

Construtibilidade de formas arquitetônicas complexas: uma revisão sistemática da literatura

Constructability of complex architectural shapes: a systematic literature review

Bruno Leão de Brito 
Felipe Tavares da Silva 
Érica de Sousa Checcucci 

Resumo

O uso de modelos computacionais paramétricos possibilitou uma revolução na forma das edificações. No entanto, a liberdade formal trazida por esses modelos apresenta novos desafios, principalmente em relação ao processo construtivo e ao uso dos materiais nas arquiteturas com formas complexas. Logo, entender a construtibilidade, ou como os processos de fabricação e montagem e os materiais influenciam na geração da forma, é essencial para o desenvolvimento de uma arquitetura eficiente e eficaz. Com base nisso, este artigo tem como objetivo identificar e analisar o estado da arte relativo aos processos de fabricação e montagem de formas arquitetônicas complexas por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL). Após a pesquisa em cinco bases de dados, encontrou-se 142 trabalhos, dos quais 61 foram selecionados para análise. Esses trabalhos possibilitaram uma visão ampla da aplicação de materiais e técnicas de fabricação digital para construção de formas complexas, além de diferentes critérios de construtibilidade utilizados para análises das formas, citados em 17 trabalhos. Conclui-se que o desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas demanda a integração entre o projeto da forma, os materiais de construção que serão utilizados e os processos de fabricação e montagem.

Palavras-chave: Formas complexas. Construtibilidade. Modelos paramétricos algorítmicos.

Abstract

The use of parametric computational models led to a revolution in building shapes. However, the formal freedom brought about by parametric models has also posed new challenges, especially concerning the construction process and the use of materials in architecture using complex shapes. Therefore, for the development of an efficient and effective architecture, it is essential to understand constructability or how manufacturing and assembly processes and materials influence the generation of shapes. Hence, this article aims to identify and analyse the state of the art regarding the manufacturing and assembly processes of complex architectural forms through a Systematic Literature Review (SLR). After searching five databases, 142 papers were found, of which 61 were selected for analysis. These works offered a broad view of the application of materials and digital manufacturing techniques in the construction of complex shapes, as well as different constructability criteria used for shape analysis, mentioned in 17 papers. This study's conclusion is that the development of complex architectural forms requires the integration between the shape design, the construction materials that will be used, and the manufacturing and assembly processes.

Keywords: Complex shapes. Constructability. Algorithmic parametric models.

¹Bruno Leão de Brito
¹Universidade Federal da Bahia
Salvador - BA - Brasil

²Felipe Tavares da Silva
²Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

³Érica de Sousa Checcucci
³Universidade Federal da Bahia
Salvador - BA - Brasil

Recebido em 01/08/21
Aceito em 06/11/21

Introdução

A geometria é o cerne do processo de projeto arquitetônico (POTTMAN *et al.*, 2007). Ao observá-la na história da arquitetura e construção, é possível notar o uso constante de linhas retas, conexões ortogonais e o máximo possível de repetição de elementos (DIMCIC, 2011). Essas características podem ser observadas quando se analisa grandes obras arquitetônicas como o Palazzo Farnese de Antonio Sangallo e Michelangelo; a Praça de São Marco, ou até a Casa da Cascata e a Casa Farnsworth dos Arquitetos Frank Lloyd Wright e Mies Van Der Rohe, respectivamente – todas elas com grande quantidade de elementos formais retilíneos e conexões ortogonais.

No entanto, desde o Barroco os arquitetos e projetistas têm tentado ir além do *grid* cartesiano e das normas de beleza e proporção estabelecidas (KOLAREVIC, 2003). Podem ser citadas, como exemplos, a Igreja de Sant'Ivo em La Sapienza de Borromini, ou em menor escala as cúpulas das igrejas de San Carlo alle Quattro Fontane e Sant'Andrea al Quirinale de Borromini e Bernini, respectivamente. Apesar desse esforço para alcançar soluções além da ortogonalidade das formas, o uso de geometrias complexas que podem ser desenvolvidas por métodos geométricos tradicionais é limitado pelas próprias técnicas de representação.

Consequentemente, o uso de modelos computacionais paramétricos, a partir da década de 1990, trouxe uma real evolução na forma das edificações (POTTMAN *et al.*, 2007). Além da própria liberdade formal, com o uso de modelos numéricos é possível explorar soluções de projeto que não estariam acessíveis por meio de outros métodos (MACHAIRAS; TSANGRASSOULIS; AXARLI, 2014).

Oxman (2017) afirma que em paralelo a essa liberdade formal e a melhora do desempenho da edificação, o uso de relações entre as entidades dos modelos paramétricos permite um processo de projeto baseado em um modelo associativo. Nesse modelo, essas relações passam a ser formalizadas, em contraponto ao processo de projeto tradicional em que essas relações estão apenas na mente do projetista. Essa autora, assim como Kolarevic (2003), afirma que esse método leva em consideração a organização do fluxo de trabalho, do pensamento e das características técnicas da edificação, como, por exemplo, o material usado, o processo de fabricação e montagem e o próprio projeto em si.

Essa revolução no processo de projeto e na forma das edificações a partir da modelagem computacional, paramétrica, generativa e algorítmica permitiu que os projetistas trabalhassem com geometrias de formas complexas¹ de maneira mais simples. No entanto, apesar da simplificação da geração de formas complexas pelo uso de sistemas CAD paramétricos-generativo-algorítmicos, algumas formas geradas não possuem viabilidade imediata de construção ou compatibilidade com os materiais a serem utilizados. Isso traz a necessidade de compreensão sobre como a modelagem dessas formas nesses sistemas devem estar vinculadas aos processos de projeto, fabricação e construção.

Apesar do uso do computador para a concepção de formas complexas, o processo de projeto associativo relembra aos projetistas um dos aspectos primários da arquitetura: a necessidade do projetista saber como construir (AUSTERN; CAPELUTO; GROBMAN, 2018a).

A modelagem paramétrica também é abordada pelo estudo de Chen, Lim e Shao (2015), que buscaram entender a geração e fabricação de formas por meio dos processos de concepção com foco na materialização através da aplicação de técnicas de fabricação digital, trazendo um caminho da materialização das formas complexas concebidas computacionalmente. Outros estudos estão presentes na literatura deste tema, relacionando a modelagem paramétrica ao processo de fabricação e aos materiais construtivos (Quadro 1).

Segundo Oxman (2017), com o uso de algoritmos para geração de formas arquitetônicas complexas, a ênfase do desenvolvimento projetual está na relação tectônica intrínseca entre o projeto e a materialização da construção. A autora também afirma que essa relação se baseia no entendimento e uso das características do material e na materialidade definida pelas técnicas de fabricação digital adotadas e pela possibilidade de prototipagem rápida. Esse paradigma foi nomeado como projeto de fabricação baseado no material, ou *Material Fabrication Design* (MFD).

A partir do paradigma do MFD proposto por Oxman (2017), é possível observar e entender a concepção de formas arquitetônicas complexas por meio da relação entre o material primário utilizado, o processo de fabricação/construção da edificação e o processo de geração da forma.

¹Superfícies euclidianas, como a hiperbólica, elíptica, com dupla curvatura, dentre outras, desenvolvidas a partir do século XIX. Essas geometrias permitem a descrição de superfícies complexas, especialmente as curvas, cujo uso individual ou combinado gera formas não convencionais (SILVA, 2017).

Quadro 1 - Estudos que relacionam a concepção da forma, materiais e processo de fabricação

Pesquisadores	Trabalhos desenvolvidos	Materiais utilizados	Processo de fabricação
Agkathidis (2019)	Aplicação de modelagem algorítmica para projetar e fabricar uma forma complexa no projeto de um jardim	Aço	Dobra por CNC
Tepavčević <i>et al.</i> (2017)	Descrição de método de projeto para fabricação baseado em encaixe/conexão por fricção	Madeira	Corte 2D por CNC
Willmann (2016)	Apresentação de abordagem para montagem de estruturas de madeira	Madeira	Braço robótico
Dahy <i>et al.</i> (2019)	Processo experimental de construção de pavilhão	Biocompósito	Fresagem CNC
Erdine e Kallegias (2017)	Investigação sobre a materialidade do concreto armado em métodos generativos de descoberta de formas	Concreto	Fresa e corte CNC

Essa variedade de técnicas e processos de fabricação e montagem de estruturas que materializam as formas arquitetônicas complexas, como foi apresentada no Quadro 1, aponta para uma necessidade de sistematização desses processos, avaliando também como eles influenciam na concepção arquitetônica. Desse modo, este artigo tem como objetivo identificar e analisar o estado da arte relativo aos processos de concepção, fabricação e montagem de formas arquitetônicas complexas, por meio de uma revisão sistemática da literatura.

Como resultado, é apresentada uma revisão sobre aplicação de materiais, processos de fabricação e métodos de modelagem digitais de concepção da forma que tem sido utilizado na construção de formas arquitetônicas complexas. Como desdobramento da revisão, também é discutida a relação intrínseca que esses três componentes possuem e como podem influenciar na construtibilidade e no desempenho desses tipos de geometrias.

Método

O processo de geração e construção de formas arquitetônicas complexas por algoritmos é um processo criado pelo ser humano, ou seja, um processo artificial. Esse campo de conhecimento está inserido na ciência do projeto ou *Design Science Research* (DSR). Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015) afirmam que o DSR tem como finalidade desenvolver um conhecimento sobre o projeto e não apenas aplicá-lo, sendo que o entendimento do processo cognitivo responsável pela elaboração do projeto desenvolvido é o ponto principal dessa metodologia.

O DSR está sendo adotado como método de pesquisa nessa investigação sobre a construtibilidade de formas complexas na arquitetura, na qual este artigo tem como origem e motivação. Neste atual estágio, a pesquisa procura reunir o estado da arte e verificar os principais condicionantes relacionados à materialidade, concepção, fabricação e montagem destas formas na arquitetura.

Na busca por um melhor entendimento sobre o tema e para garantir a qualidade do levantamento relacionado às técnicas e processos existentes para concepção, geração e construção de formas arquitetônicas complexas, foi utilizado o método de revisão sistemática da literatura (RSL).

A RSL é um método de revisão bibliográfica que visa identificar, avaliar e interpretar as publicações disponíveis em bases de dados relevantes, para responder a uma questão específica de pesquisa de uma área temática ou um fenômeno de interesse (KITCHENHAM, 2004). Biolchini *et al.* (2005) afirmam que a revisão sistemática segue uma sequência de passos, de acordo com um protocolo desenvolvido.

Desse modo, para garantir a correta execução da RSL, ela foi dividida em três etapas distintas:

- (a) planejamento, que visou a definição das diretrizes para o levantamento bibliográfico;
- (b) desenvolvimento, quando foram aplicadas as orientações definidas na fase anterior; e
- (c) síntese, que se configurou como o tratamento dos resultados obtidos e a sua apresentação.

A etapa de planejamento começou com o estabelecimento de um protocolo de pesquisa no qual foram estabelecidos o objetivo e a questão a ser respondida pela RSL, assim como a população de artigos que seriam estudados, as palavras-chave que seriam usadas nos motores de busca, as bases de dados a serem consultadas, quais tipos de trabalho seriam considerados e os critérios de inclusão e exclusão de trabalhos (Quadro 2).

Como apresentado no Quadro 2, a RSL teve como objetivo a identificação e a análise dos processos existentes para a geração e construção de formas arquitetônicas complexas focando no levantamento de métodos, técnicas e materiais propostos por meio da análise de trabalhos que apresentam o processo de desenvolvimento dessas formas.

Foram definidas 15 palavras-chave a partir dos trabalhos de controle, que foram organizadas em quatro grupos conceituais (*parametric architecture; parametric design; algorithms; constructability*) de acordo com a similaridade dos seus significados. As palavras-chaves de um mesmo grupo foram combinadas com o OR e os grupos foram associados com o AND para criar *strings* a serem aplicadas nos motores de busca dos repositórios listados no Quadro 2. A Figura 1 ilustra as sete *strings* utilizadas: o “x” nesta figura demonstra quais grupos conceituais formaram cada *string*. Por exemplo, na primeira *string* foram combinados os termos referentes à *parametric architecture* e à *constructability* e na *string* 6 todos os quatro grupos foram combinados.

Após a definição das *strings*, elas foram utilizadas nos motores de busca até julho de 2021, sendo estes o Science Direct, Scopus, IEEE, Engineering Village e o Association for Computing Engineering. Dentre os trabalhos levantados, foram considerados somente aqueles desenvolvidos na área da AECO (arquitetura, engenharia, construção e operação).

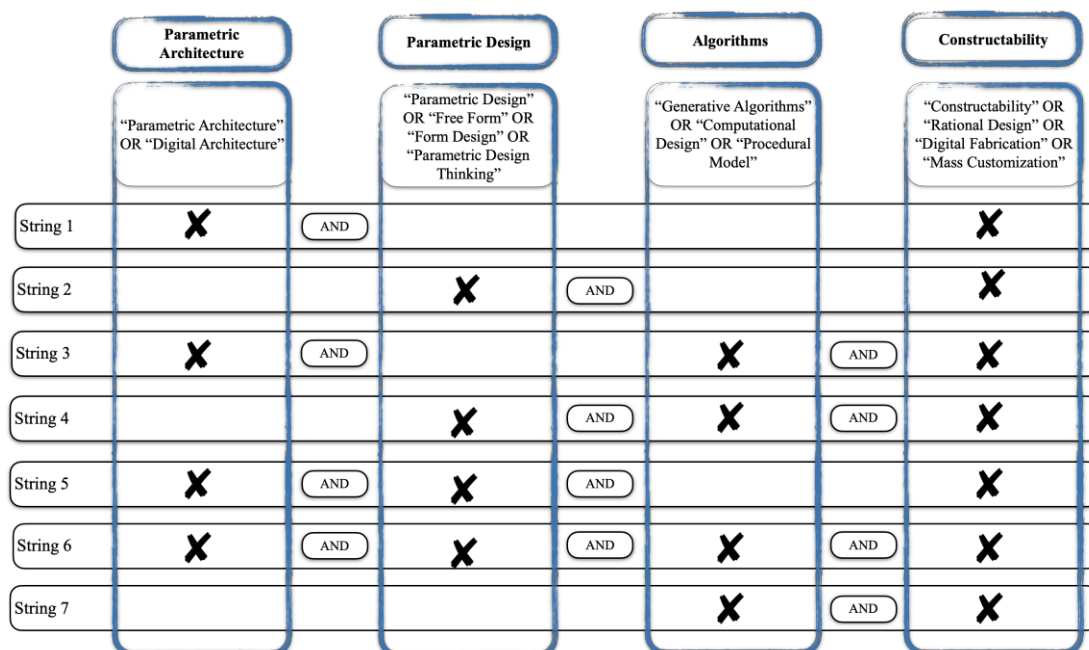
Após o levantamento dos trabalhos, estes passaram por uma primeira seleção a partir da análise do título e do resumo (*abstract*). Nessa análise, feita com o uso da ferramenta StArt², foram identificados os artigos para uma leitura completa, a partir dos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos no protocolo de pesquisa da RSL.

Quadro 2 - Campos do protocolo de pesquisa adotados na revisão sistemática

Campos do protocolo	Parâmetro utilizado
Questão norteadora	Quais são os métodos, técnicas e materiais existentes para a geração e construção de formas arquitetônicas complexas com base em modelagem generativa algorítmica?
Trabalhos de controle utilizadas como balizadores	Oxman (2017), Pottman <i>et al.</i> (2007), Kolarevic (2003) e Frazer (1995).
Objetivo da revisão sistemática	Identificar e analisar os processos existentes para geração e construção de formas arquitetônicas complexas direcionados a concepção arquitetônica e construção de edificações.
População de artigos que será observada	Trabalhos que apresentem processos de desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas publicados a partir de 2000.
Repositórios utilizados	Science Direct, Scopus, IEEE, Engineering Village, Association for Computing Machinery.
Características dos trabalhos considerados	Trabalhos desenvolvidos por profissionais ou estudantes de AECO (arquitetura, engenharia, construção e operação).
Critérios de inclusão dos trabalhos	O trabalho estar disponível em bases científicas e tratar de algum destes temas: fabricação digital de elementos arquitetônicos; fabricação de formas arquitetônicas complexas; geração de formas arquitetônicas complexas.
Critérios de exclusão dos trabalhos	Não discutir sobre arquitetura, nem formas arquitetônicas complexas e nem técnicas generativas.

²Desenvolvido por Laboratório de Pesquisa em engenharia de Software. Disponível em: http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool. Acesso em: 13 jul. 2021.

Figura 1 - Grupos de palavras-chaves e strings utilizadas nos motores de busca



Após essa primeira seleção, os trabalhos que passaram pelo crivo estabelecido foram lidos na íntegra, o que levou à extração de informações referentes aos softwares utilizados, aos materiais e métodos aplicados, aos estudos desenvolvidos, objetivos principais dos trabalhos e os critérios de análise, construtibilidade e otimização utilizados pelos autores.

A terceira e última etapa da RSL se configura como a síntese das descobertas realizadas. Após a seleção, leitura e análise dos trabalhos identificados na RSL, uma discussão foi desenvolvida. Os resultados obtidos são apresentados na seção a seguir.

Resultados

A partir da aplicação do protocolo, foram identificados nas bases pesquisadas 2.843 artigos relacionados a geração, fabricação e montagem de formas arquitetônicas complexas entre os anos de 2000 e julho de 2021 (Figura 2).

Dentre os 2.843 artigos encontrados, 1.767 foram duplicados, ou seja, apareceram em mais de uma base considerada no levantamento. Desse modo, a pesquisa levantou um montante de 1.076 diferentes artigos que tiveram o título e o *abstract* analisados (Figura 3). Destes, 934 trabalhos foram rejeitados por não atenderem aos critérios estabelecidos no campo "População de artigos que será observado" do protocolo RSL, ou seja, foram rejeitados por não apresentarem processos de desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas. Na sequência, foi feita a leitura na íntegra e análise de 142 trabalhos. Dessa análise, com base no protocolo já estabelecido, 61 trabalhos foram considerados relevantes de acordo com os critérios de inclusão e exclusão já definidos (Quadro 2) por terem estreita relação com o tema investigado. A Figura 3 apresenta o fluxo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos trabalhos na RSL.

Com a definição dos 61 trabalhos, análises quantitativas e qualitativas foram realizadas a partir da leitura completa dos artigos. A síntese das análises realizadas é apresentada nas seções a seguir.

Bibliometria

Para um melhor entendimento sobre o montante de publicações incluídas na RSL, foi realizada uma análise bibliométrica por meio da categorização e organização dos trabalhos de acordo com o ano e a fonte da publicação. Em relação ao ano, em 2004 foi publicado o primeiro trabalho sobre o tema desta pesquisa e nota-se um aumento considerável de publicações a partir de 2012, sendo que os anos com maior quantidade de trabalhos são os de 2017 a 2019 (Figura 4).

Figura 2 - Quantidade de artigos encontrados por base considerada

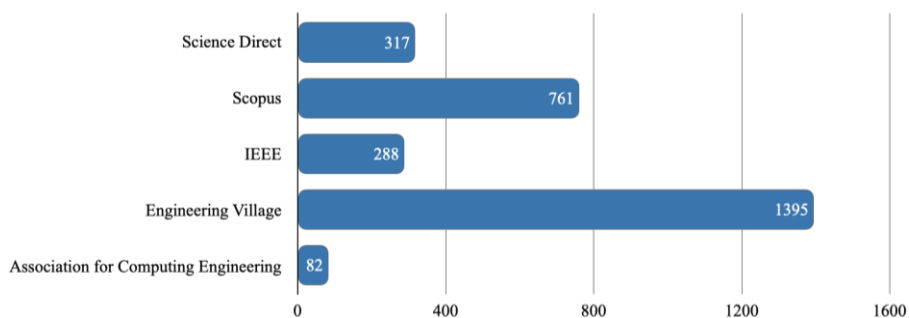
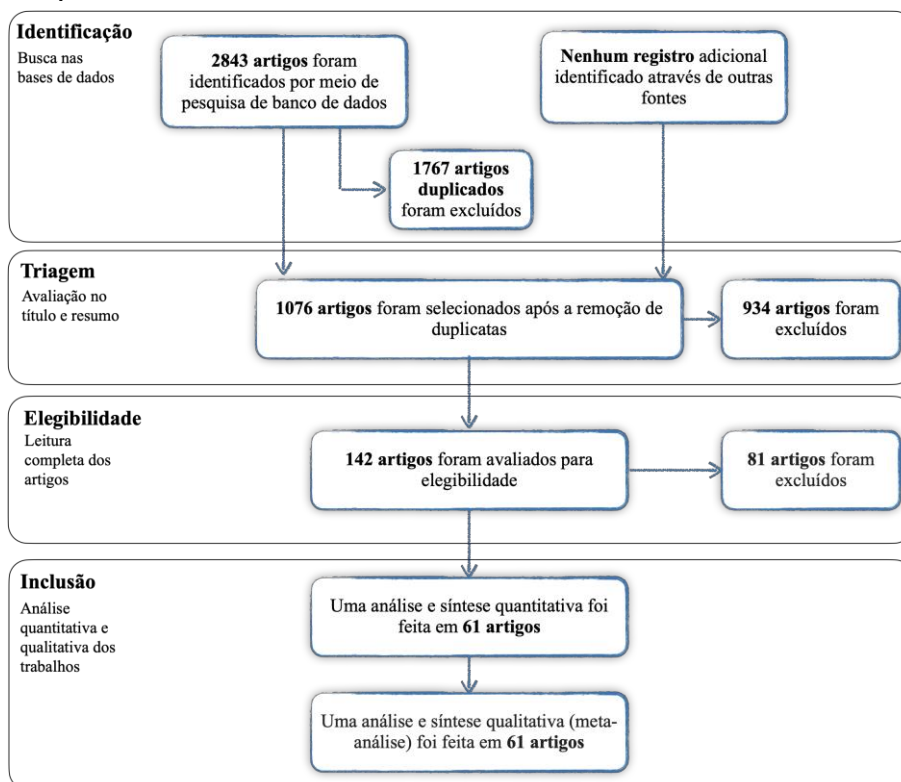
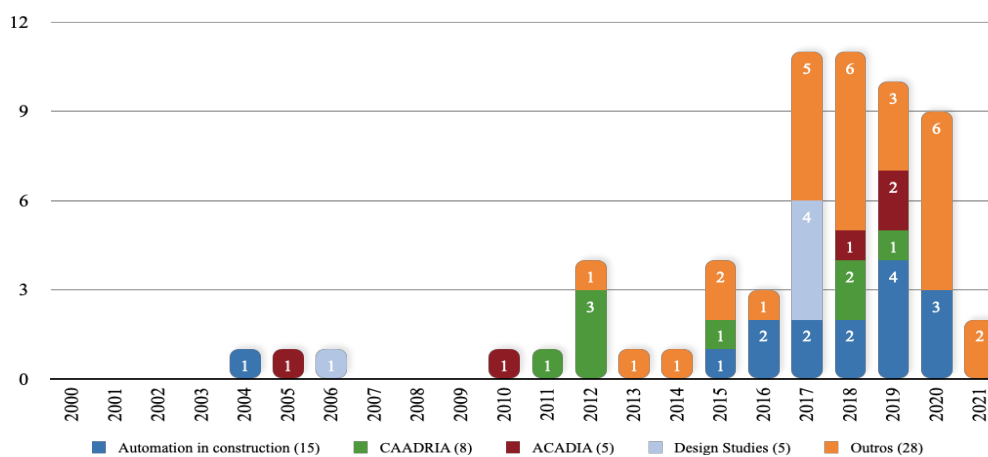


Figura 3 - Fluxo para inclusão dos trabalhos na RSL



Fonte: baseado em Moher *et al.* (2009).

Figura 4 - Distribuição das publicações por periódicos



Em relação aos periódicos e eventos em que os trabalhos encontrados foram publicados, é possível observar que o *Automation in Construction*, CAADRIA, *Design Studies* e ACADIA são aqueles que apresentam a maior quantidade de trabalhos relacionados ao tema (Figura 4). As quatro fontes supracitadas acumulam um total de 33 artigos dos 61 analisados nesta RSL, configurando-se como os mais significativos para o campo de estudo.

Classificação dos trabalhos em grupos temáticos

A partir dos levantamentos realizados, os artigos foram agrupados de acordo com a ênfase do trabalho desenvolvido:

- (a) projeto da forma;
- (b) fabricação e montagem; e
- (c) tecnologia dos materiais.

O primeiro grupo, projeto da forma, engloba trabalhos relativos ao processo de criação do modelo geométrico paramétrico por meio de programação, da gestão da informação do modelo (baseando-se nos princípios da modelagem da informação da construção) e a prototipagem para realização de ensaios e ajustes no processo de projeto. O segundo grupo, fabricação e montagem, englobou os processos de montagem em canteiro, os processos de fabricação e os maquinários existentes para construção de formas geometricamente complexas. Por último, o grupo tecnologia dos materiais abarcou as características dos materiais para permitir a criação de formas arquitetônicas complexas.

Com a leitura desses estudos, foi observado que a maioria dos artigos apresenta mais de uma ênfase, ou seja, buscava relacionar mais de um viés da construção de formas arquitetônicas complexas. A relação entre esses vieses e a participação destes no grupo de trabalhos lidos são apresentadas na Figura 5.

Dentre os artigos analisados, 21 deles (34%) buscaram entender e descrever a relação entre a geração da forma e o processo de fabricação, não discutindo o material construtivo adotado; 8 trabalhos (13%) buscaram discutir o material construtivo e sua relação com a fabricação (5 trabalhos) ou com o projeto da forma (3 trabalhos). Do montante total, apenas 11% dos trabalhos analisados buscaram entender e descrever a relação entre os três aspectos levantados: as características dos materiais, a geração da forma e o processo de fabricação e montagem da forma.

Em paralelo foram levantados dados relativos aos softwares utilizados nos artigos selecionados, assim como qual(is) o(s) processo(s) de fabricação aplicados e qual o material primário utilizado no estudo. Em relação aos softwares utilizados nos trabalhos analisados, observou-se um conjunto de vinte ferramentas distintas. Na Figura 6 são apresentadas essas ferramentas e as associações estabelecidas entre elas em uso integrado entre si. Essas associações são apresentadas por meio das linhas que conectam as seções do gráfico. Dentre essas ferramentas percebeu-se uma ampla utilização do software de programação visual Grasshopper, sendo que sua aplicação acontece em conjunto com outros softwares (Revit e Rhinoceros); *add-ons* (Rhino Nest, Rhino Vaut, Panneling Tool, Kangaroo e Karamba); linguagens de programação (Python, C# e C++); e motores de cálculo (SAP 2000). O tamanho do arco de cada software permite identificar a quantidade de programas com os quais ele se associa e quais são eles. Por exemplo, é possível identificar que o uso do Python é citado combinado com Rhinoceros, o Rhino Script e o Grasshopper.

Figura 5 - Ênfase dos artigos

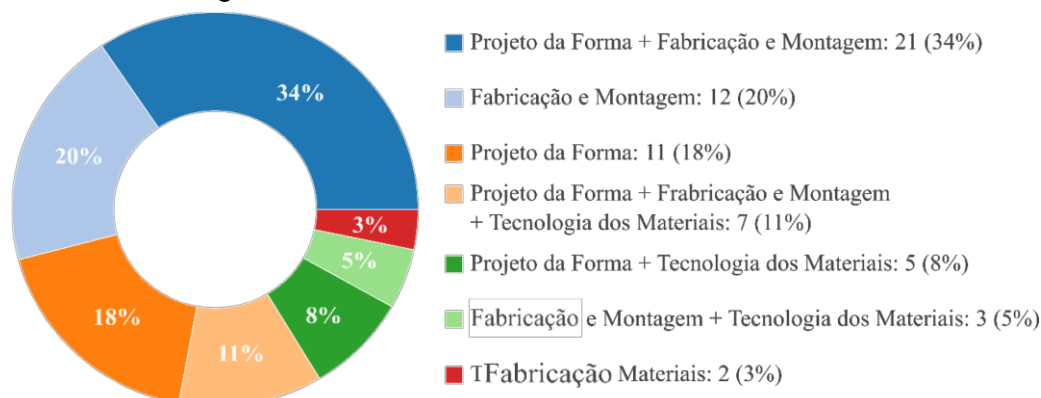
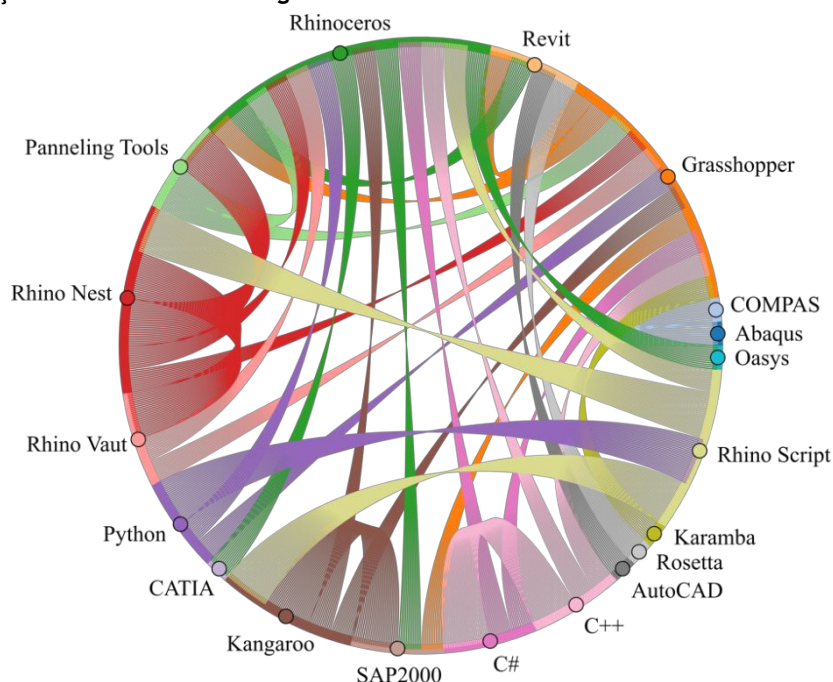


Figura 6 - Relação entre ferramentas digitais utilizadas



Além do Grasshopper/Rhinoceros, um software BIM, Autodesk Revit, foi utilizado como um meio de integração entre a geometria complexa em estudo e outras disciplinas da construção. Em relação à linguagem de programação, notou-se uma ampla utilização do Python para auxiliar a geração e análise da forma.

Ao se investigar sobre os materiais e meios de fabricação, notou-se que o material mais utilizado nos estudos avaliados foi o concreto (10 ocorrências) seguido pela madeira (9 ocorrências) e compósitos (6 ocorrências) (Figura 7). Em relação ao processo de fabricação, o método mais usado foi aquele que faz uso de braços robóticos (9), seguido pela impressão 3D (7) e corte de peças com CNC (4). Importante observar na Figura 7 que a contagem de artigos apresenta dois trabalhos a menos (59) do que os trabalhos analisados (61), isso se justifica pelo fato de dois dos artigos analisados serem de revisão sistemática (AUSTERN; CAPELUTO; GROBMAN, 2018b; YAZICI; TANACAN, 2020), não apresentando a aplicação de técnicas de fabricação ou materiais.

Ao observar a Figura 7, percebe-se também que a combinação mais comum entre o material primário e o método de fabricação é entre a madeira e as máquinas CNC de corte 2D. Dentre os métodos de fabricação, o braço robótico foi aquele que mais apresentou variedade de materiais, tendo exemplos de trabalhos com concreto, alvenaria, EPS (poliestireno expandido), compósitos, materiais fibrosos e materiais à base de água.

Critérios de construtibilidade

A construtibilidade deve admitir o compromisso com decisões conscientes durante a elaboração do projeto para se ter sucesso no processo de construção, além de não deixar de lado a preocupação com qualidade, estética, tempo e custo (GRIFFITH, 1987). Esse termo pode ser entendido também como a capacidade de se edificar com eficiência e economia considerando os materiais, componentes e subconjuntos para os diversos níveis definidos, além de se preocupar com atividades de canteiro e com as sequências lógicas das operações e métodos de construção (AMANCIO, 2010).

Austern, Capeluto e Grobman (2018b) definiram a construtibilidade como a extensão do projeto que facilita a construção, estando sujeito aos requisitos gerais para o edifício concluído. Como exemplo desses requisitos podem ser citados requisitos políticos, checklists construtivos, medidas contratuais, revisões, modelagem de sistema e modelagem da informação da construção. Por sua vez, Kifokeris e Xenidis (2017) e Ding, Salleh e Kho (2020) definem a construtibilidade com a integração e aplicação dos conceitos, fundamentos e experiências de construção durante o ciclo de vida de um projeto arquitetônico.

Figura 7 - Relação entre materiais primários e métodos de fabricação

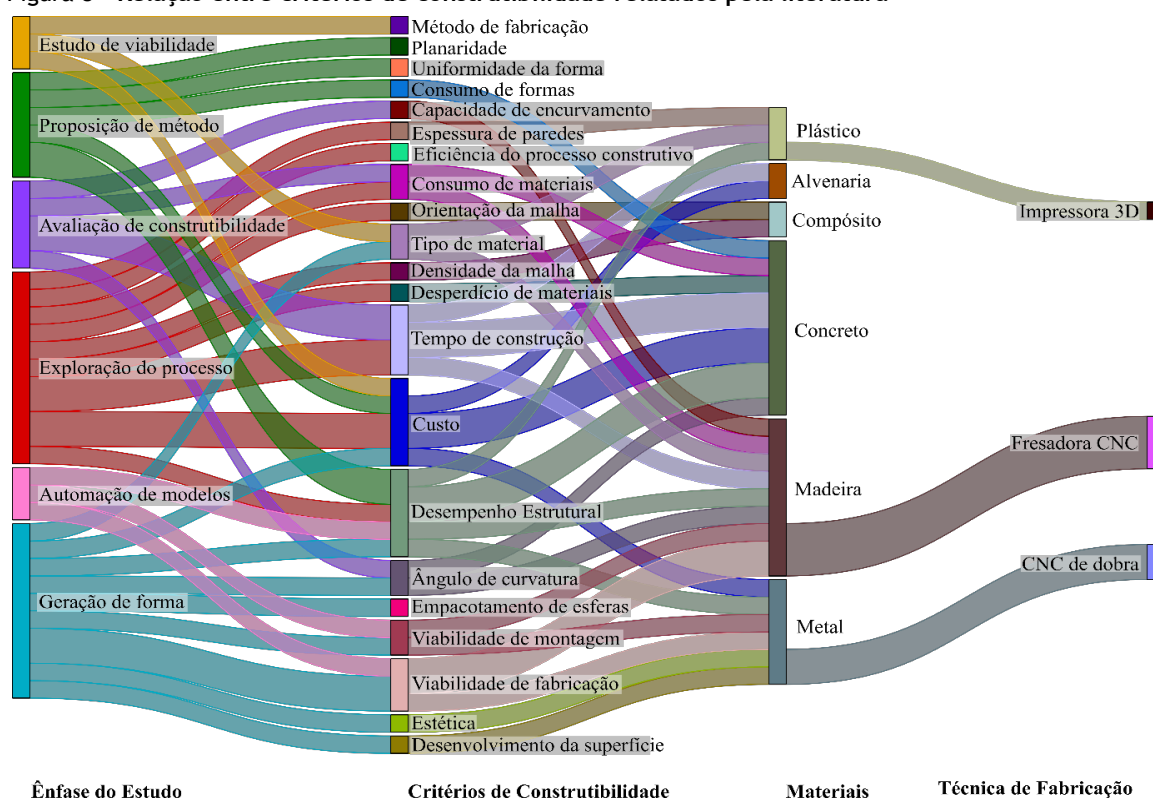
Material primário / Método de fabricação	Não especificado	Madeira	Aço	Concreto	Alvenaria	EPS	Compósitos	Vidros	Materiais fibrosos	Materiais a base de água	Plástico	Espuma	Biocompósito	Barro	Bambu	Total
Não especificado	12	2		2	2		3	1							1	23
Fresa robótica de 7 eixos		1														1
CNC de dobra em 3 eixos			1													1
CNC de corte de 5 eixos		1														1
Braço robótico	2			1	1	1	2		1	1						9
Hololens					1											1
Fresa e Corte CNC		6														6
Construção robótica		1														1
CNC de dobra, corte e solda				1												1
CNC dobra			1													1
FDM (impressora 3D)	1			3			1			1				1		7
Corte de fio quente												1				1
CNC milling	1												1			2
Robô acionado por cabo					1											1
CNC T-BAR			1													1
Corte a laser	1															1
CNC flat-bed knitting machine				1												1
Total	17	11	3	8	5	1	6	1	1	1	1	1	1	1	1	59

Quando se trata de formas arquitetônicas complexas, a definição e avaliação de critérios de construtibilidade tem sido abordada por alguns autores, como Anderson e Tang (2011), Berdos, Agkathidis e Brown (2019), Nguyen, Vestartas e Weinand (2019), Hack *et al.* (2020), Salta *et al.* (2020), entre outros. Entre os critérios utilizados por esses autores podem ser citados o desempenho estrutural, as limitações do material utilizado, o custo, a capacidade da superfície complexa a ser planificada, a capacidade de dobra de determinado material, as possibilidades de fabricação, o tempo de construção, o desperdício de materiais, entre outros.

Tais critérios foram definidos pelos autores por meio do desenvolvimento de estudos relacionados à exploração de novos processos, novos materiais e meios de geração e análise de modelos. A Figura 8 apresenta a ênfase dos estudos desenvolvidos e como estes se relacionam com os critérios de construtibilidade que foram utilizados para análise da forma arquitetônica. Além disso, quais foram os materiais utilizados e quais técnicas de fabricação digital aplicadas. Importante salientar que a Figura 8 apresenta informações trazidas por 17 artigos que entraram em detalhes sobre essas informações, dos 61 analisados neste trabalho.

Os estudos que empregaram alvenaria, compósito e concreto como materiais das estruturas arquitetônicas desenvolvidas não utilizaram diretamente equipamentos CNC na produção da peça final. Nesses estudos foram empregadas máquinas de fabricação digital para poder construir elementos que servissem de apoio para a execução da estrutura, como fôrmas e estruturas de suporte em madeira.

Figura 8 - Relação entre critérios de construtibilidade relacionados pela literatura



A partir dos trabalhos analisados, nota-se que os principais parâmetros de desempenho relacionados ao objeto arquitetônico com formas complexas são o desempenho econômico (custo), o desempenho estrutural e o tempo de construção. Esses parâmetros são utilizados para diagnosticar não só a construtibilidade da geometria, mas outros processos e etapas da construção de uma forma complexa. Isso vem corroborar com a ideia de construtibilidade apresentada por Amancio (2010).

Além disso, critérios como o tipo e nível de consumo do material empregado, a necessidade de planarização e a viabilidade de fabricação também são trazidos pelos autores. Associados a outros critérios de construtibilidade, os autores buscaram sempre a análise e otimização de mais de uma característica do objeto arquitetônico. Pode-se então perceber uma preocupação entre a integração do projeto, dos materiais utilizados e da construção dessas formas.

Discussão dos resultados

Alguns autores dos trabalhos analisados apontam que o principal ponto de estudo de uma forma arquitetônica complexa é o seu material construtivo, baseados na ideia de que inovação em materiais resulta em inovação na arquitetura (MENGES, 2010; CORREA; KRIEG; MEYBOOM, 2019). Desse modo enfatizam que a criação das formas complexas está diretamente ligada à capacidade dos materiais atenderem aos esforços estruturais assim como à compatibilidade com o processo de fabricação que essas formas exigem.

Nos estudos levantados por essa revisão, foi observado que a arquitetura como prática material é predominantemente baseada em abordagens projetuais que se caracterizam por uma relação hierárquica que prioriza a geração de informações geométricas. Tais informações servem para a descrição de sistemas e elementos arquitetônicos em detrimento de outras informações (MENGES, 2010), ou seja, a forma arquitetônica ainda é abordada por um viés formalista. No entanto os objetos arquitetônicos com formas complexas estão apoiados por um tripé, base dos campos de conhecimento:

- a tecnologia do material que irá compor a estrutura que dá sustentação à forma;
- os processos de fabricação e montagem utilizados na materialização do objeto; e
- a concepção e o projeto da forma.

A abordagem centrada no material está de acordo com a proposta de Oxman (2017), propondo uma inversão no processo de projeto tradicional, onde se muda do pensamento forma-estrutura-material para o material-estrutura-forma.

Essa inversão no pensamento projetual e a possibilidade de integração entre forma, materialidade, tectônica e funções relacionadas às formações arquitetônicas possibilitam o desenvolvimento de projetos orientados ao desempenho (ERDINE; KALLEGIAS, 2017). No entanto Duro-Royo, Mogas-Soldevila e Oxman (2015) e Correa, Krieg e Mayboom (2019) apontam que as ferramentas convencionais de projeto paramétrico geralmente contêm dados geométricos e topológicos de construções virtuais, mas não possuem meios robustos para integrar propriedades de composição de materiais nos modelos virtuais.

Nesse sentido, Yang, Loh e Leggett (2018) defendem a abordagem *bottom-up material approach to design*, na qual o desenvolvimento da forma e conseqüentemente do projeto deve partir das especificações dos materiais construtivos. Essa abordagem é também apontada pela Oxman (2017) como o *Material Fabrication Design* (MFD), em que se entende que a exploração das propriedades e comportamentos dos materiais, assim como a exploração dos processos e técnicas de fabricação digital direcionam o desenvolvimento do projeto. Ou seja, na modelagem paramétrica aplicada ao projeto de arquitetura há uma alteração do processo projetual, em que a fabricação e o material podem estar em uma posição dominante de definição de diretrizes formais do objeto arquitetônico. Como exemplo, Correa, Krieg e Meyboom (2019) apresentaram o processo de projeto, fabricação e montagem levando em consideração as limitações impostas pelo material nas etapas na criação de estruturas que apresentassem dupla curvatura.

Além do material e com base na ideia de que o projeto de edificações precisa atender múltiplos requerimentos (CHRISTODOULOU *et al.*, 2018), entre eles o próprio processo de fabricação e montagem, a ação de projetar formas complexas traz a necessidade de conhecimentos relacionados a novas técnicas construtivas (AUSTERN; CAPELUTO; GROBMAN, 2018b). Como exemplo podem ser citados a fabricação manual guiada, a fabricação híbrida e a fabricação robótica adaptável (SUN *et al.*, 2018).

Segundo Sun *et al.* (2018), a fabricação manual guiada se baseia nos construtores humanos tendo orientação visual sobre a operação em objetos reais por meio de exibições com uso de realidade aumentada. Já a fabricação robótica adaptável se baseia nas máquinas controladas por um programa que lidam de maneira autônoma com todas as incertezas do local por meio de sensores, avaliando os efeitos da operação e as mudanças do ambiente em tempo real. Por sua vez, a fabricação híbrida pode ser entendida como construtores humanos e máquinas programadas interagindo entre si durante todo o processo (SUN *et al.*, 2018).

Essas técnicas, que podem ser consideradas uma subcategoria do CAD/CAM (CHEN; LIN; SHAO, 2015), possibilitam a construção de formas complexas. No entanto a adoção destas trazem novas restrições construtivas (HACK *et al.*, 2020) que devem ser levadas em consideração desde o momento da concepção arquitetônica e que forcem a adaptação dos processos de projeto para um fluxo digital. Chen, Lin e Shao (2015) afirmam que essa adaptação de fluxo deve servir como impulso aos arquitetos e projetistas para desenvolvimento de novas abordagens projetuais, que levem o processo criativo a novos diálogos e colaboração. Tal adaptação move a indústria da construção para a era digital (SOTO *et al.*, 2018).

Ao tentar conectar a fabricação e a montagem com outras etapas da concepção e construção de formas arquitetônicas complexas, os autores Tepavčević *et al.* (2017) e Austern, Capeluto e Grobman (2018b) buscaram estudar como se pensar o projeto já visando a fabricação. Tepavčević *et al.* (2017) estabeleceram um método de projeto para fabricação baseado em um sistema de produção com uma CNC 2D e conexões de encaixe por fricção. Austern, Capeluto e Grobman (2018b) estudaram como ocorre o processo de fabricação de elementos de concreto com geometria complexa por meio da fabricação das formas e do planejamento do uso da CNC. Com isso, eles introduziram limitantes do processo de fabricação no processo de projeto, mostrando a necessidade da racionalização da forma ainda durante sua concepção³.

Por sua vez, Loing *et al.* (2020) desenvolveram um estudo para criar geometrias de blocos que permitissem a montagem de elementos com duplas curvaturas com uso de braços robóticos. Eles observaram durante o estudo que montagem *in situ* requer técnicas robustas para localizar componentes, visto que o canteiro de obras é um ambiente agressivo e com muito mais variabilidade que um laboratório ou fábrica.

³Segundo estes autores, esta racionalização tem sido negligenciada durante a fase de projeto (AUSTERN; CAPELUTO; GROBMAN, 2018b).

Além das novas abordagens projetuais, o projeto de formas arquitetônicas complexas faz com que os profissionais relembrem a necessidade de saber como construir (AUSTERN; CAPELUTO; GROBMAN, 2018b). Justamente por isso, os autores supracitados defendem, assim como Pottmann *et al.* (2007), que simuladores de fabricação devem ser integrados ao processo de modelagem. Tepavčević *et al.* (2017) corroboram esse pensamento ao afirmarem a importância de o processo de projeto levar em consideração a fabricação e a construção da forma complexa. Ou seja, um dos principais desafios a serem vencidos nesse tipo de projeto é a viabilidade construtiva (TEPAVČEVIĆ *et al.*, 2017) ou a construtibilidade.

O desafio de viabilidade técnico construtiva pode ser encarado com o próprio uso dos algoritmos para geração das formas complexas, isso pois, segundo Agkathidis (2019), há maior acessibilidade por parte de projetistas a ferramentas especializadas, algoritmos e *scripts* de geração e análise da forma. Tais algoritmos podem funcionar como ferramentas de otimização topológica (SALTA *et al.*, 2020), além de introduzir a capacidade de implementar mudanças mais rápidas a estudos de soluções no desenvolvimento do projeto (CAETANO; LEITÃO, 2018). Essas características possibilitam, por exemplo, o estudo de estabilidade estrutural ao mesmo tempo em que se estuda a redução ao mínimo necessário do consumo de material estrutural, como apontado por Salta *et al.* (2020).

Austern, Capeluto e Grobman (2018b) desenvolveram um método computacional para avaliar a construtibilidade de elementos arquitetônicos de concreto com geometria complexa. Os autores notaram que projetos contemporâneos dificilmente podem ser construídos da maneira como foram pensados inicialmente, necessitando de um processo de simplificação e adaptação, processo esse conhecido como racionalização. Já Christodoulou *et al.* (2018) desenvolveram uma ferramenta computacional utilizando o Grasshopper e o Rhinoceros para permitir que projetistas chequem automaticamente critérios de desempenho como área por apartamento, área de terraço, checagem estrutural, horas de sol e carga solar por ambiente e limitações de privacidade.

Outro ponto a ser observado é que o grande número de formas singulares requer a geração automática de seus modelos (NGUYEN; VERTATAS; WEINAND, 2019), o que só é possível por meio do uso de algoritmos generativos. Além disso, tais formas singulares impulsionam a customização em massa (MONIZZA; RAUCH; MATT, 2017), o que reforça o uso de técnicas de fabricação digital e a movimentação da indústria da construção para a era digital, como apontado anteriormente.

Com base nesses pensamentos, o *Fabrication Driven Design* ou projeto orientado a fabricação, conceito trazido por Austern, Capeluto e Grobman (2018b), apresenta a ideia de os projetistas conscientemente usarem geometrias que possam ser construídas por meio de um método específico. Ou seja, no projeto orientado a fabricação, a definição da técnica construtiva e do método de fabricação e montagem é escolhida tradicionalmente antes da forma ser criada. Desse modo, entender os processos e suas limitações configuram etapa importante para a construção do objeto arquitetônico com formas complexas.

Tríade das formas complexas arquitetônicas

Esta RSL trouxe elementos para lidar com a complexidade do processo de criação de formas complexas na arquitetura, sobretudo a necessidade pujante de se considerar o uso de modelagem generativa algorítmica no processo de concepção da forma. Observou-se que todos os trabalhos analisados se utilizam da modelagem paramétrica e da modelagem generativa.

Historicamente, a primeira demanda em relação à adoção das formas arquitetônicas complexas foi a necessidade de representá-las, mas seu uso evoluiu possibilitando aos projetistas não apenas gerar as formas, como também obter um melhor desempenho da edificação por meio da realização de uma série de simulações numéricas e análises na etapa inicial de concepção e projeto.

Essas simulações computacionais permitem o estudo de uma quantidade de cenários que não seria possível com as técnicas tradicionais de projeto arquitetônico, realizando simulações diversas como estruturais, de eficiência energética, de consumo de materiais, de custo de construção, viabilidade construtivas, entre outras.

No entanto, para tal é preciso que os projetistas tenham conhecimento sobre as técnicas construtivas (processos de fabricação e montagem) que serão aplicadas e sobre os materiais que serão utilizados. Ou seja, o uso do projeto paramétrico viabiliza o desenvolvimento de um projeto baseado não só na forma, mas também nas características dos materiais, no processo de fabricação e montagem, e na efetividade da relação entre eles.

Com base nisso, notou-se que três características devem ser consideradas no processo de concepção da forma arquitetônica complexa para que esta tenha eficácia na sua construção. Na Figura 9 a relação entre os materiais utilizados (tecnologia dos materiais – laranja), os processos de fabricação e montagem (fabricação e montagem – verde) e a geração da forma (projeto da forma – vermelho) estão conectados, e juntos formam a base para as formas arquitetônicas complexas (azul).

No projeto paramétrico os materiais que irão compor a arquitetura passam a exercer um papel fundamental na definição da forma a partir das suas características (elasticidade, dureza, maleabilidade, ductibilidade, resistência, entre outras). Logo, para se garantir a eficácia construtiva, fica evidente que é preciso entender as características dos materiais em termos de potencialidades e limitações para a proposição de formas que possam ser sustentadas pelos materiais que a compõem.

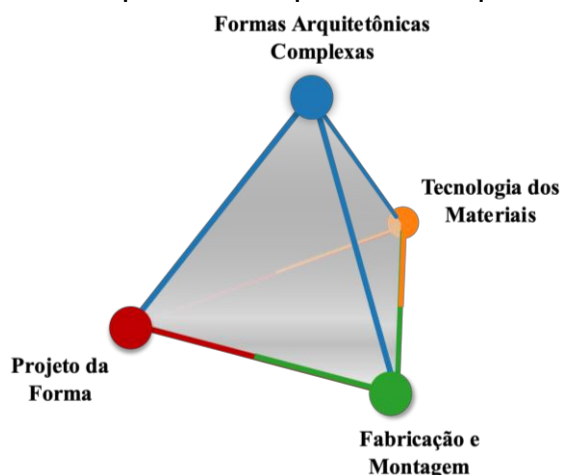
Por outro lado, o processo de fabricação e montagem deve ser aplicável ao material selecionado e para a forma projetada. Por exemplo, não é possível trabalhar com dobras em chapas grossas de madeira, ao contrário de chapas metálicas finas. Desse modo, o material e o processo de fabricação (subtrativo, formativo, aditivo, assim como o próprio maquinário) e montagem (planejamento e construção) passam a definir diretamente a viabilidade da construção da forma.

Além de direcionar o desenvolvimento da forma em consonância com a escolha do material, a preocupação com o processo de fabricação permite a concepção de estruturas que apresentem construtibilidade. Ou seja, a preocupação com a exequibilidade da construção da forma passa a existir antes de outras análises, relacionadas à sua eficiência, como, por exemplo, o tempo de construção.

Por sua vez, o projeto da forma diz respeito à criação do modelo paramétrico, à gestão da informação e à prototipagem para criação da arquitetura. Esse vértice da tríade é alimentado pelas informações e características do material que será utilizado, assim como do processo de fabricação e montagem que será aplicado. Desse modo, os processos de modelagem, o detalhamento, as representações, as simulações, a linguagem de programação que será utilizada, a gestão da informação, as maquetes e os protótipos que serão utilizados, dentre outros, são definidos a partir das informações advindas do material e do processo de fabricação utilizados. Ou seja, para formas arquitetônicas complexas, a materialidade deve influenciar diretamente a geração da forma. Isso pode ser observado por meio dos trabalhos analisados, que evidenciam como alicerces para as formas arquitetônicas complexas a integração entre o processo de geração da forma, as propriedades dos materiais e o processo de fabricação e montagem. Além disso, entender o projeto de formas arquitetônicas complexas como um processo e não simplesmente como a representação de uma forma singular traz a possibilidade de obter melhor eficiência e eficácia ao longo de todo o processo construtivo e vida útil da edificação.

Esta revisão sistemática de literatura mostrou que, apesar de haver estudos que buscaram desenvolver formas arquitetônicas complexas aplicando de maneira integrada os três pontos da tríade apresentada (projeto da forma, tecnologia dos materiais e fabricação e montagem) não existe ainda uma visão sistematizada sobre o tema. Existem propostas que giram em torno de determinado material ou técnica de fabricação específica. Diante disso, percebe-se uma lacuna na área, como a falta de um método consolidado para desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas visando a construtibilidade.

Figura 9 - Tríade de construtibilidade para formas arquitetônicas complexas



Conclusões

A construtibilidade de formas arquitetônicas complexas está ligada diretamente às características dos materiais, ao processo de fabricação e montagem e ao processo de geração da forma. Essa conclusão vem como consequência da revisão sistemática realizada, ainda que nem todos os trabalhos evidenciem a ligação simbiótica que a tríade apresentada traz.

Além dessa tríade, alguns conceitos e termos se relacionam com o tema e podem ser pensados ao se trabalhar com formas complexas, como:

- (a) racionalização;
- (b) gestão da informação;
- (c) desempenho;
- (d) otimização;
- (e) projeto orientado à fabricação;
- (f) simulação da fabricação; e
- (g) dentre outros.

Este trabalho apresenta e discute os resultados de uma revisão sistemática da literatura sobre este tema na qual foram analisados 61 artigos dentre os 142 resultados encontrados, que permitiu compreender como se dá o processo de criação das formas complexas além de indicar lacunas para orientação de futuros trabalhos que venham abordar o tema.

A leitura dos artigos permitiu melhor compreensão sobre o processo construtivo de formas arquitetônicas complexas e como o processo de produção dessas formas envolve os materiais construtivos, os processos de fabricação e a programação para geração do modelo. A lacuna identificada aponta para uma direção de pesquisa que pode contribuir para um desenvolvimento e uso mais amplo desse tipo de concepção arquitetônica.

Além disso, ao buscar as correlações apresentadas neste trabalho foi possível vislumbrar a grande quantidade de materiais, maquinário e ferramentas digitais existentes e aplicáveis no processo de geração, análise e construção dessas formas, além de observar como estes podem interferir na concepção da forma arquitetônica complexa, apontando uma oportunidade de estudos mais aprofundados que as relacionem.

A lacuna apontada servirá como diretriz para o desenvolvimento de futuros trabalhos por parte dos autores. Primeiramente, será investido no estudo sobre a construtibilidade em formas arquitetônicas complexas geradas a partir de modelagem algorítmica, em que se buscará organizar e sistematizar a relação entre as três características para o desenvolvimento desse tipo de arquitetura. Outra possibilidade de estudo futuro é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie na análise quantitativa, de maneira automática, da construtibilidade enquanto se desenvolve a forma arquitetônica complexa.

Referências

- AGKATHIDIS, A. Dark Matter Garden: a case study in algorithmic modelling and digital fabrication of complex steel structures. **Frontiers Of Architectural Research**, v. 8, n. 3, p. 303-310, set. 2019.
- AMANCIO, R. C. A. **Identificação de fatores de construtibilidade que influenciam as fases do processo de projeto em pequenos escritórios de arquitetura – Estudo de Casos em Curitiba (PR)**. Curitiba, 2010. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- ANDERSON, J.; TANG, M. Form follows parameters: parametric modelling for fabrication and manufacturing processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA, 16., Hong Kong, 2011. **Proceedings [...]** Hong Kong: Caadria, 2011.
- AUSTERN, G.; CAPELUTO, I. G.; GROBMAN, Y J. Evaluating the buildability of architectural geometries: embedding fabrication awareness into the design of concrete elements. In: CONFERENCE ON ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING, 6., Singapore, 2018. **Proceedings [...]** Singapore: Ace, 2018b.

- AUSTERN, G.; CAPELUTO, I. G.; GROBMAN, Y. J. Rationalization methods in computer aided fabrication: a critical review. **Automation in Construction**, v. 90, p. 281-293, jun. 2018a.
- BERDOS, Y.; AGKATHIDIS, A.; BROWN, A. Architectural hybrid material composites: computationally enabled techniques to control form generation. **Architectural Science Review**, v. 63, n. 2, p. 154-164, set. 2019.
- BIOLCHINI, J. *et al.* **Systematic review in software engineering**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Relatório Técnico Programa de Engenharia de Sistemas e Computação.
- CAETANO, I.; LEITÃO, A. Integration of an algorithmic BIM approach in a traditional architecture studio. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 3, p. 327-336, nov. 2018.
- CHEN, Z.-R.; LIM, C.-K.; SHAO, W.-Y. Comparisons of practice progress of digital design and fabrication in free-form architecture. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 32, n. 2, p. 121-132, fev. 2015.
- CHRISTODOULOU, A. *et al.* Case study for the application of multidisciplinary computational design assessment and constructability optimisation tools. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE + URBAN DESIGN, 1., Delft, 2018. **Proceedings [...]** Delft: Tu Delft, 2018.
- CORREA, D.; KRIEG, O. D.; MEYBOOM, A. Beyond form definition: material informed digital fabrication in timber construction. **Lecture Notes in Civil Engineering**, p. 61-92, 2019.
- DAHY, H. *et al.* Experimental biocomposite pavilion: segmented shell construction design, material development and erection. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 39., Austin, 2019. **Proceedings [...]** Austin: Acadia, 2019.
- DIMCIC, M. **Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms**. Stuttgart, 2011. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Konstruktives Entwerfen, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011.
- DING, C. S.; SALLEH, H.; KHO, M. Y. Constructability research trends: a review and future directions. **International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology**, v. 115, n. 1, p. 703-17, abr. 2020.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. Design science: the science of the artificial. In: DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design science research: a method for science and technology advancement**. Nova York: 3, 2015.
- DURO-ROYO, J.; MOGAS-SOLDEVILA, L.; OXMAN, N. Flow-based fabrication: an integrated computational workflow for design and digital additive manufacturing of multifunctional heterogeneously structured objects. **Computer-Aided Design**, v. 69, p. 143-154, dez. 2015.
- ERDINE, E.; KALLEGIAS, A. Interwoven reinforced concrete structures: Integration of design and fabrication drivers through parametric design processes. **Design Studies**, v. 52, p. 198-220, set. 2017.
- FRAZER, J. The nature of the evolutionary model. In: FRAZER, J. **An evolutionary architecture**. Londres: Arts Council Of England, 1995.
- GRIFFITH, A. **An investigation into factors influencing buildability and levels of productivity for application to selecting alternative design solutions: a preliminary report**. London: The Chartered Institute of Building, 1987.
- HACK, N. *et al.* Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: a real scale architectural demonstrator. **Automation in Construction**, v. 115, p. 103197-103213, jul. 2020.
- KIFOKERIS, D.; XENIDIS, Y. Constructability: outline of past, present, and future research. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 8, p. 04017035, ago. 2017.
- KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Joint Technical Report, Keele University TR/SE-0401, 2004. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2004.
- KOLAREVIC, B. Digital morphogenesis. In: KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. Nova York: Taylor & Francis Group, 2003.

- LOING, V. *et al.* Free-form structures from topologically interlocking masonries. **Automation in Construction**, v. 113, p. 103117-103133, maio 2020.
- MACHAIRAS, V.; TSANGRASSOULIS, A.; AXARLI, K. Algorithms for optimization of building design: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 101-112, mar. 2014.
- MENGES, A. Material information: integrating material characteristics and behavior in computational design for performative wood construction. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 12., Nova York, 2010. **Proceedings [...]** Nova York: Acadia, 2010.
- MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the prisma statement. **Plos Medicine**, v. 6, n. 7, p. 1000097, jul. 2009.
- MONIZZA, G. P.; RAUCH, E.; MATT, D. T. Parametric and generative design techniques for mass-customization in building industry: a case study for glued-laminated timber. **Procedia Cirp**, v. 60, p. 392-397, 2017.
- NGUYEN, A. C.; VESTARTAS, P.; WEINAND, Yves. Design framework for the structural analysis of free-form timber plate structures using wood-wood connections. **Automation in Construction**, v. 107, p. 102948-120, nov. 2019.
- OXMAN, R. Thinking difference: theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, v. 52, p.4-39, set. 2017.
- POTTMAN, H. *et al.* **Architectural Geometry**. Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2007.
- SALTA, S. *et al.* Adaptable emergency shelter: a case study in generative design and additive manufacturing in mass customization era. **Procedia Manufacturing**, v. 44, p. 124-131, 2020.
- SILVA, J. P. A. da. **As geometrias euclidianas e não-euclidianas**. Rio de Janeiro, 2017. 45 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática) - Curso de Mestrado Profissional em Matemática, Matemática, Instituto de Matemática Pura e Aplicada, Rio de Janeiro, 2017.
- SOTO, B. G. de *et al.* Productivity of digital fabrication in construction: cost and time analysis of a robotically built wall. **Automation in Construction**, v. 92, p. 297-311, ago. 2018.
- SUN, C. *et al.* Hybrid fabrication: a freeform building process with high onsite flexibility and acceptable accumulative error. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 38., Cidade do México, 2018. **Proceedings [...]** Cidade do México: Acadia, 2018.
- TEPAVČEVIĆ, B. *et al.* Design to fabrication method of thin shell structures based on a friction-fit connection system. **Automation in Construction**, v. 84, p. 207-213, dez. 2017.
- WILLMANN, J. Robotic timber construction: expanding additive fabrication to new dimensions. **Automation in Construction**, v. 61, p. 16-23, jan. 2016.
- YANG, X.; LOH, P.; LEGGETT, D. Robotic variable fabric formwork. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 3, p. 404-413, out. 2018.
- YAZICI, S.; TANACAN, L. Material-based computational design (MCD) in sustainable architecture. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101543, nov. 2020.

Bruno Leão de Brito

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura | Universidade Federal da Bahia | Rua Caetano Moura, 121, Federação | Salvador - BA - Brasil | CEP 40210-905 | Tel.: (71) 99253-2840 | E-mail: leaodebrito@gmail.com

Felipe Tavares da Silva

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal da Paraíba | Cidade Universitária | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58051-900 | Tel.: (83) 3216-7200 | E-mail: felipe.tavares@academico.ufpb.br

Érica de Sousa Checucci

Núcleo de Expressão Gráfica, Simulação, Projeto e Planejamento, Faculdade de Arquitetura | Universidade Federal da Bahia | Rua Caetano Moura, 121, Federação | Salvador - BA - Brasil | CEP 40210-905 | Tel.: (71) 3283-5882 | E-mail: erica.checucci@ufba.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.