até 10h de trabalho	Não se aplica ⁴	Não se aplica	1			
	2	2 FINDESLAB								
	2.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.400x900mm	3 a 6mm-de acordo com o usuário	MDF-madeiras leves-borracha-acrílico-tecido natural e sintético-mármore e granitos	1	Sim	Vitória	
	2.2	Impressora 3D	Aditiva	350x350x400mm	Não se aplica ⁴	Filamentos de PLA e ABS	1			
2.3	Impressora 3D de sinterização líquida	Aditiva	115x65x155mm	Não se aplica ⁴	Resina para prototipagem (0,05mm resolução)-resina biocompatível (0,05mm de resolução)	1				
2.4	Fresadora CNC de 4 eixos	Subtrativa	305x305mm ⁸	Não se aplica ⁴	Madeira-plásticos-resinas (exceto metais)	1				
2.5	Termoformadora	Formativa ²	230x230x150mm	Não se aplica ⁴	Acetato	1				
INSTITUCIONAL II*	1	1 SENAI - Campus Vitória								
	1.1	Fresadora CNC	Subtrativa	Não informado	Não se aplica ⁴	Metais em geral	1	Sim	Vitória	
	1.2	Torno CNC	Subtrativa	Aprox. 300mm de diâmetro x 1.000mm comprimento	Não se aplica ⁴	Metais em geral	1			
	2	2 UFES - Departamento de Arquitetura e Urbanismo								
	2.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	Não informado	Não informado	MDF-madeiras leves-borracha-acrílico-tecido natural e sintético	1	Não	Vitória	
	2.2	Impressora 3D	Aditiva	28,54x27,04x23,00cm	Não se aplica ⁴	PLA-ABS	1			
	2.3	Impressora 3D	Aditiva	20x20x19cm	Não se aplica ⁴	PLA-ABS-PETG-HIPS-Tough PLA-Wood PLA	1			
ARTESANATO	1	1 Q'Arte								
	1.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.600x1.000mm	9mm (MDF) -15mm (pinus)	Couro-isopor-tecido-MDF-madeira-acrílico-metais (faz riscá com spray)	1	Sim	Cariacica	
	1.2	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.200x900mm	" "	" "	1			
	1.3	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.200x900mm	" "	" "	1			
	1.4	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.000x600mm	" "	" "	1			
	1.5	Router CNC	Subtrativa	2.500x1.350mmx100mm	18mm sem repasse	Madeira-metais (fresa especial)-MDF-isopor (não corta couro e tecido)	1			
	1.6	Router CNC	Subtrativa	2.500x1.350mmx150mm	" "	" "	1			
COMUNICAÇÃO VISUAL	1	1 Imagiton								
	1.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	2.000x1.500mm	8mm (aço carbono) 3,5mm (aço inox)	MDF-acrílico-aços-papelão-aço carbono	1	Sim	Vitória	
	1.2	Router CNC	Subtrativa	3.000x1.700mm	30mm (MDF E acrílico)	MDF-acrílico-papelão-adeseivos	1			
	2	2 Exclusiva Laser								
	2.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	2.500X1.300mm	Até 12mm	Madeira (e derivados), tecido, acrílico, isopor	1	Não	Cariacica	
	2.2	Router CNC	Subtrativa	3.000x2.000mm	25 a 30mm	" + metais de chapa fina	1			
	3	3 FTR Soluções								
	3.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.800x1.000mm-sem eixo "z"	9mm	Madeira (e derivados), tecido, acrílico, isopor	1	Não	Vitória	
	3.2	Router CNC	Subtrativa	1.000x1.000mm	25mm	" + metais de chapa fina	1			
	4	4 Cut Solution								
	4.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	3.000x1.500mm	9mm	Madeira (e derivados), tecido, acrílico, isopor	1	Não	Serra	
	4.2	Router CNC	Subtrativa	5.000x1.850x200mm	30mm	" + ACM	1			
	5	5 Proart Digital								
5.1	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	1.500x900mm	aprox. 10mm	Madeira (e derivados), tecido, acrílico, isopor	1	Não	Viana		
5.2	Router CNC	Subtrativa	5.000x1.850mm	aprox. 30mm	" + ACM	1				
M.*	1	1 LM Marcenaria								
	1.1	Router CNC	Subtrativa	2.750x1.850mm	Não informado	Não informado	1	Não	Cariacica	
METALÚRGICA	1	1 Baldo								
	1.1	Oxicorte CNC	Subtrativo	6.000x2.440mm	7,62cm	Metais em geral	1	Não	Serra	
	1.2	Corte Plasma CNC	Subtrativo	6.000x1.500mm	1,27mm	Metais em geral	1			
	1.3	Estampagem ²	Formativa ²	1.200x1.200mm	1,7 toneladas de pressão	Metais em geral	1			
	2	2 Cemaço (Centro Manufatureiro do Aço)								
	2.1	Corte Plasma CNC	Subtrativa	12.000x2.440mm	Até 38mm	Metais em geral (chapa fina)	2 em 1	Sim	Serra	
		Oxicorte CNC	Subtrativa	12.000x2.440mm	Entre 38mm a 450mm	Metais em geral (chapa grossa)				
	2.2	Oxicorte CNC	Subtrativa	6.000x1.800mm	32mm até 450mm	Metais em geral (chapa grossa)				
	3	3 Delga Inox								
	3.1	Cortadora a Laser CNC	Subtrativa	3.000x1.500mm	8mm (aço inoxidável) 12mm (aço carbono)	Metais em geral	1	Não	Serra	
	4	4 Goronci								
	4.1	Corte Plasma CNC	Subtrativa	6.000x1.800mm	50,80mm (aço carbono) 38mm (aço Inoxidável) 13mm (aluminio)	Metais: aço carbono, aço inox, alumínio	1	Não	Serra	
	4.2	Cortadora a laser CNC	Subtrativa	3.000x1.500mm	200mm (aço carbono) 15mm (aço Inoxidável e carbono) 6mm (cobre e latão)	Cortes de até 3/4 de uma polegada	1			
	4.3	Dobradeira CNC	Formativa ²	3.000mm de boca	1/2 polegada	Metais em geral	1			
	5	5 Tungstek								
	5.1	Corte Plasma CNC	Subtrativa	9.000x3.000mm	100mm (0,1mm precisão)	Alumínio, aço carbono e inoxidável	1	Sim ³	Serra	
	5.2	Corte a Jato D'água CNC	Subtrativa	4.000x2.000mm	300mm (0,05mm precisão)	Metais em geral	1			
	6	6 Steel Moldes								
	6.1	Fresadora CNC	Subtrativa	700x350mm	500mm altura	Metais em geral	1	Não	Serra	
	7	7 JR Mecânica								
	7.1	Torno CNC	Subtrativa	1.000x20mm (diâmetro)	Não se aplica ⁴	Metais em geral	1	Não	Cariacica	
8	8 Uscorte									
8.1	Torno CNC	Subtrativa	1.000x750mm (diâmetro)	Não se aplica ⁴	Metais em geral	1	Não	Serra		
9	9 Metal One ⁹									
9.1	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	Não informado	2	Não	Serra		
NOTAS	1	1 Abreviação de: 'Marcenaria'.								
	2	2 Estes equipamentos são NC (Numerical Control). Apesar de não serem CNC, são fundamentais para processos de fabricação formativos.								
	3	3 Não permitiram acesso ou visita institucional.								
	4	4 Os equipamentos aditivos e formativos não têm relação com a espessura de corte do material. O mesmo vale para os carros robóticos.								
	5	5 Tem relação com a área de trabalho comportada pelo equipamento.								
	6	6 Instituições que não ofertam cursos técnicos ou superiores.								
	7	7 Instituições de ensino que ofertam cursos técnicos ou superiores.								
	8	8 Variável conforme a geometria do material: 120mm(diâmetro)x270mm para peças cilíndricas; 110x40x270mm para peças retangulares.								
	9	9 Contato realizado por duas vezes com o proprietário. O mesmo confirmou ter equipamentos de corte a laser e oxicorte, no entanto, os dados não foram confirmados. Portanto, desconSIDERADOS na seção de análise.								
	10	10 Equipamentos robóticos podem ser enquadrados como aditivos, subtrativos ou formativos. No caso de braços robóticos, o que determina a sua função é o equipamento acoplado à sua terminação ('fator final').								