

Digital Fabrication Techniques: A systematic literature review

Bárbara L. Felipe

UFPB e UFERSA | Brasil | BarbaraLFelipe@gmail.com

Carlos Nome

UFPB | Brasil | Carlos.Nome@gmail.com

Abstract

The materialization of architectural forms uses new processes aided by digital manufacturing techniques (FD). Five FD techniques stand out: sectioning (serial planes), tessellation, folding, contouring, and forming. This article's objective is to characterize the state of the art of these techniques, from 2009 to 2020 in national and international research bases. The Systematic Literature Review is used from three stages and nine protocol phases. The results indicate the techniques, methods, computer simulations, and applicability in more recurrent materials.

Keywords: Digital Fabrication techniques; Digital Fabrication; Algorithmic Architecture; Parametric Design.

INTRODUÇÃO

O artigo tem como objetivo caracterizar o estado da arte das técnicas de fabricação digital elencadas por Iwamoto (2009), a partir de uma revisão sistemática da literatura. Nesse contexto, entende-se que os processos de modelagem paramétrica e algorítmica estão atrelados à simulação computacional e fabricação digital. Dessa maneira, pesquisou-se os métodos de projeto em desenvolvimento, ensaios aplicados no ambiente virtual e protótipos realizados sob essa ótica.

A arquitetura quando idealizada digitalmente pode ser subsidiada por parâmetros, sistemas dinâmicos e algoritmos (Kolarevic, 2003). O pensamento algorítmico aplicado ao design paramétrico permite a expressão de parâmetros e regras, elas definem a relação entre a intenção e a resposta do projeto (Jabi, 2013). Desse modo, por exemplo, é possível relacionar a geometria da arquitetura e os condicionantes dos materiais construtivos na forma de parâmetros (Kolarevic, 2000).

Então, se o design paramétrico depende da configuração de parâmetros, é necessário estabelecer as regras que regem o escopo de soluções no início do projeto. Essas regras também são denominadas de "parâmetros de input" (Jabi, 2013). Esses parâmetros são transformados em variáveis e, posteriormente em definição computacional ou algorítmica para gerar os resultados. As questões formuladas podem ter uma relação interdependente com os outros parâmetros ou ainda isoladas entre si; assim, a cada variação gera-se um novo resultado (R. Oxman, 2006).

O design paramétrico possibilita a concepção de projetos em um ambiente interativo, no qual é viável avaliar e comparar diferentes soluções até encontrar a mais eficiente (N. Oxman & Rosenberg, 2007; Tamke & Thomsen, 2008). Somadas a isso, há tecnologias que

auxiliam o projetista nesse processo, tais quais: fabricação digital e da prototipagem rápida. Elas subsidiam a materialização de novas formas arquitetônicas. Essas tecnologias são embasadas nos dados do projeto para serem interpretados por máquinas e a partir disso, desenvolvem elementos, peças de design ou de equipamentos (Iwamoto, 2009).

Como já apontado, o objetivo desta pesquisa é caracterizar o estado da arte das cinco técnicas, elencadas por Iwamoto (2009). Essas técnicas são o seccionamento (*sectioning* ou planos seriados), tesselação (*tessellation*), dobra (*folding*), contorno (*contouring*) e a formação (*forming*). O estado da arte foi embasado em uma revisão sistemática, na qual foram utilizados protocolos com temas pré-determinados e aplicados às principais bases de dados acadêmicas internacionais e nacionais.

TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

Os projetos que utilizam design paramétrico são caracterizados por transformações que fomentam novas estruturas e possibilidades arquitetônicas (Kolarevic, 2001). A materialização desses projetos, normalmente são realizadas a partir de protótipos que auxiliam no entendimento das conexões das estruturas e formas. Nos protótipos é possível testar materiais, conexões estruturais e estratégias para mitigar o impacto ao clima. A utilização de protótipos influenciam na arquitetura e serve como chave da abordagem paramétrica (Yuan, 2016).

Os métodos que utilizam a prototipagem rápida (PR) suportam o processo criativo ao produzir variações de um elemento ou conjunto de objetos. Assim, uma característica da PR é o suporte aos estudos da forma, do espaço, da estrutura e dos materiais na construção. Os métodos de PR auxiliam as técnicas convencionais de modelagem e fabricação, na qual reduzem o tempo de execução e de simulação (Sass & Oxman, 2006). No

mesmo sentido, há a fabricação digital (FD) que utiliza técnicas destinadas à produção de formas ou elementos de uma edificação, com o auxílio de equipamentos de controle numérico (CNC) (Pupo & Celani, 2011). Em decorrência do acesso a esses processos, os arquitetos estão, cada vez mais, se envolvendo nos processos de fabricação dos projetos arquitetônicos (Kolarevic, 2003).

Com esse foco, Iwamoto (2009) disserta sobre cinco técnicas que auxiliam no design da forma a partir de aspectos-chave: seccionamento, tesselação, dobra, contorno e formação. Cada técnica descrita deve ser aplicada no início do processo de projeto e interpretados por processos de CAD / CAM (Dunn, 2012).

A primeira técnica é de seccionamento (*sectioning*), ela simplifica o processo de construir elementos complexos ou com formas curvilíneas (Iwamoto, 2009), ver Figura 1. Na forma pretendida são realizados cortes no formato de planos seriados, o que facilita o processo de fabricação em máquinas de corte à laser ou em fresadoras (Dunn, 2012).



Figura 1 - One Main Office. Fonte: Archdaily (2020)

A técnica de tesselação (*tesselation, tiling*) simplifica padrões geométricos bidimensionais ou tridimensionais que podem ser aplicados em elementos ou na envoltória da edificação (Iwamoto, 2009). As planificações das formas auxiliam no processo de execução, facilitam na redução do tempo e na aplicabilidade dos materiais, ver Figura 2 (Dunn, 2012).



Figura 2 - Airspace-Tokyo. Fonte: STUDIO (2020)

A técnica de contorno (*countoring*) é utilizada quando os materiais são dispostos em camadas, a partir da sobreposição de superfícies e criando um relevo tridimensional (Figura 3). Esse processo ocorre a partir da subtração das formas em materiais distintos com espessuras e cores variadas (Dunn, 2012; Iwamoto, 2009).



Figura 3 - Exemplo de countoring. Fonte: Iwamoto (2009).

A dobra (*folding*) é uma técnica de fabricação digital que se baseia na produção de vincos para dobrar no material as superfícies bidimensionais e transformá-las em tridimensional (Figura 4). Desse modo, é possível combinar diversos materiais com escalas variadas para gerar objetos tridimensionais (Dunn, 2012; Iwamoto, 2009).



Figura 4 - Terminal Internacional de Yokohama. Fonte: ArchDaily (2020)

Por fim, a última técnica de fabricação é denominada formação (*forming*) e auxilia na produção de moldes e formas. Ela é aplicada na produção em massa ou em elementos que serão repetidos, ver Figura 5 (Dunn, 2012).



Figura 5 - American Cement Company's. Fonte: Architectuul (2020)

As publicações sobre as pesquisas relacionadas a esses temas é algo recente. Não foi encontrado nenhum registro que sistematize os métodos, resultados e dados que foram encontrados nos últimos 10 anos de publicações em periódicos. Necessita-se identificar qual o estágio de o desenvolvimento e como as novas aplicações das técnicas apontadas por Iwamoto (2009) auxiliam no nicho da indústria de arquitetura, construção e engenharia.

METODOLOGIA

O método utilizado foi a Revisão Sistemática da Literatura (Dresch, Lacerda, & Júnior, 2015; Tranfield, Denyer, & Smart, 2003) com protocolos de revisão pré-determinados em três etapas e com nove fases de pesquisa (Quadro 1).

Quadro 1 – Revisão sistemática de Tranfield (2003)

Etapa 1 - Planejando a revisão
Fase 0 - Identificação da necessidade de uma revisão
Fase 1 - Preparação de uma proposta de revisão
Fase 2 - Desenvolvimento de um protocolo de revisão
Etapa 2 - Realizando uma revisão
Fase 3 - Identificação da pesquisa
Fase 4 - Seleção de estudos
Fase 5 - Avaliação da qualidade do estudo
Fase 6 - Extração de dados e monitoramento do progresso
Fase 7 - Síntese de dados
Estágio em relatórios e divulgação
Fase 8 - O relatório e recomendações
Fase 9 - Colocar evidências em prática

Fonte: Tranfield (2003) traduzido pelos autores

A etapa 1 é o planejamento da revisão que consiste na construção do estado da arte das técnicas de fabricação digital de Iwamoto (2009). Na Etapa 1 / Fase 0 buscou-se nas bases de dados, os artigos que se relacionam as técnicas de fabricação digital de forma sistematizada, no entanto não foram encontrados nas pesquisas. Assim, a partir da lacuna sobre o tema, ou seja, ausência de pesquisas científicas que abordem explicitamente as técnicas de fabricação digital discutidas por Iwamoto (2009) identificou-se a necessidade da revisão aqui desenvolvida. Esta demanda é acentuada pela crescente utilização da modelagem paramétrica no mercado arquitetura, engenharia e design que fomentam novos nichos na indústria e no comércio (Celani & Pupo, 2008).

A Etapa 1 / Fase 1 denominada “Preparação de uma proposta de revisão” determinou que a pesquisa, inicialmente, abrangerá os seguintes bancos de dados: *Science Direct*, CumInCAD e Periódicos da Capes. Apesar disso, reconhece-se que há outras bases de pesquisas, no entanto por ser um artigo, limitou-se a tratar, apenas, os resultados dessas bases de dados. O portal *ScienceDirect* (SD) é uma plataforma administrada pela Elsevier e se destaca por ter mais de catorze milhões de publicações de mais de 3.800 revistas e mais de 35.000 livros. A base de dados do CumInCAD (CD) agrega as principais publicações dos congressos das sociedades digitais que abordam o projeto arquitetônico auxiliado por computador, tais quais: ACADIA, CAADRIA, eCAADe, SIGraDi, ASCAAD e CAAD futures. O Portal de Periódicos da Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) (PC) reúne a produção científica internacional e nacional e abrange um acervo com cento e trinta bases referenciais. Essa base de dados é financiada pelo governo brasileiro e foi criada para centralizar a informação científica.

Assim, para análise dos artigos coletados foram utilizados os seguintes protocolos de revisão, a fim de constituir a Fase 2 da Etapa 1 (Quadro 2):

Quadro 2 - Protocolos de revisão

1.	Artigos de revisão e artigos de pesquisa
2.	Intervalo de tempo de 2009 – 2020;
3.	Revisados por pares;
4.	Idioma: Português, Inglês e espanhol;
5.	A busca dos termos restritos ao campo: “Título, resumo e palavras chave” dependendo da nacionalidade da base de dados
	— Sectioning/ planos seriados/ planos em série/ seccionamento,
	— Tessellation/Tesselação/ panelling
	— Folding/ dobra;
	— Contouring/ contorno;
	— Forming/ formação.
6.	Para restringir ao tema adicionou-se os seguintes complementos:
	— Architecture/ arquitetura/ arquitetura
	— Parametric design/ design paramétrico
	— Digital fabrication/ fabricação digital

Fonte: Autores (2020)

Após isso, identificou-se os artigos que abordam os termos determinados no protocolo de revisão (Etapa 2/ Fase 4) e foram excluídos os artigos duplicados ou fora da temática de fabricação digital aplicada a arquitetura (na Etapa 2 / Fase 5 e 6).

Nas fases seguintes, foram realizadas a síntese dos dados com análise dos resultados. Nessa fase, identificou-se as metodologias, as técnicas de fabricação digital utilizadas que se assemelham em cada artigo e bem como processos de análise dos resultados apresentados. Os resultados demonstrados são um recorte de uma síntese mais abrangente. Esta aborda outros grupos temáticos relevantes para o cenário atual, tais quais objetivos, resultados, com as convergências e divergências entre os temas.

RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse artigo estão limitados as buscas realizadas nas bases de dados do *Science Direct*, CumInCAD e Periódicos da Capes. Assim, buscou-se nessas bases os artigos que abordem o estado da arte e revisão sistemática das técnicas discutidas por Iwamoto (2009). No entanto, nenhum dado foi encontrado sobre o assunto ou ainda, que tivesse explícita essa compilação dos resultados.

A primeira etapa, realizada entre os dias nove de março de 2020 e onze de março de 2020, da pesquisa determinou a quantidade de resultados ao aplicar apenas a palavras chaves: “sectioning”, “tessellation”, “folding”, “contouring” e “forming” nos campos de busca; assim têm-se os resultados no Quadro 3:

Quadro 3 – Quantitativo geral dos temas

Tipo	Intervalo de tempo	Título, resumo e Palavras-chave	Total por tema
Review articles,	2009-2020	Sectioning	9076
Research articles		Tessellation	416
		Folding	9883
		Contouring	2182
		Forming	36016

Fonte: Autores (2020)

Diante da pesquisa realizada e da quantidade de resultados, eliminou-se a primeira forma de busca, uma

vez que foram encontrados cinquenta e sete mil e duzentos e quarenta e três (57.243) resultados. Assim, a fim de obter um resultado mais restrito, foi realizada uma nova busca adicionando as palavras: "architecture", "parametric design" e "digital fabrication" e os marcadores (ou strings) "AND" e "OR" para auxiliar na busca nas bases de dados. Diante disso foi posto no campo "artigos com esses termos" as seguintes palavras: ("sectioning") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)" ("forming") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)" ("tessellation") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)" ("contouring") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)" ("folding") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)"

Quadro 4 – Resultado das buscas

Título, resumo e Palavras-chave	Artigos com esses termos	SD	CD	PC
Architecture	("sectioning") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)"	39	3	3
	("forming") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)"	47	0	71
	("tessellation") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)"	6	11	7
	("contouring") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)"	8	2	3
	("folding") AND ("architecture") AND ("digital fabrication") AND (parametric design)"	20	14	57

Fonte: Autores (2020)
Nota: Science Direct (SD), CumInCAD (CD) e Portal de Periódicos da Capes (PC)

Os resultados obtidos se enquadram no protocolo de revisão e somam duzentos e noventa e um (291) artigos, que foram divididos entre as técnicas de fabricação digital (Quadro 5).

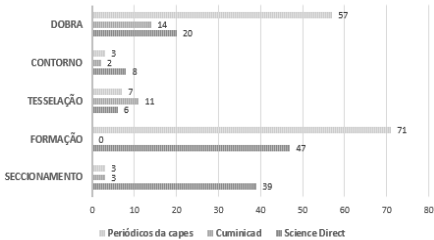
Quadro 5 – Quantitativo geral dos temas

Tema	Título, resumo e palavras-chave	Total por tema
Dobra	(Folding)	91
Contorno	(Contouring)	13
Tesselação	(Tessellation)	24
Formação	(Forming)	118
Seccionamento	(Sectioning)	45

Fonte: Autores (2020)

Os artigos foram categorizados a partir das bases de pesquisas: *Elsevier/ScienceDirect* contabiliza cento e vinte (120) artigos, a CumInCad com trinta (30) artigos e o Periódicos da Capes com cento e quarenta e um (141) artigos por tema de pesquisa, como o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Distribuição dos temas por tema x base da dados



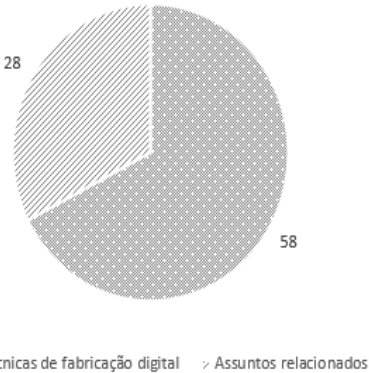
Fonte: Autores (2020)

Após realizada a pesquisa foram identificados os artigos duplicados ou aqueles que não abordavam a área da arquitetura (na Etapa 2 / Fase 5 e 6). As palavras inseridas nas pesquisas são comuns a outras áreas de estudos, tais quais: área de arquitetura naval, medicina, técnicas laboratoriais, engenharia mecânica, paleontologia, geociências, física e engenharia dos materiais, como por exemplo o artigo de Ouagne et. al (2013) que pesquisa a geometria de um tetraedro como aplicação para uma malha econômica na arquitetura de tecidos.

Ainda nessa busca, encontrou-se alguns artigos que estavam presentes em uma ou mais temas; ou ainda em várias bases de pesquisas de forma duplicata. Contudo, foram encontrados duzentos e vinte e cinco (225) artigos que não abordam o objetivo da pesquisa.

Desse modo, resultou em oitenta e seis (86) artigos que abordam as técnicas de fabricação digital (Iwamoto, 2009) e temas relacionados a arquitetura, design paramétrico e fabricação digital. Assim, têm-se a primeira divisão dos artigos, na qual cinquenta e oito (58) artigos abordam as técnicas de fabricação digital com experimentos e abordagem diretas e os outros artigos, que somam o número de vinte e oito (28) que possuem uma exploração relacionada a revisão de literatura dos temas, histórico sobre fabricação digital, design paramétrico com experimentações teóricas, conforme o gráfico 2.

Gráfico 2 – Quantitativo geral dos artigos encontrados



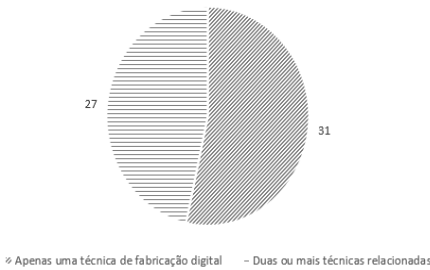
Fonte: Autores (2020)

Essa pesquisa tem como objetivo analisar os cinquenta e oito (58) artigos encontrados que abordam técnicas de

fabricação digital como assunto primário ou secundário do trabalho publicado. Com isso, ao analisar os artigos percebeu-se que há trabalhos que abordam apenas uma técnica de fabricação digital (Dobra, Contorno, Tesselação, Formação e Seccionamento) e também há trabalhos que abordam mais de uma técnica de fabricação digital simultaneamente. Ou seja, utilizam a técnica de dobra para definir um padrão de tesselação, ou ainda seccionamento e formação, por exemplo.

De acordo com a análise, foram encontrados trinta e um (31) que artigos que abordam apenas uma técnica de fabricação digital e vinte e sete (27) exemplares que abordam mais de uma técnica (Gráfico 3).

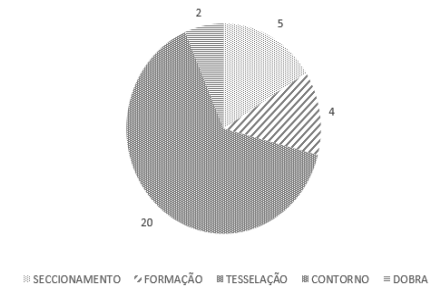
Gráfico 3 – Quantidade de técnicas utilizadas em cada trabalho



Fonte: Autores (2020)

A pesquisa encontrou trinta e um (31) artigos que abordam apenas uma técnica de fabricação digital. No qual, o maior número de trabalhos aborda: a tesselação com vinte (20) artigos, seccionamento com cinco (5) exemplares, formação com quatro (4) artigos e dois (2) trabalhos que abordam a técnica de dobra. Nessa pesquisa, não foram encontrados artigos que utilizem a técnica de contorno como assunto principal (Gráfico 4).

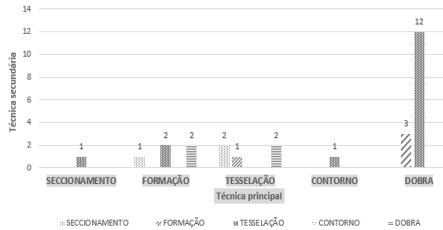
Gráfico 4 – Artigos que abordam apenas uma técnica de fabricação digital



Fonte: Autores (2020)

Ainda nessa pesquisa, foi possível identificar vinte e sete (27) artigos que abordam mais de uma técnica. Assim, há combinações entre as técnicas principais (eixo horizontal) com as técnicas secundárias (eixo vertical) e a quantidade de ocorrências (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Artigos que abordam mais de uma técnica de fabricação digital



Fonte: Autores (2020)

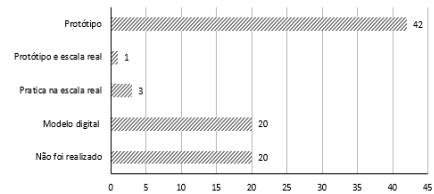
Os artigos analisados também possuem outros pontos de similaridades, como por exemplo: os tipos de métodos utilizados. Assim, há artigos que foram desenvolvidos a partir de uma metodologia de pesquisa aplicada, na qual foi auxiliada pela a descrição do processo do experimento ou ainda, embasada em estudos de caso. Outros artigos foram utilizados métodos que fundamentados em uma revisão de literatura com etapas experimentais da forma e realização de modelos digitais ou maquetes físicas. Isso resultou em artigos no qual a análise foi realizada de forma indutiva ou dedutiva, o que compõe parte do processo de desenvolvimento da pesquisa.

Ainda nesse sentido, também se destaca-se os três elementos mais correntes nas buscas: se a **modelagem paramétrica foi utilizada como indutor da forma**, a **escala** que a pesquisa foi realizada: um protótipo, um modelo digital ou a produção em escala real e por fim, se houve **simulação** computacional de conforto ambiental, estrutural ou ainda algum avanço nas técnicas de fabricação digital (aliadas ou não a estrutura).

Nessa pesquisa foram encontrados sessenta e seis artigos que tratam da modelagem paramétrica como indutor da forma e vinte e seis artigos que abrangem outros assuntos, tais quais: relatos de experiências pedagógicas, análises projetuais ou ainda, revisão de literatura de um tema específico.

Os artigos que tratam escala da aplicação proposta foram divididos em modelos que foram concebidos digitalmente, protótipos que foram realizados, escalas reais de construção (prática) e proposições que mesclam protótipos e escala real (Gráfico 6).

Gráfico 6 – Artigos que tratam de escala

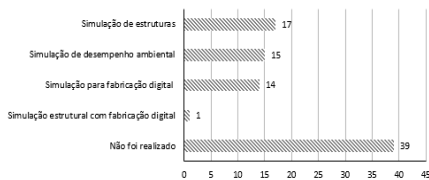


Fonte: Autores (2020)

Por fim, foram caracterizados os artigos que abordam a simulação computacional. Encontrou-se pesquisas que utilizaram a simulação no âmbito da estrutura, do conforto ambiental (desempenho) e como forma de avançar nas

discussões da fabricação digital. Algumas pesquisas também foram realizadas unindo a fabricação digital e a estrutura e outras pesquisas não realizaram nenhuma dessas análises (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Artigos que tratam de simulação computacional



Fonte: Autores (2020)

Contudo, caracterizou-se as técnicas de fabricação digital com as categorias acima apresentadas, relacionando quantitativamente com os artigos e ocorrência de cada um dos temas. Desse modo, tem-se que nos dezessete artigos que abordam a técnica de Dobra, há quinze trabalhos que usam a modelagem paramétrica como indutor da forma e dois que não utilizam. Sobre a simulação de computacional há cinco trabalhos que realizaram simulação estrutural, dois artigos que utilizam simulação de desempenho ambiental, três artigos que utilizam a simulação para a fabricação digital e sete que não realizaram nada. A análise da técnica de formação inclui dez artigos, no qual oito artigos apresentaram modelagem paramétrica como indutor da forma; três artigos utilizam simulação de desempenho estrutural, dois trabalhos fizeram uso da simulação para fabricação digital, um artigo para simulação de desempenho ambiental e quatro artigos não realizaram nenhum experimento. Sobre a escala oito artigos chegaram na etapa de protótipo, sendo um deles na escala real, apenas um artigo teve a experimentação prática e outro não se aplica.

Nos seis artigos que abordam o seccionamento como técnica principal, há cinco trabalhos que abordam a modelagem paramétrica como indutor da forma e realizam protótipos nos seus trabalhos e apenas um artigo que utiliza simulação estrutural como forma de análise. Ressalta-se que há um artigo que descreve processos analógicos de obtenção de dupla curvatura com peças padronizadas.

A técnica de tesselação possui o maior número de exemplares com vinte e cinco trabalhos, na qual vinte e três utilizaram a modelagem paramétrica como indutor da forma. No tema de simulação computacional, têm-se que quatro trabalhos realizaram simulação ambiental e outros quatro artigos simulação estrutural, seis exemplares utilizaram a simulação para fabricação digital e um deles realizou a combinação de simulação estrutural com fabricação digital e sete artigos não realizaram nada. Sobre a escala, encontrou-se que onze artigos realizaram modelos digitais, doze artigos fabricaram protótipos reais e dois não realizaram nada. Por fim, o único artigo de contorno possui modelagem paramétrica como indutor da forma, simulação computacional para alcançar a fabricação digital e realizou um protótipo ao fim do seu experimento.

Essa divisão embasa o segundo agrupamento temático que aborda: quais foram as **técnicas de fabricação digital** utilizadas, quais foram os **métodos** mais recorrentes e a **análise** dos modelos que foram produzidos. Desta divisão emergem os resultados e discussões sobre as técnicas apresentadas nos artigos.

DISCUSSÕES

A revisão sistemática da literatura mostra que sessenta e seis artigos utilizam a modelagem paramétrica como indutor da forma. A modelagem paramétrica é aplicada a partir de um embasamento teórico ou realizada para posterior análise dos resultados da forma. Esta, por sua vez, geralmente é o resultado de aplicações em oficinas realizadas pontualmente com estudantes, profissionais ou projetistas. Em menor número, também foram encontrados artigos que são resultados de disciplinas acadêmicas que utilizam modelagem paramétrica como componente. Assim, há um comparativo no caminho adotado por cada discente e uma discussão analítica sobre o resultado gerado.

A conformação do modelo, ou ainda, a modelagem como indutora da forma também é a mais recorrente quando os artigos foram analisados pelas óticas das “técnicas de fabricação digital”. Elas variam entre conformação a partir de técnicas de dobradura ou origami, técnicas aplicadas para determinar novos padrões de tesselação e análise da gramática da forma. Em menor número, aparecem técnicas que aplicam a conformação em estruturas embasadas na bioarquitetura, aplicação da forma a partir da fabricação digital e aplicações utilizando métodos robóticos.

Os artigos utilizam diversos tipos de métodos, mas o maior número utiliza a pesquisa aplicada com caráter descritivo do processo e aplicações em estudos de caso de forma comparativa. Geralmente, os métodos são embasados por revisões de literatura – que mostram o panorama das técnicas de fabricação digital utilizadas – após realizado isso, o processo é descrito de forma detalhada e a implementação em um estudo de caso. Por fim, as análises são comparativas (entre um ou mais estudos) e tem o caráter experimental.

Nesse processo de análise dos métodos foram encontrados, em menor número, discussões que retroalimentassem ou refinassem a modelagem paramétrica como meio de induzir a forma. A condução dos estudos de caso é semelhante e para obter um estudo comparativo há pequenos fatores que modificam.

Destaca-se também que não foram encontrados estudos comparativos entre dois métodos distintos e parâmetros substanciais que modifiquem o resultado. Bem como, um número reduzido de experimentos focados apenas em um tema de interesse. Assim, as pesquisas realizadas nos trabalhos, por vezes, não deixam claro os avanços realizados a partir daquela proposição.

Essa discussão leva ao próximo item que trata da **escala** dos resultados da pesquisa. Os estudos de caso realizados podem ser representados por protótipos, modelos digitais ou elementos em escala real. Assim, as pesquisas que exploram materiais como concreto,

alvenaria, papel e madeira de forma empírica. A madeira se destaca nos artigos pela a sua facilidade em deformar, o custo reduzido e o acesso dos projetistas envolvidos. Os materiais mais complexos – alvenaria e concreto – são utilizados de forma experimental e em ambiente controlado, tal qual laboratório ou indústrias. Esses relatos aparecem em menor número pela complexidade dos materiais, a associação aos pré-requisitos estruturais de tração e compressão e a utilização de maquinários específicos. Desse modo, as experimentações em materiais como madeira ou papel são mais recorrentes e somam a maioria das experiências com técnicas de fabricação digital.

Por fim, na fase de **análise**, normalmente, os estudos de caso são submetidos a **simulação computacional**. Nessa fase, os protótipos ou modelos digitais são submetidos a condições específicas que variam fatores de conforto ambiental (ventilação, iluminação e acústica) e estrutural que abrange a adequabilidade em parâmetros de flexibilidade, torção e deformação do elemento proposto. Essas simulações embasam as análises e resultam na comparação entre os estudos de caso. Assim, podem variar o tipo, espessura e características técnicas do material, podem ser aplicadas na variação das condições climáticas e na mudança da forma arquitetônica proposta.

CONCLUSÕES

A partir da aplicação da revisão sistemática da literatura embasada com protocolos de revisão foi possível reforçar aspectos qualitativos e quantitativos acerca do panorama das pesquisas sobre fabricação digital. Nesse sentido, as pesquisas são, em grande maioria, do tipo aplicada com caráter descritivo e do tipo comparativo.

Os artigos demonstram que as aplicações da modelagem paramétrica estão atreladas a um conhecimento teórico que embasam protocolos e parâmetros para a geração de resultados. Por exemplo, no uso da biomimética como componente da conformação no *The Scales Biodigital System Pavilion* abordado no artigo de Estévez & Navarro (2017), também no artigo de Reichert *et al.* (2014) que utiliza a tesselação (padrão têxtil, nesse caso) aplicada ao desenvolvimento de uma conformação com auxílio da robótica para a fabricação de um protótipo ou no artigo de Stavric & Wiltsch (2016) que aborda a dobra como forma de modificar a forma da envoltória afim de gerar uma tesselação.

Os artigos muitas vezes são relatos descritivos de experiências de uma atividade pedagógica ou profissional com o tema da fabricação digital. Foi possível observar artigos que a atividade com o autor na posição de observador, no qual os participantes interagem com a técnica proposta, seja ela formação, tesselação, dobradura, contorno ou seccionamento e ainda como projetista.

Essas atividades, geralmente, são uma experimentação com projetistas ou com discentes. Elas são feitas em formato de um dia de trabalho ou ainda na disciplina. Para isso, os envolvidos são submetidos a atividades para resultar em uma forma proposta no início (como um origami) ou como resultado (forma livre). Essa forma pode ser real ou de caráter digital, assim, usualmente as

pesquisas são embasadas na produção de modelos digitais, protótipos e estruturas reais. Eles são denominados de estudos de caso e ao fim do processo há uma comparação entre os resultados obtidos. Assim, há uma legitimação dos processos aplicados e validação dos resultados.

Nos processos relatados nos artigos, os materiais mais utilizados são os com capacidade de se deformar, tais quais madeira e cartão. Desse modo, artigos utilizam as técnicas dobradura para indução ou como meio para alcançar a forma. Percebeu-se também o uso das técnicas manuais aliadas aos softwares digitais como forma demonstrar na prática o conhecimento teórico recebido na explanação prévia.

As análises dos artigos demonstram que as simulações de conforto e estrutura realizadas nos protótipos são capazes de alcançar fatores determinados pelas normas. No entanto, não foi encontrada uma discussão que proponha novas meios ou novos parâmetros para normas pré-estabelecidas. A implementação da modelagem paramétrica, mostra-se eficaz quando aplicada como gerador de forma arquitetônica. No entanto nota-se que com este foco, perdem-se oportunidades de avanços no embasamento de avanço teórico científico e que possa ser rebatido na prática.

Por fim, nota-se ainda que os processos de detalhamento, ajustes projetuais, uniões e montagem são o foco de poucos dos artigos revisados. As questões associadas à motivação da escolha das técnicas adotadas, bem como processos de fabricação poderiam dar suporte a discussões estruturadas sobre o papel destes nos contextos tanto de prática como ensino contemporâneo de arquitetura, urbanismo e design.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura (PPGAU) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB/PB), a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA/RN), ao Laboratório de Modelos e Protótipos (LM+P/UFPB) e ao Grupo de Pesquisa Alpendre: arquitetura e representação (UFERSA/RN).

REFERÊNCIAS

- Archdaily. (2020). Revitalização One Main Office. Recuperado 2 de outubro de 2020, de https://www.archdaily.com.br/br/789806/one-main-office-renovation-decoi-architects?ad_medium-gallery
- ArchDaily Brasil. (2020). Terminal Internacional de Passageiros de Yokohama. Recuperado 2 de outubro de 2020, de <https://www.archdaily.com.br/br/792391/classicos-da-arquitetura-terminal-internacional-de-passageiros-de-yokohama-foreign-office-architects-foa>
- Architectuul. (2020). American Cement Building. Recuperado 2 de outubro de 2020, de <http://architectuul.com/architecture/american-cement-building>
- Celani, M. G. C., & Pupo, R. T. (2008). Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para Arquitetura e Construção: Definições e Estado da Arte no Brasil. *Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo*, 8(1).
- Dresch, A., Lacerda, D. P., & Júnior, J. A. V. A. (2015). *Design Science Research. Método de Pesquisa Para Avanço da Ciência e Tecnologia* (Edição: 1ª). Bookman.

- Dunn, N. (2012). *Digital Fabrication in Architecture* (Edição: 01). London: Laurence King.
- Estévez, A. T., & Navarro, D. (2017). Biomanufacturing the Future: Biodigital Architecture & Genetics. *Procedia Manufacturing*, 12(December 2016), 7–16. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.002>
- Iwamoto, L. (2009). *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques* (144 p. edi). New York: Princeton Architectural Press.
- Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. Londres: Laurence King Publishing.
- Kolarevic, B. (2001). Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. In *Reinventing the discourse - How digital tools help bridge and transform research, education and practice in architecture: Proceedings of the twenty first annual conference of the association for computer-aided design in architecture* (p. 268–278). Buffalo, NY: Association for Computer-Aided Design in Architecture.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing* (Edição: 1). New York; London: Taylor & Francis Group.
- Kolaveric, B. (2000). Digital Architectures. In *Eternity, Infinity and Virtuality in Architecture: Proceedings of the 22nd Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture* (p. 251–256). Washington D.C.: Catholic University.
- Ouagne, P., Soulat, D., Moothoo, J., Capelle, E., & Gueret, S. (2013). Complex shape forming of a flax woven fabric; Analysis of the tow buckling and misalignment defect. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 51, 1–10. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.017>
- Oxman, N., & Rosenberg, J. L. (2007). Material-based Design Computation: an Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators. *International Journal of Architectural Computing* 5, 5(1), 26–44. Recuperado de <https://doi.org/10.1260/147807707780912985> de
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Pupo, R., & Celani, G. (2011). Prototipagem rápida e fabricação digital na arquitetura: fundamentação e formação. In *O Processo de Projeto em Arquitetura: da Teoria à Tecnologia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J., & Menges, A. (2014). Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. *CAD Computer Aided Design*, 52, 27–39. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.005>
- Sass, L., & Oxman, R. (2006). Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies*, 27(3), 325–355. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.009>
- Stavric, M., & Wiltse, A. (2016). Quadrilateral Patterns for Rigid Folding Structures. *International Journal of Architectural Computing*, 12(1), 61–79.
- STUDIO, F. (2020). AIRSPACE TOKYO. Recuperado 2 de outubro de 2020, de <https://faulders-studio.com/AIRSPACE-TOKYO>
- Tamke, M., & Thomsen, M. R. (2008). Designing Parametric Timber. *Architecture "in computo": Integrating methods and techniques*, 609–616.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Yuan, P. (2016). Parametric regionalism. *Architectural Design*, 86(2), 92–99. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/ad.2029>