

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**ESTUDO DOS AVANÇOS DA TECNOLOGIA DE
IMPRESSÃO 3D E DA SUA APLICAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Thomás Monteiro Sobrino Porto

2016



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO DOS AVANÇOS DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D E DA SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

Thomás Monteiro Sobrino Porto

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Santos

Rio de Janeiro
NOVEMBRO DE 2016

ESTUDO DOS AVANÇOS DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D E DA
SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

Thomás Monteiro Sobrino Porto

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Jorge dos Santos, D Sc.

Prof^a. Alessandra Conde de Freitas, D.Sc.

Prof^a. Ana Catarina Jorge Evangelista, D. Sc.

Prof^a. Isabeth Mello

Prof. Willy Weisshuhn

Prof. Wilson Wanderley

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO de 2016

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino

Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil, Rio de Janeiro/ PORTO, T. M. S. – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2016.

XI, 80p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge Santos

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Curso de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 74 – 80

1. Impressão 3D. 2. Construção Civil. 3. Prototipagem Rápida. 4. Manufatura Aditiva.

I. Jorge dos Santos II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Engenheiro Civil.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Luís Cristovão de Moraes Sobrino Porto e Maria Clara Monteiro Sobrino Porto, por toda atenção e apoio incondicional. Nos momentos felizes e tristes sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço aos meus irmãos Lucas, Marcos, Isabel e André pelos exemplos que são para mim e pelos inesquecíveis momentos em que vivemos todos juntos.

À minha namorada Carolina Castiel por todo amor, companheirismo e aprendizado, ao longo dos 3 últimos anos.

Aos meus amigos Gabriel Saramago, Henrique Madeira e Isaac Balster pelas inúmeras horas de estudo compartilhadas, sem vocês o processo teria sido muito mais difícil. Agradeço também aos amigos André Guy, Eduardo Macedo e Lucas Baptista pelos divertidos momentos que dividimos no CT.

Ao meu orientador Jorge dos Santos, que me incentivou na escolha do tema e pela atenção e dedicação na construção deste trabalho.

A todos, muito obrigado,

Thomás Porto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Thomás Monteiro Sobrino Porto

Novembro /2016

Orientadores: Jorge dos Santos

Curso: Engenharia Civil

A impressão tridimensional, que é um processo de fabricação que acumula camadas a partir de um modelo digital, vem se desenvolvendo nos últimos anos. A tecnologia já é utilizada em diversos setores, como na medicina, no setor aeroespacial e na produção de peças de automóveis. Assim como nestes setores, a tecnologia pode trazer benefícios significativos para a construção civil, em termos de customização em massa, redução no tempo de construção, redução de mão de obra e de resíduos. Diversos experimentos foram realizados para explorar todo o potencial que a impressão 3D possui na indústria da construção. Uma revisão das experiências recentes mostra que com a evolução na tecnologia é possível produzir estruturas de concreto e até edifícios a partir das impressoras. No entanto, estas experiências são muito fragmentadas. Nesta monografia, além dos aspectos tecnológicos relacionados ao desenvolvimento das impressoras 3D, são relatadas algumas construções que evidenciam a aplicabilidade da técnica na construção civil.

Palavras-Chave: Impressão 3D, construção civil, prototipagem rápida, manufatura aditiva.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI / UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Civil Engineering.

Thomás Monteiro Sobrino Porto

November /2016

Advisor: Jorge dos Santos

Course: Engenharia Civil

Three-dimensional printing, which is a manufacturing process that accumulates layers from a digital model, has been developing in recent years. The technology is already used in several industries, including medicine, the aerospace industry and at the production of cars. As in these sectors, the technology can bring significant benefits to civil construction in terms of mass customization, reduced construction time, reduced manpower and waste. Several experiments were made to explore the full potential of 3D printing in the construction industry. A review of recent experiments shows that with the evolution of the technology it is possible to produce concrete structures and even buildings. However, these experiences are very fragmented. In this project, in addition to the technological aspects related to the development of 3D printers, some constructions are reported to demonstrate the applicability of the technique in civil construction.

Key Words: 3D Printing, Civil Construction, Rapid Prototyping, Additive Manufacturing.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. A importância do tema.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Justificativa da escolha do tema.....	3
1.4. Metodologia	5
1.5. Estrutura da monografia.....	5
2. IMPRESSÃO 3D: CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
2.1. A Nova Revolução Industrial	7
2.2. Tecnologias de Prototipagem Rápida	9
2.2.1 Funcionamento das Impressoras.....	9
2.2.2 Modelagem por Fusão e Depósito - FDM.....	10
2.2.3 Sinterização Seletiva a Laser - SLS.....	11
2.2.4 Estereolitografia (SLA)	12
2.2.5 Manufatura de Objetos Laminados (LOM).....	13
2.2.6 Impressão Tridimensional (3D Print).....	14
2.3. Aspectos Históricos	15
2.4. Aplicações.....	18
2.4.1 Naval.....	18
2.4.2 Aeroespacial	19
2.4.3 Automotivo	21
2.4.4 Medicina	21
3. NOVAS TECNOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	23
3.1. Tecnologias Digitais	23
3.1.1 Building Information Modeling (BIM)	23
3.1.2 Escâner 3D.....	25
3.2. Materiais	26
3.2.1 Cimentos Portland CPIII e CPIV.....	27
3.2.2 Concretos Ecológicos	27
3.2.3 Tijolo Ecológico	28
3.3. Sistemas Produtivos	29
3.3.1 Alvenaria Estrutural.....	29

3.3.2 Steel Frame	31
3.3.3 Parede de Concreto	32
3.3.4 Alvenaria Moldada	33
3.3.5 Concreto PVC.....	35
4. A TECNOLOGIA 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL	38
4.1. Contour Crafting - CC	40
4.2. Concrete Printing	43
4.3. D-Shape	44
4.4. Análise Comparativa das Principais Tecnologias.....	45
4.5. Outras Tecnologias	48
4.5.1 TotalKuston	48
4.5.2 C-Fab	50
4.5.3 Cybe Additive Industries.....	51
4.5.4 Emerging Objects	51
4.5.5 Colônias Espaciais.....	52
4.6. Concreto como Material de Impressão	53
5. A EXPERIÊNCIA 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	56
5.1. Descrição da Tecnologia 3D Aplicada em Protótipos Físicos.....	56
5.1.1 Aplicação na Produção de Protótipos Físicos para Fins Didáticos	57
5.1.2 Aplicação na Produção de Prototipagem de Detalhes Construtivos Complexos	58
5.1.3 Aplicação na Produção de Maquetes.....	59
5.2. Descrição da Tecnologia 3D Aplicada na Produção de Edificações	61
5.2.1 Edifícios construídos com a montagem de partes impressas.....	61
5.2.2 Edifícios construídos com a impressão das paredes no local	65
5.3. Análise Comparativa das Principais Experiências.....	68
6. CONCLUSÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

Lista de abreviaturas e siglas

- 3D** três dimensões
- 3DP** impressão tridimensional (*3D print*)
- ABCP** Associação Brasileira de Cimento Portland
- AQUA** Alta Qualidade Ambiental
- BIM** modelagem da informação de construção (*Building Information Modeling*)
- CAD** desenho assistido por computador (*computer-aided design*)
- CBCS** Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
- CBIC** Câmara Brasileira da Indústria da Construção
- CC** construção por contornos (*Contour Crafting*)
- CEO** diretor executivo (*chief executive officer*)
- DIY** faça você mesmo (*do it yourself*)
- FDM** Modelagem por Fusão e Depósito
- IBGE** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- LEED** *Leadership in Energy and Environmental Design*
- LOM** manufatura de objetos em lâmina (*laminated object manufacturing*)
- LSF** *Light Steel Framing*
- OSB** *Oriented Strand Board*
- PVC** poli vinil clorido, também conhecido como cloreto de polivinila
- RCD** Rejeito da Construção Civil
- RP** prototipagem rápida (*rapid prototyping*)
- SLA** estereolitografia (*stereolithography*)
- SLS** sinterização seletiva a laser (*selective laser sintering*)
- SRP** prototipagem rápida subtrativa (*subtractiverapid prototyping*)
- STL** *Stereolithography Tessellation Language*

Lista de figuras

Figura 1 - Esquema da FDM.	11
Figura 2 - Esquema SLS. Fonte: ICHI (2010).....	12
Figura 3 - Esquema SLA. Fonte: ICHI (2010).....	13
Figura 4 - Esquema LOM. Fonte: ICHI (2010).....	14
Figura 5 - Esquema 3DPrint. Fonte: RAULINO (2011)	15
Figura 6 - Evolução do Mercado de impressão 3D. Fonte: GSV (2013)	18
Figura 7 - Impressora 3D na embarcação USS Harry S. Truman. Fonte: VERGAKIS (2015)	19
Figura 8 - Peças de aeronaves impressas 3D. Fonte: HIPOLITE (2015).....	21
Figura 9 - Urbee. Fonte: AUTOESPORTE (2014)	21
Figura 10 - Esquema construtivo LSF. Fonte: CASTRO (2005).....	31
Figura 11 - Juntas Pré-Moldadas de entijolamento com espaçadores incorporados. Fonte:SHC (2013)	34
Figura 12 - Sistema de Alvenaria Moldada antes e depois da concretagem. Fonte: SHC (2013)	34
Figura 13 - Casa em Concreto PVC. Fonte: GLOBAL HOUSING (2013).....	36
Figura 14- Conjunto do Bocal. Fonte: KHOSHNEVIS (2004).....	41
Figura 15 - Parede impressa. Fonte: CONTOUR CRAFTING (2016).....	41
Figura 16 - Esquema de construção com Contour Crafting. Fonte: CONTOUR CRAFTING (2016)	42
Figura 17 - Impressão de edifício. Fonte: CONTOUR CRAFTING (2016).....	43
Figura 18 - Concrete Printing. Fonte: LIM et al. (2012)	44
Figura 19 - D-Shape. Fonte: WOLFES (2015)	45
Figura 20 - Similaridades entre os processos. Fonte: Adaptado de LIM et al. (2012).....	47
Figura 21 - Tecnologia TotalKustom. Fonte: TOTALKUSTON (2016).....	49
Figura 22 - Castelo impresso3D. Fonte: TOTALKUSTON (2016).....	49
Figura 23 - Parede com tecnologia C-Fab. Fonte: MOLITCH-MOU (2015).....	50
Figura 24 - Braço Robótico da C-Fab. Fonte: MOLITCH - HOU(2015)	50
Figura 25 - Braço robô e Parede impressa pela Cybe. Fonte: ANDERSON (2015).....	51
Figura 26 - Quake Column e Cool Brick. Fonte: RAEL e SAN FRATELLI (2011).....	52
Figura 27 - Experimentos para construções no espaço. Fonte: KHOSHNEVIS et al. (2012)	52
Figura 28 - Estrutura para posto avançado extraterrestre. Fonte: CESARETTI et al. (2014)	53
Figura 29 - Protótipos da Sagrada Família. Fonte: 3D SYSTEMS (2015)	58
Figura 30 - Maquete impressa 3D. Fonte: ROCHA (2015)	60
Figura 31 - Paredes impressas pela Yingchuang e reforço estrutural. Fonte: CHARRON (2015)	61
Figura 32 - Içamento das partes impressas. Fonte: CHARRON (2015)	62
Figura 33 - Vista externa do prédio e da vila, e vista interna de um cômodo. Fonte: CHARRON (2015).....	62
Figura 34 - Forma de concreto da Yingchuang. Fonte: WU et al. (2016).....	63
Figura 35 - Falta de integração com as instalações. Fonte: WU et al. (2016).....	64

Figura 38 - Edifício impresso pela HuaShang Tengda. Fonte: BUREM (2016).....	67
Figura 39 - Impressão das camadas no sistema da HuaShang Tengda. Fonte: BUREM (2016)	67
Figura 40 - Suporte e escora nas aberturas das janelas. Fonte: BUREM (2016)	68
Figura 41 - Shell House. Fonte: GARDNER (2013).....	71
Figura 42 - Escritório impresso em Dubai. Fonte: DISTASIO (2016)	71

Lista de tabelas

Tabela 1 - Análise das características das tecnologias de prototipagem rápida. Fonte: AGUIAR (2008).....	15
Tabela 2 - Comparativo dos impactos ambientais entre cimentos da indústria brasileira. Fonte: GUERREIRO (2014)	27
Tabela 3 - Custos aproximados entre as estruturas convencionais e a alvenaria estrutural no Brasil. Fonte: WENDLER (2005)	30
Tabela 4 - Comparativo Concreto PVC x Alvenaria. Fonte: GLOBAL HOUSING (2013)	36
Tabela 5 - Características de tecnologias de impressão 3D. Fonte: Adaptado de WU et al.(2016).....	39
Tabela 6 - Comparação Contour Crafting x Construção Convencional. Fonte: KHOSHNEVIS (2004)	42
Tabela 7- Comparação entre tecnologias de impressão de para construção civil. Fonte: Adaptado de LIM et al. (2012).....	48
Tabela 8 - Relação entre modos de desenvolvimento de produtos na indústria. Fonte: CARRARO et al.(2016)	60
Tabela 9 - Comparação das experiências de impressão de edifícios. Fonte: do autor	69

1. INTRODUÇÃO

1.1. A importância do tema

Em pleno século XXI, grande parte da produção nas indústrias é robotizada devido aos avanços tecnológicos. Roupas, calçados, carros e outras manufaturas são fabricados de forma automatizada. Em paralelo, a padronização dos processos, ligada ao controle de qualidade dos serviços e ao desenvolvimento de novas tecnologias foram fundamentais para um aumento de eficiência e ganhos de resultado. Com a produção em larga escala, há tendência a globalização que implicou no aumento da concorrência nos mercados e que as empresas para se manterem competitivas devem buscar a melhoria contínua.

“Na produção de um bem ou na prestação de serviços comparecem vários recursos como a mão de obra, materiais e equipamentos, que implicam em um custo. A otimização quanto à utilização dos mesmos, visando a redução dos custos, é desejável, principalmente em se tratando de um mercado globalizado e de competição acirrada, seja para a sobrevivência da empresa (competição por melhor preço de venda) seja para o aumento da lucratividade na atividade desenvolvida,” (AGOPYAN et al., 1998).

Por outro lado, a indústria da construção civil é uma das mais atrasadas do ponto de vista tecnológico. As evoluções nas técnicas de construção não são aplicadas no mesmo ritmo que avanços em áreas como informática ou nanotecnologia. A execução do edifício ainda depende principalmente de mão de obra braçal, como no assentamento de tijolos para execução de uma parede. Segundo FARIAS (2013), a construção civil no Brasil ainda é caracterizada pela utilização de técnicas muito artesanais e com grandes desperdícios.

De acordo com o Censo de 2010 (IBGE 2010), cerca de cinco por cento da população brasileira vive em aglomerados subnormais¹. A concentração de renda, serviços e do aparelho estatal (saúde, segurança, educação) gera, em certas áreas,

¹ O IBGE define como aglomerado subnormal o conjunto constituído por 51 ou mais unidades habitacionais caracterizadas por ausência de título de propriedade e pelo menos uma das características abaixo: 1) irregularidade das vias de circulação e do tamanho e forma dos lotes e/ou; 2) carência de serviços públicos essenciais (IBGE 2010).

urbanização desigual. Como consequência temos a periferização e a marginalização de outras regiões. Tais regiões são caracterizadas pela falta de saneamento, transporte, segurança e lazer. Essa situação contribui para proliferação de doenças, e ao crime nessas áreas.

Nos países de terceiro mundo é comum ver ocupações irregulares em áreas de risco, como em encostas e nas margens de rio. Estas habitações apresentam alta vulnerabilidade, estando mais suscetíveis a desastres naturais causados pelos ciclos hidrológicos, como deslizamentos de terra e as cheias dos rios. Muitas pessoas também perdem suas moradias devido a outros eventos da natureza, como no ocorrido em Nova Orleans, Estados Unidos, causado pelo furacão Katrina e no Sri Lanka devido aos tsunamis. Para KHOSHNEVIS (2004), em desastres que milhares ficaram desabrigados, necessita-se de uma forma de construção mais rápida do que as tradicionais.

De acordo com YOSSEF (2015), impressão tridimensional é um processo de fabricação que acumula camadas para criar um objeto sólido 3D, a partir de um modelo digital. Ela permite a customização em massa e formas complexas que não podem ser produzidas por outros meios, e também reduz a quantidade de resíduos. Devido a estas vantagens, a tecnologia tem sido cada vez mais utilizada em diferentes áreas, incluindo medicina, setor automotivo e aeroespacial. O estado atual da técnica ainda permite que as pessoas tenham uma impressora 3D em suas casas por um preço acessível. Seguindo esta tendência, que a indústria da construção visa a aplicação de impressão 3D em uma escala maior (WOLFES, 2015).

Neste cenário, estuda-se a viabilidade da construção de edificações por meio de impressoras 3D. De acordo com ANDERSON (2012), estamos entrando em uma nova Revolução Industrial, visto que a popularização do emprego das impressoras 3D prenuncia outra forma e modo de produção. A utilização dessas máquinas na engenharia civil apresenta-se como uma opção para reduzir custos, prazos e impactos ambientais.

1.2. Objetivo

O objetivo geral do trabalho foi realizar um estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil. A técnica pode ser usada tanto para execução de habitações padronizadas, como por exemplo em complexos para famílias de baixa renda, quanto para construções de arquitetura complexa e elaborada. Logo,

procurou-se estudar as inovações que a tecnologia 3D traz para construção civil e avaliar o seu melhor emprego.

O primeiro objetivo específico apresenta a tecnologia 3D e todo o seu potencial para a mudança na indústria em geral. Buscou-se abordar as vantagens competitivas que a tecnologia emprega e as inovações incorporadas em diferentes aplicações e mercados. Também tratou dos avanços nas impressoras e as tendências para os próximos anos.

Em seguida tivemos como objetivo o estudo das novas tecnologias empregadas na construção civil. Quais materiais, equipamentos e metodologias vem apresentando bons resultados, assim como as dificuldades e cuidados com a implementação são apresentados. Quais tecnologias surgiram nos últimos anos e como elas podem mudar a indústria.

Finalmente, o terceiro objetivo específico apresenta a experiência e a tecnologia da impressora 3D na engenharia civil. Buscou-se abordar as pesquisas envolvendo a execução de paredes de concreto utilizando a impressora, os projetos já executados com a tecnologia 3D e os resultados esperados. Assim, verificou-se sua viabilidade da utilização e os principais desafios a serem superados para o sucesso da tecnologia.

1.3. Justificativa da escolha do tema

“As mudanças são a essência do gerenciamento – mudanças de estruturas e de processos para que as novas necessidades da população sejam detectadas e atendidas ao mais baixo custo.” (FALCONI, 2016).

Em uma obra há muito desperdício de recursos e tempo com retrabalho. Seja por erros de projeto, falta de qualidade da mão de obra, controle tecnológico dos materiais, verificação dos serviços, análise de risco ou treinamento adequado. Novas tecnologias estão surgindo para tornar o serviço mais eficiente, entretanto para OLIVEIRA (2015), a popularidade inabalável da alvenaria como sistema de fechamento mostra como a construção brasileira ainda mantém o tradicionalismo de outrora.

Nesse sentido, a proposta de execução de uma casa com uma impressora 3D pretende resolver os gastos com retrabalho. Como a parte estrutural e praticamente toda a vedação é feita de forma automatizada pela impressora, reduz-se os contratempos de erro humano. Visto que a precisão de execução da máquina é superior à de um

trabalhador, além de seguir fielmente o projeto, não há margem a más interpretações de leitura do projeto.

Paralelamente, a sustentabilidade vem tendo cada vez mais enfoque nos projetos de construção. O acelerado crescimento populacional, principalmente nos centros urbanos, gera um aumento na demanda de habitações. Estas consomem uma enorme quantidade de recursos naturais e, ao mesmo tempo, geram toneladas de resíduos, não concluindo o ciclo produtivo, e com isso causam graves impactos ambientais (KHOSHNEVIS, 2004).

A tecnologia da impressora pretende diminuir substancialmente os desperdícios da indústria manufatureira. Isso porque ela possui uma elevada precisão, reduzindo o consumo de materiais e energia, assim como os gastos com transporte de pessoas, material e equipamentos também são minimizados. Além disso, não há emissões de resíduos, ruído, poeira ou substâncias prejudiciais.

Deve-se também, atentar ao fato, da indústria da construção ser reconhecida em todo o mundo como uma das mais perigosas, especialmente para acidentes de trabalho fatais. De acordo com a Organização Internacional do Trabalho, a cada ano ocorrem pelo menos 60.000 acidentes fatais na indústria da construção em todo o mundo, com um óbito a cada 10 minutos, sendo que um de cada seis acidentes de trabalho fatais ocorre na construção (BARBOSA et al, 2012). A utilização da impressora pretende tornar o trabalho mais seguro em todo o processo de construção, pois é simples estabelecer procedimentos para a análise de risco e falha durante a construção. Sendo assim, resultaria lesões de menor gravidade e em menor número nas atividades, menor contato do trabalhador com substâncias perigosas, menor exposição a substâncias químicas levadas pelo ar, e ao ruído.

De acordo com WU et al. (2016), deve-se notar que a investigação relacionada com a aplicação de impressão 3D na indústria da construção ainda está em sua infância. Muitos novos experimentos foram realizados para explorar todo o potencial que a impressão 3D pode trazer para indústria da construção. No entanto, estas experiências são muito fragmentadas. Assim sendo, uma revisão crítica da história e do desenvolvimento atual de impressão 3D é necessária na construção civil. Espera-se que este trabalho promova outras iniciativas que permitam aprofundar os estudos e aplicações da tecnologia.

1.4. Metodologia

Inicialmente a metodologia adotada para o trabalho foi colher o máximo de informações relevantes sobre a impressora 3D, e sobre as novas tecnologias empregadas na construção civil. Para tanto, foi realizada uma extensa revisão bibliográfica relacionada ao tema em monografias, teses de doutorado e dissertações de mestrado. Procedeu-se para o estudo da aplicação da impressora na construção civil através de leitura em revistas de tecnologia, artigos científicos e pesquisa em sites eletrônicos.

1.5. Estrutura da monografia

O presente trabalho está organizado em seis capítulos: I. Introdução; II. Impressão 3D: Contextualização; III. Novas tecnologias na construção civil; IV. A tecnologia 3D na construção civil; V. A experiência 3D na construção civil; VI. Conclusões e Sugestões.

O primeiro capítulo apresenta a importância do tema, os objetivos do trabalho, a justificativa da escolha do tema e a metodologia empregada.

O segundo capítulo aborda a tecnologia de impressão 3D de forma geral. Foram apresentados a definição de impressora 3D, seus aspectos históricos, como e quando surgiu, sua evolução e principais aplicações. Deu-se ênfase, também, aos segmentos em que a tecnologia foi testada e aplicada, as dificuldades encontradas e suas respectivas peculiaridades. Finalmente, estão descritas as experiências que vem apresentando os melhores resultados com a impressora e que podem ser utilizadas como parâmetro para a aplicação na construção civil.

O terceiro capítulo trata das novas tecnologias e métodos construtivos na construção civil. Foram apresentadas as últimas novidades na indústria, abordando os materiais, os equipamentos e as peculiaridades relativas ao método construtivo propriamente dito. Também estão fornecidos os aspectos das novas tecnologias como prazo, custo e qualidade.

O quarto capítulo apresenta a tecnologia 3D na construção civil. Foram relatados estudos e o desenvolvimento da tecnologia na engenharia civil, os aspectos históricos e sistema de impressão 3D utilizado. Também estão relatados quais são os materiais e a forma de impressão em cada sistema, e em seguida é feita uma comparação destas técnicas.

O quinto capítulo aborda a experiência 3D na construção civil. Nele, estão detalhados os empregos da tecnologia, tanto para produção de protótipos, quanto para construção de edifícios. São apresentadas as experiências mais marcantes de impressão com concreto, abordando aspectos de custo, qualidade, prazo, durabilidade e sustentabilidade. Segue uma análise das experiências, buscando entender a tendência da tecnologia para os próximos anos, seus desafios e o melhor emprego.

O sexto capítulo trata das considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. IMPRESSÃO 3D: CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1. A Nova Revolução Industrial²

ANDERSON (2012), autor do livro *Makers - A Nova Revolução Industrial*, acredita que estamos passando por uma nova Revolução Industrial, uma vez que a popularização das impressoras 3D está alterando a forma e o modo de produção. Com uma impressora 3D podem-se confeccionar objetos sólidos em três dimensões a partir de um desenho no computador. O objeto é construído com a adição de camada sobre camada de material e moldado por raio laser. Na prática, trata-se de uma micro fábrica que possibilita a criação de produtos personalizados por um menor custo, menor desperdício e menos mão de obra que uma indústria tradicional.

A Primeira Revolução Industrial ficou marcada pelo aperfeiçoamento da máquina de tecer somada ao surgimento da máquina a vapor. Em 1766, o tecelão James Hargreaves criou um mecanismo com apenas uma roda de fiar, capaz de trabalhar múltiplas linhas de algodão. A possibilidade de executar tarefas com mais rapidez, liberam tempo para dedicar-se a novas tarefas. Dessa forma, a fiandeira de pedal multiplicou a produtividade na indústria têxtil de tal forma, que desencadeou grandes mudanças em todo comércio.

Já a Segunda Revolução Industrial denomina a fase que compreende em conjunto as indústrias químicas, com o refino do petróleo, com o motor de combustão interna e com a eletrificação. Tal fase se estende desde 1850 até o fim da Primeira Guerra Mundial, incluindo a linha de montagem de Henry Ford. A construção do Modelo-T de Ford, caracteriza-se pela introdução de partes intercambiáveis e de esteiras transportadoras, onde os produtos em fabricação se movem em sequência para postos de trabalho estacionários, e não ao contrário.

²Utilizou-se intencionalmente o mesmo título da fonte bibliográfica para reforçar a relevância da referida obra na construção deste capítulo. A obra em questão é ANDERSON, Chris. **Makers A Nova Revolução Industrial**. Elsevier Brasil, 2012. Todas as referências desta seção serão desta obra, a não ser que devidamente apontado diferentemente.

“Mas, na essência, revolução industrial se refere a um conjunto de tecnologias que aumentaram drasticamente a produtividade dos seres humanos, provendo uma série de mudanças, na longevidade, na qualidade de vida, nas concentrações populacionais e no crescimento demográfico.”(ANDERSON, 2012)

A segunda metade do século XX marca o surgimento da Era da Informação. O advento do computador pessoal, em fins dos anos 1970, culminando com o desenvolvimento da internet e da Web na década de 1990, possibilitou a gerar ganhos de produtividade na indústria e nos serviços. Entretanto, para Anderson tais inovações na computação e na comunicação somente não podem caracterizar uma Revolução Industrial, até começar a produzir efeitos democratizantes sobre a fabricação, que começaram na virada do século. Portanto, a Terceira Revolução será mais bem compreendida como uma combinação da fabricação digital e fabricação pessoal.

Com a evolução das impressoras 3D, para tornar real uma ideia, não é mais necessário investir em fábricas ou em mão de obra vasta, fabricar produtos não é mais privilégio de poucos. Nota-se que a indústria está cada vez mais digital, os objetos físicos começam como projetos em telas e podem ser compartilhados on-line como arquivos. Uma vez que os projetos dos produtos são feitos em computadores, qualquer pessoa pode produzi-los.

A fabricação controlada por computador e por meio da impressão 3D já tem capacidade de produzir em escalas tão pequenas como em bioengenharia, quanto tão grandes como construção civil. Nestes processos, o custo da complexidade e a qualidade do produto para uma menor escala é menor que na fabricação tradicional. De acordo com BASS (2011), CEO da empresa Autodesk, a capacidade de produzir pequeno número de itens de alta qualidade e de vendê-los a preços razoáveis está provocando enorme ruptura econômica.

ANDERSON (2012) descreve a nova perspectiva da seguinte forma “... o ponto é que a distância entre *inventor* e *empreendedor* foi tão encurtada que praticamente não existe mais. ” O designer do produto já não precisa importa-se com o processo de fabricação como antes, nem mesmo entender como funciona, uma vez que as máquinas controladas por computador que criam o objeto. Segundo BASS (2011), pela primeira vez na história, podemos segregar design e fabricação, pois todas as informações necessárias para a impressão do objeto estão embutidas no design.

A medida que a demanda por produtos sob medida e de fabricação personalizada aumentam, as impressoras 3D se destacam pela sustentabilidade. Os custos de transportes são menores, visto que a produção pode ser feita no próprio local de utilização do produto. Além disso, os desperdícios são desprezíveis, pois não se usa mais material do que necessário na impressão. Finalmente, produtos personalizados tendem a ser menos descartáveis, uma vez que os usuários possuem mais afeição a eles, quando comparados a produção em massa.

“Isso tem o potencial de transformar a economia da fabricação, redirecionando-a da produção em grande escala para o modelo artesanal das pequenas oficinas de design, com acesso a impressoras 3-D.” (KARLGAARD,2011).

Nota-se aqui que a impressão 3D facilita a individualização e customização, ao contrário da fabricação em massa que favorece a repetição e a padronização. Dessa forma, a grande vantagem da fabricação digital é a possibilidade de escolher entre as duas formas de produção. Agora, tanto a massificação quanto a customização são métodos viáveis de fabricação automática.

2.2. Tecnologias de Prototipagem Rápida

2.2.1 Funcionamento das Impressoras

A tecnologia das impressoras 3D, também chamadas de máquinas de Prototipagem Rápida, vem se desenvolvendo ao longo do tempo e mudando o modo de fabricação de objetos. Já existem uma variedade de métodos de impressão, e cada um trabalha de forma distinta e utiliza matérias próprios. Algumas impressoras extrudem plástico derretido em camadas para fazer os objetos, enquanto que outras usam laser para endurecer camadas de resina ou pó, de forma que o produto surja de um banho de matéria-prima. Ainda outras produzem objetos a partir de materiais como vidro, aço e concreto.

De acordo com RAULINO (2011), a Prototipagem Rápida (RP – *Rapid Prototyping*) é um processo de fabricação baseado na adição de material em camadas planas que surgiu no final dos anos 80, devido à crescente necessidade da indústria em reduzir custos no processo de desenvolvimento de produto. Já na técnica chamada de Prototipagem Rápida Subtrativa (SRP) os modelos são obtidos por usinagem de bloco de

diversos materiais. O presente trabalho tratará especificamente da Prototipagem Rápida Aditiva.

O primeiro passo da criação é o desenvolvimento do modelo em 3D do objeto em algum software de edição no computador. Em seguida, é preciso enviá-lo para o software da impressora para definir-se as dimensões e a resolução da imagem, que é medida pela espessura das camadas sobrepostas. Quanto menor essa espessura, melhor é a qualidade do objeto, porém maior será o tempo de impressão.

O software da impressora se encarrega de examinar o modelo do objeto e determina como imprimi-lo utilizando a menor quantidade de material e tempo. Por exemplo, para impressão de um busto de uma pessoa, o software calcula a menor largura necessária para as paredes externas da cabeça, afim de garantir força suficiente. Além disso, cria-se no interior da cabeça uma estrutura de apoio matricial, em forma de pente, para se fornecer o máximo de rigidez com o mínimo de material.

Após definir as configurações principais, o software de impressão compila os dados e “fatia” o objeto em camadas horizontais. Cada uma dessas fatias é um conjunto de comandos para que a cabeça da impressora se movimente nas direções x e y, enquanto estiver extrudando o material ou projetando o laser no pó ou na resina. Ao movimentar-se pela área de impressão, a cabeça da impressora traça a fatia do objeto, de forma que o software diminui a distância a ser percorrida.

As principais técnicas de impressão utilizadas são: Modelagem por Fusão e Deposição, Sinterização Seletiva a Laser, Estereolitografia, Manufatura de Objetos Laminados e 3D Print.

2.2.2 Modelagem por Fusão e Depósito - FDM

A técnica de Modelagem por Fusão e Depósito é baseada na extrusão de termoplásticos. A máquina é formada por um cabeçote que se movimenta nos eixos x e y, e por uma plataforma responsável por transladar verticalmente. O injetor de material aquece e puxa o filamento plástico que fica enrolado em uma bobina. O material passa através de dois bicos extrusores situados no cabeçote para, então, ser depositado na plataforma. Em um bico passa o material que irá compor o objeto e no outro o material que irá ser utilizado como suporte no caso de fabricação de superfícies complexas.

Assim que uma camada fica pronta, a plataforma se desloca para baixo num valor equivalente a espessura da nova camada para que a próxima camada seja feita. Esse tipo de impressora pode ter uma variação no processo: a base se movimenta nos eixos X e Y, enquanto a extrusora movimenta-se no eixo Z. Essas etapas são repetidas quantas vezes forem necessárias até formar o objeto 3D completo. O processo pode levar de poucos minutos até algumas horas, dependendo da complexidade e da qualidade da impressora. O esquema pode ser visto na figura 1.

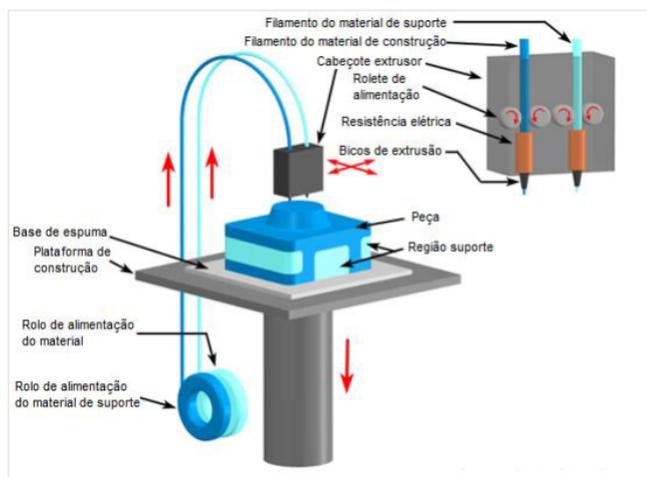


Figura 1 - Esquema da FDM.

Fonte: PROTOFAST (2014)

A tecnologia Modelagem por Fusão e Depósito (FDM) apresenta algumas vantagens em relação às outras técnicas de impressão, como o menor desperdício de material e a menor necessidade de limpeza. De acordo com RAULINO (2011), esta impressora é mais utilizada para a fabricação de produtos menos exigentes, direcionados a atividades acadêmicas e produtos customizáveis para comercialização. Além disso, outra vantagem é a menor espaço que ocupa, visto que os motores de acionamento necessitam de menos potência e resfriamento que os lasers. Tais características possibilitam sua instalação em ambientes não industriais.

2.2.3 Sinterização Seletiva a Laser - SLS

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é um processo que constrói objetos tridimensionais pela superposição de camadas homogêneas de polímeros em pó. A tecnologia utiliza equipamento mais robusto que a FDM e possui boa resistência mecânica e térmica. Porém, possui como vantagem a capacidade de utilizar diversos

materiais para fabricação dos objetos, como poliamidas, elastômeros, cerâmicas e metais com polímeros aglutinantes (GRIMM, 2005).

O processo de fabricação inicia-se com o preenchimento da câmara de impressão com o pó. Em seguida, a máquina nivela o material e um laser de alta potência é projetado no pó fazendo o material entrar em fusão. Após a formação de uma camada, a plataforma central desce e um rolo aquecido passa sobre a superfície de impressão, cobrindo a camada recém-criada com mais pó. O processo se repete até que o objeto esteja completamente pronto. O esquema pode ser visto na figura 2.

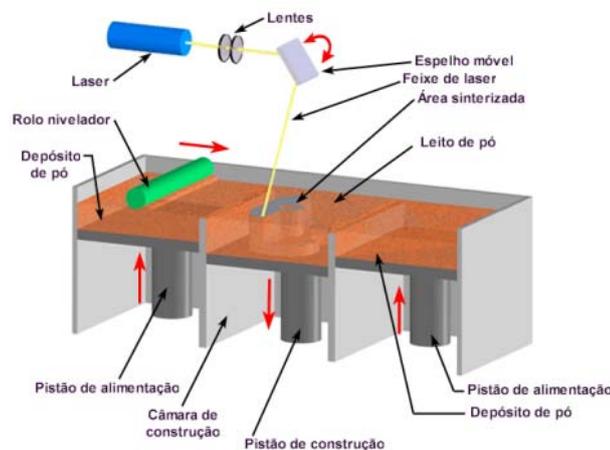


Figura 2 - Esquema SLS. Fonte: ICHI (2010)

No final do processo é necessário remover todo o excesso de pó do objeto impresso. A retirada do pó é feita com um jato de ar comprimido ou escovas próprias para esse propósito. O pó que não é sinterizado, ou seja, utilizado para formação do objeto, funcionará ao longo do processo como suporte e ao final do processo pode ser reutilizado, portanto o desperdício é mínimo.

2.2.4 Estereolitografia (SLA)

A técnica pioneira de impressão 3D, chamada de Estereolitografia, foi criada pelo norte americano Charles Hull e possui processo semelhante ao da SLS. Assim como a Sinterização Seletiva, a SLA utiliza-se de laser para endurecer as camadas, porém invés das camadas serem formadas por polímeros em pó, o objeto é formado pelo endurecimento de resina. Desta forma, a tecnologia baseia-se na polimerização de uma

resina (acrílica, epóxi ou vinil) fotossensível composta de monômeros, fotoiniciadores e aditivos, por meio de um feixe de laser ultravioleta (BADOTTI, 2003).

O processo de construção do objeto inicia-se com o preenchimento da cuba com a resina, no interior da qual há uma plataforma capaz de se transladar verticalmente. De acordo com os comandos do controle numérico, o laser é projetado na superfície do líquido, que se solidifica no local em que o laser foi projetado. Com a formação da camada, a plataforma desce para imergir na cuba, permitindo a criação de uma nova camada e assim sucessivamente. A figura 3 ilustra o processo.

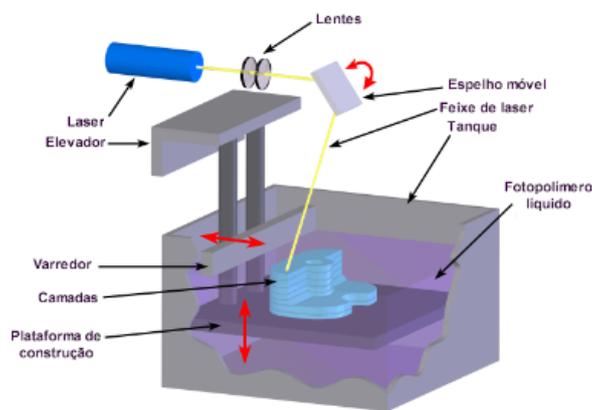


Figura 3 - Esquema SLA. Fonte: ICHI (2010)

No final da impressão é preciso remover o excesso de líquido das peças e em seguida completar o processo de cura em um forno. A tecnologia SLA apresenta uma produção de objetos com maior precisão quando comparada a técnica FDM, além de produzir modelos mais complexos e resistentes. Como consequência, os custos de compra, manutenção e operação da máquina e dos materiais são maiores, tornando-a uma tecnologia mais cara (KARASINSKI, 2013).

2.2.5 Manufatura de Objetos Laminados (LOM)

A obtenção dos objetos no processo LOM, ocorre colando-se sucessivamente folhas de papel, nas quais um feixe laser corta o perímetro exterior correspondente ao corte da camada do objeto. Assim, o processo inicia-se com o desenrolar de um rolo de papel impregnado de cola termoplástica na sua superfície inferior. Seguidamente um rolo pré-aquecido comprime o papel sobre a camada anterior ficando a colagem consolidada. O corte do contorno da peça na camada é feito por um laser. O papel de suporte, que não

faz parte do componente, é cortado para remoção da peça do interior do bloco formado pela bobina de papel. (GRIMM, 2005)

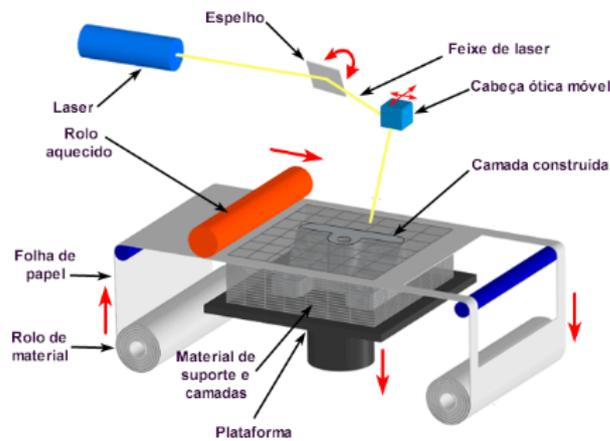


Figura 4 - Esquema LOM. Fonte: ICHI (2010)

2.2.6 Impressão Tridimensional (3D Print)

Este processo de prototipagem rápida utiliza o conceito de impressão a jato de tinta dos computadores, inclusive a máquina é construída com peças adaptadas de impressoras convencionais. A diferença é que, em vez de tinta, seu cabeçote expete um agente aglutinante composto de uma solução aquosa e cola. Desenvolvido pelo Massachusetts Institute of Technology, esse processo é semelhante aos outros anteriormente citados no sentido de também fabricar a peça camada por camada através de um modelo digital criado no CAD.

Em um reservatório contendo pó cerâmico ou polimérico uma plataforma se movimenta no eixo Z de coordenadas, onde o pó é aglutinado formando as camadas do objeto, na medida em que a plataforma desde um rolo carrega nova camada vinda de outra plataforma ascendente (Figura 5). A movimentação do cabeçote de aglutinante, nas coordenadas x e y, constrói-se o desenho das camadas do objeto sucessivamente, até o fim da construção do objeto, que é retirado de dentro do volume de pó excedente. Após o procedimento de construção é necessária a infiltração de novos elementos químicos na porosidade do objeto construído (GRIMM, 2005).

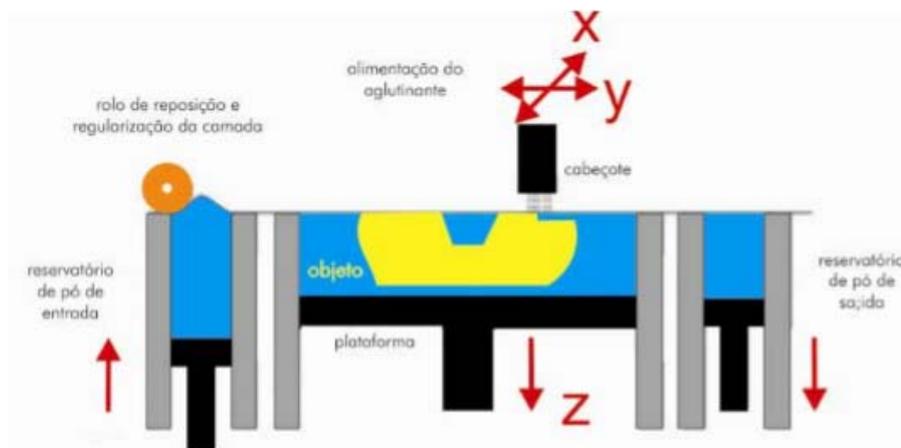


Figura 5 - Esquema 3DPrint. Fonte: RAULINO (2011)

A tabela 1 faz uma análise das características das tecnologias de prototipagem rápida.

Tabela 1 - Análise das características das tecnologias de prototipagem rápida. Fonte: AGUIAR (2008)

	SLA	SLS	LOM	3DP	FDM
Variedade de materiais	Pequena	Grande	Pequena	Média	Média
Translucidez	Sim	Não	Não	Não	Sim
Qualidade superficial	Regular	Boa	Regular	Boa	Regular
Pós-acabamento	Regular	Bom	Baixo	Bom	Regular
Precisão	Excelente	Boa	Baixa	Boa	Regular
Resistência ao impacto	Regular	Boa	Baixa	Baixa	Boa
Resistência à flexão	Baixa	Excelente	Baixa	Baixa	Excelente
Custo do prototipo	Alto	Médio	Alto	Médio	Baixo
Pós-cura	Sim	Sim*	Não	Não	Não

*Não necessita de cura quando utiliza termoplásticos

Observa-se que a técnica SLS se destaca pela variedade de materiais e bom acabamento. Ao contrário da Estereolitografia, a tecnologia FDM produz objetos com boas resistências ao impacto e à flexão a um baixo custo. Finalmente, nota-se que as máquinas de LOM e 3DP não apresentam nenhuma característica de destaque, o que explica suas menores utilizações no mercado.

2.3. Aspectos Históricos

As primeiras tecnologias de impressão 3D surgiram no início da década de 1980 e foram chamadas de tecnologias de Prototipagem Rápida. O nome refere-se ao fato que processos foram originalmente concebidos como um método rápido e mais rentável para

a criação de protótipos para o desenvolvimento de produtos dentro da indústria (3D PRINTING INDUSTRY, 2016). O primeiro pedido de patente para trabalho com Prototipagem Rápida foi de Hideo Kodama do Instituto de Pesquisa Industrial do Município de Nagoya.³ Todavia, considera-se como origem das impressoras 3D a patente de 1986 de Charles Hull.

Charles Hull, engenheiro formado na Universidade do Colorado, é o inventor da Estereolitografia, primeiro protótipo de tecnologia conhecida como impressora 3D. Hull desenvolveu em 1983 a tecnologia que viria a ser a máquina, que além de criar lâmpadas para solidificação de resina, confeccionava partes de plástico de forma rápida. Observa-se que na época a impressora já apresentava características como flexibilidade e rapidez. No mesmo ano que a Estereolitografia foi patenteada, Hull iniciou a comercialização da tecnologia ao fundar a 3D Systems Corp., empresa que até hoje é referência no mercado.

No início da década de 1990 surgiram os primeiros modelos de impressoras 3D. Em 1991, a empresa de tecnologia Stratasys produziu a primeira máquina de FDM. No ano seguinte, a Systems Corp. lançou a primeira impressora de tecnologia SLA e a startup DMT produziu a primeira máquina de SLS. O termo “impressora 3D” foi cunhado em 1995, por Jim Bredt e Tim Anderson, alunos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (VILICIC, 2012). Nessa década, os objetos criados apresentavam deformações no material uma vez que endurecido e as máquinas eram muito caras para pequenos empreendedores, porém o potencial da tecnologia era inegável.

A partir do ano de 1999, muitos avanços foram feitos na medicina graças ao desenvolvimento das impressoras 3D. Primeiramente, cientistas do Instituto Wake Forest de Medicina Regenerativa imprimiram arcabouços sintéticos da bexiga humana e depois revestiram -lós com as células de pacientes humanos. O tecido recém-gerado foi então implantado e por ser feito com as células dos próprios pacientes apresenta risco de rejeição baixo. Além disso, em menos de 10 anos, cientistas projetaram um rim funcional em miniatura, construíram uma perna protética e imprimiram os primeiros vasos sanguíneos (GOLDBERG, 2014).

³Mesmo sendo Advogado de Patentes, o Doutor Kodama não conseguiu que a especificação de patente completa fosse preenchida antes do prazo de um ano após a aplicação (3D PRINTING INDUSTRY).

Em meados da década de 2000, surgiram inovações para democratizar o uso da tecnologia de impressão 3D. Em 2005, o Doutor Adrian Bowyer funda o projeto RepRap, uma iniciativa de código aberto para construir uma impressora 3D que pode imprimir maior parte de seus componentes próprios. Três anos depois o projeto lança o Darwin, impressora capaz de produzir suas próprias peças. A democratização da tecnologia seguiu com o lançamento de serviços de colaboração e co-criação, como Shapeways, onde os designers podem obter feedback dos consumidores e outros designers e, em seguida, fabricar seus produtos.

A empresa nova-iorquina MakerBot fez importantes contribuições para a popularização das impressoras 3D. Em 2009, proporcionou os kits DIY⁴ para os consumidores construírem suas próprias impressoras. Em seguida, lançou em 2012 o Replicator 2, máquina que ocupa o mesmo espaço de uma impressora de papel e que em seu lançamento custava 2200 dólares. Para VILICIC (2012), o Replicator 2 está para as impressoras 3D o que representou o Apple II para a computação pessoal.⁵ Esta impressora, diferente de modelos antigos que eram vendidos desmontados e exigiam conhecimentos técnicos para o acoplamento das peças, é entregue pronta para ser usada.

Máquinas de Prototipagem Rápida de maior porte, para uso industrial, já estão à venda há muito tempo, porém somente em 2012 foram abertas as primeiras lojas de varejo para a venda de impressoras 3D portáteis. O custo de fabricação e o avanço nos métodos de impressão vem barateando cada vez mais essas impressoras. Enquanto que na década de 1990 uma impressora custava centenas de milhares de dólares, vinte anos depois existem modelos por menos de mil dólares. Para Anderson (2012), “até o final da década, são grandes as chances de que vejamos impressoras 3D disputando espaço nas prateleiras com modelos normais que imprimem em papel. ” Observa-se então que com a popularização das impressoras suas aplicações serão mais práticas e comuns.

⁴DIY vem de Do It Yourself, “Faça Você Mesmo” em tradução livre

⁵Criado pela dupla Steve Jobs e Steve Wozniak em 1977, o Apple II definiu o modelo básico do computador pessoal – com teclado, mouse e uma tela.

2.4. Aplicações

A utilização das máquinas de prototipagem rápida vem crescendo rapidamente nos últimos anos e a tendência é continuar. Este crescimento se deve à evolução dos processos e a diminuição dos custos das matérias primas bem como do maquinário. A aplicação mais comum da tecnologia ainda se encontra na produção de protótipos, no entanto o mercado para a indústria de impressão 3D tem se mostrado muito promissor, saindo em 2010 de um crescimento de 24,1% e um montante de US\$ 1,325 bilhões para 29,4% e US\$ 1,714 bilhões em 2011 (WOHLERS, 2012).

Observa-se pela figura 6 que o tamanho do mercado de impressoras tem projeção de chegar a US\$ 6,5 bilhões em 2019.

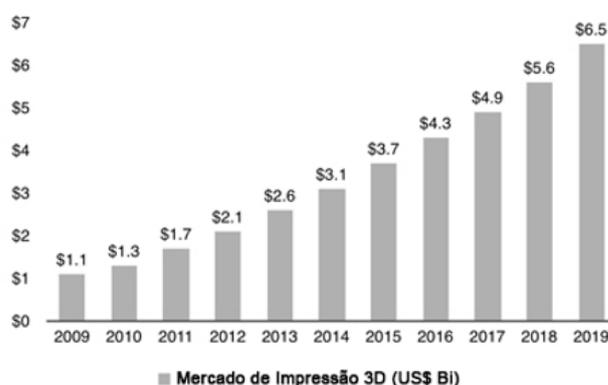


Figura 6 - Evolução do Mercado de impressão 3D. Fonte: GSV (2013)

Atualmente a tecnologia de prototipagem rápida é aplicada em diversos setores como o aeroespacial, automotivo, médico e no desenvolvimento de produtos de consumo em geral. A seguir são descritos os segmentos de aplicação que apresentam os melhores resultados com as impressoras.

2.4.1 Naval

A Marinha é um dos setores que vem utilizando a tecnologia de impressão 3D em busca de tornar a operação nos navios mais autossuficiente. Se uma peça quebra quando um navio de guerra está no mar, encontrar uma reposição não é simples. Desta forma, o porta-aviões americano USS Harry S. Truman e o navio de assalto anfíbio USS Kearsarge foram equipados com impressoras 3-D para a produção de peças personalizadas (figura 7). As impressoras estão ajudando as equipes a resolver tarefas práticas, como a impressão

tampões e chaves inglesas. Em outro exemplo de funcionalidade, imprimiu-se uma nova xícara de óleo para uma máquina, após observar que a original era muito pequena para um funil a bordo do navio (VERGAKIS, 2015).



Figura 7 - Impressora 3D na embarcação USS Harry S. Truman. Fonte: VERGAKIS (2015)

A Marinha dos EUA não é a única unidade militar a testar os potenciais de aplicação da impressão 3-D. A Marinha Real britânica lançou uma aeronave feita por impressora 3-D a partir do navio HMS Protector. O navio de patrulha quebra gelo, que navegava pelas águas da Antártida, fabricou o drone a bordo e utilizou o pequeno avião de controle remoto para explorar uma rota livre de gelo. Com o desenvolvimento das impressoras, a tecnologia será utilizada para criar drones maiores, possibilitando que um navio porta-aviões não seja apenas um aeroporto flutuante, mas uma fábrica de aviões flutuante (MIZOKAMI, 2016).

2.4.2 Aeroespacial

Um dos segmentos que já conseguiu aplicar a tecnologia de forma consistente e regular em parte dos processos de fabricação foi o setor Aeroespacial. O uso da impressão 3D na aviação traz diversos benefícios, como a redução do tempo de fabricação das peças e a diminuição do peso dos aviões, o que resulta na redução do consumo de combustível e na emissão de poluentes no ar. Além disso, em vez de armazenar peças nos respectivos

hubs⁶, as companhias economizam espaço e simplificam a logística ao simplesmente imprimi-las.

As grandes companhias mundiais de fabricação de aeronaves já empregam amplamente a tecnologia 3D em seus processos produtivos. A companhia norte americana Boeing já produziu mais de 20.000 peças impressas em 3D. Essas peças são utilizadas em 10 tipos diferentes de aviões militares e comerciais. A companhia aérea tem ainda construído uma cabine inteira usando uma das impressoras da Stratasys (KRASSENSTEIN, 2015).

Já empresa aeroespacial francesa, Airbus, apresentou um mini avião chamado Thor, o primeiro impresso em 3D no mundo das aeronaves. Construído com apenas 50 peças produzidas a partir de uma substância chamada poliamida, um polímero sintético, o avião pesa 22 quilos e tem quatro metros de comprimento. O projeto faz parte dos estudos que a fabricante vem fazendo para incluir esse tipo de tecnologia em sua produção (WISHBOX, 2016).

Enquanto pesquisas na Europa e nos EUA estão se concentrando mais na impressão 3D de peças menores, a China apresenta resultados promissores para as partes de seções maiores. Pesquisadores da Universidade de Pequim, desenvolveram 50 peças grandes de ligas de titânio impressas para aeronaves, aviões e até mesmo novos foguetes (figura8). Utilizaram-se da tecnologia SLS para fabricação das peças, apresentando propriedades mecânicas fortes, devido ao fato de que as peças são impressas em unidades grandes comparadas a outros métodos com peças menores que precisam ser montadas (HIPOLITE, 2015).

⁶ Hub é uma designação dada ao aeroporto utilizado por uma companhia aérea como ponto de conexão para transferir seus passageiros para o destino pretendido.



Figura 8 - Peças de aeronaves impressas 3D. Fonte: HIPOLITE (2015)

2.4.3 Automotivo

A indústria automotiva é uma das mais beneficiadas das tecnologias de prototipagem rápida. As maiores fabricantes de automóveis ao redor do mundo estão usando impressoras 3D, a fim de acelerar e melhorar o design e os processos de construção. A Ford, por exemplo, já imprimiu 500.000 partes de automóveis e economizou bilhões de dólares e milhões de horas de trabalho (FORD, 2016). A tecnologia é capaz de produzir desde volantes, passando pelos assentos dos automóveis, até partes do motor dos veículos. Em 2011, a Kor Ecologic lançou o primeiro carro com toda a carroceria feita por impressão 3D, como peso de apenas 544, o que contribui para fazer uma média de 100km/l(figura 9).



Figura 9 - Urbee. Fonte: AUTOESPORTE (2014)

2.4.4 Medicina

Como visto no tópico 2.3 as tecnologias de prototipagem rápida já apresentam aplicação na área médica desde 1999, com a fabricação de arcabouços sintéticos da bexiga humana. A impressão de réplicas de órgãos apresenta uma série de funcionalidades. Em diversas universidades no Brasil, estudantes de Medicina tem a possibilidade de aprender sobre o funcionamento de órgãos, sem depender de cadáveres. Em outro exemplo,

médicos da Universidade de Buffalo, Nova York, usaram imagens de tomografias para imprimir uma réplica em tamanho real do sistema vascular dos pacientes. Assim, os profissionais podem praticar melhor antes das cirurgias, diminuindo o tempo de operação e conseqüentemente os riscos (MEARIAN, 2015).

Além disso, ainda no campo médico, as próteses são mais um caso de aplicação das impressoras 3D para fins benéficos à saúde. Uma equipe médica da Universidade Biomédica de Hasselt, Bélgica, implantou uma mandíbula artificial de titânio em uma paciente de 83 anos (BBC NEWS, 2012). As próteses ortopédicas impressas, além de se adaptarem as características físicas de seus usuários, apresentam um preço competitivo. O francês Nicolas Huchet, de 32 anos, desenvolveu uma técnica para produzir uma prótese de mão de baixo orçamento para si mesmo, usando uma impressora 3D. Segundo ele, o custo de fabricação ficará entre 1 mil e 1,5 mil euros, vinte vezes mais barato que as versões comerciais disponíveis (SIMON, 2015).

3. NOVAS TECNOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Para o desenvolvimento de um país é fundamental que sua indústria de construção busque utilizar novos materiais, novos processos, novas tecnologias. As empresas estão sendo induzidas ao desenvolvimento de inovações ou à incorporação de inovações para manter a competitividade (COSTA et al., 2014). No Brasil, novos sistemas construtivos vêm sendo utilizados em busca de aumentar a velocidade de produção e para diminuir os custos. Ao mesmo tempo, torna-se comum o lançamento de edifícios sustentáveis, que buscam avaliar o ciclo de vida dos materiais empregados e seus efeitos. Nota-se também que a engenharia vem se beneficiando do avanço da tecnologia computacional, que representam ganhos de produtividade e vantagens quanto a disponibilidade de armazenamento e processamento de informações.

3.1. Tecnologias Digitais

3.1.1 Building Information Modeling (BIM)

A utilização da tecnologia Building Information Modeling⁷ (BIM) vem ganhando força na engenharia civil como novo software para modelagem, armazenamento e análise de modelo. Até a década passada, o cenário de ferramentas para modelagem 3D era completamente dominado pelo CAD, tecnologia eficaz para modelar espacialmente, porém que não carrega informações paramétricas. Para MULLER (2015) o BIM é uma evolução do CAD, no qual o projeto é gerado a partir de vetorizações dos componentes, conjuntos simples de linhas e curvas tomando uma forma complexa.

Em comparação com o CAD, o BIM tem a vantagem que seus elementos não são meros elementos gráficos, sejam estes 2D ou 3D. Ao utilizar-se de objetos, e não simplesmente linhas, carregam-se diversos parâmetros, armazenados em uma base de dados, podendo estes ser o material, seu custo, entre outras propriedades. Nota-se também, que os objetos estão definidos para quando houver alguma alteração, o software

⁷Modelagem da Informação de Construção, em tradução livre

está automatizado para adequar os elementos vizinhos que de alguma forma estão ligados ao que sofreu modificações.

Trabalhando com a tecnologia BIM o projetista pode definir quantos parâmetros achar necessário e visualizar com clareza as vistas do projeto. No caso de uma parede, além da espessura e altura, define-se os materiais empregados, as camadas de revestimento, o acabamento, fabricantes, propriedades termo acústicas e qualquer outra informação que se deseje adicionar. Além disso, devido a estrutura parametrizada, com poucos cliques é possível gerar plantas em 2D, e qualquer alteração no modelo principal é automaticamente atualizada para as plantas e vistas em 2D.

Segundo MULLER (2015), na prática atual ainda é comum ter diversas partes do projeto, como arquitetura, instalações e estrutura, sendo desenvolvidas por equipes diferentes em separado. A falta de compatibilidade entre os projetos exige que uma outra equipe faça a integração, para que não haja interferências nos projetos. Fato que não garante que desperdício de matérias e recursos humanos ocorram quando se observa necessidade de fazer modificações em estruturas e componentes já executados. Já o BIM oferece uma plataforma versátil que reuni todas as informações inerentes ao projeto em um mesmo modelo central, onde cada equipe pode alterar apenas o seu escopo, cortando a etapa de compatibilização e servindo como histórico após o projeto ser terminado.

As construtoras brasileiras utilizam o BIM para além das funcionalidades como a geração de modelos virtuais tridimensionais e a possibilidade de verificação de interferências nos projetos. As empresas vêm empregando a tecnologia para integração com o planejamento, comumente referida no meio como BIM 4D. Além das três dimensões espaciais que compõem o modelo 3D, é acrescida a variável tempo, incorporando-se ao modelo informações sobre o cronograma, sequência de obra e fases de implantação. Outra novidade é a integração do custo a outras variáveis, chamado de BIM 5D, permitindo que o modelo seja utilizado para gerar quantitativos e orçamentos.

Ao permitir visualizar de forma mais fácil o andamento da obra, o BIM 4D gera controles mais assertivos sobre os prazos de execução. Com isso, as informações obtidas com as frentes de trabalho no canteiro, sejam de progresso ou atraso, podem servir para auxiliar de forma mais rápida os gestores a tomar a decisão correta, minimizando os impactos no cronograma. Ao mesmo tempo, decisões que costumavam ser tomadas após o início da obra, são antecipadas para etapa de projetos, como no caso da logística de canteiro e de simulações de conflitos entre serviços.

Observa-se também que a utilização do BIM 4D produz ganhos consideráveis para quem trabalha com sistemas construtivos pré-fabricados e com prazos de execução apertados. Em obras com alto grau de industrialização, a modelagem tem um importante papel no dimensionamento e na operação dos equipamentos de movimentação, bem como na logística da entrega de pré-fabricados (TÉCHNE, 2014). O modelo 3D junto ao planejamento permite as equipes estudar os diversos cenários cronológicos, financeiros, construtivos.

Para a elaboração do planejamento 4D, além do projeto modelado, são necessários um cronograma digital e um software de integração. A ferramenta de BIM mais utilizada trata-se do Revit, programa de modelagem da Autodesk. Os programas de planejamento mais difundidos são o Project, que faz parte do pacote Office, e o Primavera. Para integração é comum no mercado a utilização do software Navisworks, também da Autodesk.

3.1.2 Escâner 3D

A tecnologia de escaneamento a laser 3D captura digitalmente as dimensões e a relação espacial de objetos usando uma linha de luz a laser. O escâner gera uma imagem com uma nuvem de pontos, que reproduz com precisão os objetos. Quando um objeto é grande demais para ser capturado em uma única digitalização, várias varreduras de diferentes linhas de visão podem ser ligadas entre si para completar a imagem da nuvem de pontos. Em seguida, os dados podem ser exportados para vários programas de modelagem para gerar desenhos CAD 2D ou um modelo 3D (FALLON, 2012).

Os escâneres a laser já apresentam diversas aplicações na construção civil. Integrados ao BIM, possibilitam verificar desvios de execução em relação ao projeto através de escaneamento 3D das construções. Com o escâner, gera-se um modelo tridimensional as built da construção, possibilitando comparar com projeto desenvolvido no BIM para identificar eventuais diferenças de posicionamento dos elementos executados. A tecnologia também permite um maior controle de qualidade, com a quantificação das não-conformidades, o acompanhamento do progresso da construção para fins de documentação e o controle de volume e dimensões de escavações (LEOPOLDO, 2015).

3.2. Materiais

Com a crescente preocupação com a sustentabilidade, busca-se o equilíbrio entre sociedade, economia e meio ambiente nas atividades humanas. Com isso a tendência é a de utilização de materiais mais corretos do ponto de vista do desenvolvimento sustentável. OLIVEIRA (2015) destaca os seguintes parâmetros para a escolha dos materiais:

...“materiais que menos agridam o meio ambiente, de origem certificada e com baixas emissões de CO₂; com menor geração de resíduos durante a fase de obra; que contribuam para o desempenho das edificações; que suprimam menores áreas de vegetação; que necessitem do menor volume possível de energia e água, tanto na fase de construção como na de uso; e, ainda, que possam ser reaproveitadas ao fim de seu ciclo de vida.” (OLIVEIRA, 2015)

As certificações ambientais para construções e as políticas públicas são fatores atuais que estimulam o uso de materiais de construção mais sustentáveis em edificações. O interesse do mercado brasileiro da construção civil por estas certificações tem crescido, devido ao status que uma edificação certificada ganha, a partir do aumento de seu valor agregado e da boa recepção pela população. Os dois certificados mais utilizados no Brasil são os LEED⁸ e AQUA⁹. Como ação de política pública observa-se a atuação do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS, que visa incentivar a redução dos impactos ao meio ambiente através do incentivo à compra de produtos sustentáveis.

É necessário ressaltar que nenhum material de construção pode ser considerado totalmente sustentável para qualquer uso. A sustentabilidade do material está ligada à situação em que se insere, como por exemplo a função que deve cumprir, local que será aplicado, o modo de produção, região que se localiza a obra e a zona bioclimática (FLORES, 2011). Deve-se buscar atender o tripé social, ambiental e econômico, porém o setor construtivo não atende o pilar da sustentabilidade com pesos iguais, uma vez que a sustentabilidades econômica e ambiental são mais buscadas.

⁸ A certificação LEED foi desenvolvida pela USGB (U.S. Green Building Council), instituição americana que busca promover edifícios sustentáveis e de ambiente agradável para os usuários.

⁹ O sistema AQUA (Alta Qualidade Ambiental) é uma certificação brasileira, adaptada do Haute Qualité Enviromentale (HQE), originado da França.

A seguir são apresentados exemplos de materiais de construção com princípios sustentáveis.

3.2.1 Cimentos Portland CPIII e CPIV

O cimento é um material construtivo que gera altos impactos ao meio ambiente, principalmente devido a emissão de CO₂. Os cimentos Portland CPIII e CPIV se analisados sozinhos não seriam enquadrados como sustentáveis, mas comparando a outros tipos de cimento, contribuem para melhor desempenho sustentável da edificação. A tabela 3.2 apresenta o comparativo dos impactos ambientais entre cimentos.

Tabela 2 - Comparativo dos impactos ambientais entre cimentos da indústria brasileira.
Fonte: GUERREIRO (2014)

Cimento Portland	C clínquer/ Cimento	Mudanças climáticas	Acidificação	Eutrofização	Depleção de recursos não renováveis	Energia incorporada
	%	kg CO ₂ -eq(100 anos)	kg SO ₂ -eq	kg PO ₄ -eq	kg Sb -eq	Mj -eq
Indústria brasileira						
CPII-E	75	705	1,386	0,22	2,141	3,609
CPII-F	92	871	1,702	0,268	2,634	7,039
CPII-Z	85	807	1,57	0,248	2,436	3,613
CPIII	45	457	0,996	0,156	1,466	3,465
CPIV	65	634	1,135	0,206	1,975	1,386

A partir dos dados da tabela, observa-se que os cimentos Portland CPIII e CPIV são os que possuem menor porcentagem de clínquer em relação ao cimento. O clínquer, por sua vez, é uma substância que gera elevados impactos na produção do cimento. Logo, as performances destes cimentos apresentam melhores resultados no quesito de impactos ambientais (GUERREIRO, 2014).

3.2.2 Concretos Ecológicos

A busca por materiais sustentáveis contribuiu para o surgimento dos chamados Concretos Ecológicos. A utilização do rejeito da construção civil (RCD) na composição do concreto é um exemplo de material com princípio sustentável, além de ser uma forma de retroalimentação do ciclo de produção. Com a substituição da brita, há uma redução no custo do material. Como desvantagem, o concreto com rejeitos apresentou menor fluidez, afetando sua trabalhabilidade e reduzindo o módulo de elasticidade (BARBOSA et al, 2011).

O emprego de fibras vegetais na fabricação de compósitos cimentícios é mais um exemplo de concreto ecológico. Existem diversos exemplos de fibras vegetais que vem sendo estudadas, como: fibras de sisal, fibra de coco, casca de arroz, fibras de cânhamo. Porém, segundo TORGAL e JALALI (2010), os concretos com fibras vegetais apresentam baixa resistência em meios alcalinos, sendo necessário investigar mais profundamente a interação da pasta de cimento com as fibras.

Pesquisadores da Universidade de Delft, Holanda, desenvolveram o chamado concreto auto curável ou bioconcreto. Ao misturar bactérias produtoras de calcário, descobriu-se que as rachaduras no concreto se “remendaram”. As bactérias são colocadas em cápsulas pequenas e biodegradáveis, contendo cálcio, para as manterem dormentes até a abertura das fissuras. Com a abertura das fendas, a água entra em contato com as cápsulas, as bactérias passam a se alimentar do cálcio, que reage com o carbono produzindo calcário, e assim fechando as fissuras. O processo já vem sendo utilizado como pulverizador sobre edifícios existentes (BOELEN et al., 2012)

3.2.3 Tijolo Ecológico

A utilização de terra na composição do tijolo solo-cimento é uma alternativa difundida de material eco eficiente. Na fabricação do tijolo, a mistura de solo e cimento é prensada, e para o assentamento é utilizada uma cola especial no lugar da argamassa. O processo não exige a queima, evitando desmatamentos e o lançamento de resíduos tóxicos no meio ambiente (SALA, 2006).

MOTTA et al (2010) apresentam outras vantagens do tijolo solo-cimento, como a resistência à compressão semelhante à dos tijolos tradicionais. A aparência lisa permite que o tijolo seja aplicado sem reboco, reduzindo os gastos com material. A durabilidade e o comportamento térmico também são equivalentes as dos tijolos cerâmicos. Como desvantagem, cita-se o fato do uso indiscriminado do solo favorecer processos erosivos no meio ambiente.

3.3. Sistemas Produtivos

O crescimento do mercado de habitação para população de baixa renda provocou mudanças nas exigências construtivas. Tal crescimento foi estimulado pela abertura de novas linhas de crédito a juros baixos e em prazos longos. Surgiram os chamados edifícios econômicos, compostos por unidades comercializadas com preços que variam entre R\$ 50 mil e R\$ 150 mil. Com um valor final tão baixo, a margem de lucro por edifício é também pequena. Para isso as construtoras buscaram sistemas construtivos rápidos, que permitem ganho de escala e, como consequência, redução de custos de construção. (TÉCHNE, 2008).

Segundo CALÇADA (2014), as inovações na construção civil acabam sendo inseridas a partir de tecnologias anteriormente já utilizadas e testadas por projetistas e construtores. As técnicas construtivas: Alvenaria Estrutural, Parede de Concreto e Steel Deck, descritas abaixo, não são inovações, porém voltaram a ser muito utilizadas na indústria nos últimos 10 anos como soluções de baixo custo.

3.3.1 Alvenaria Estrutural

A alvenaria estrutural está sendo largamente utilizada no Brasil como sistema construtivo, pois é capaz de atender aos critérios globais de desempenho e custo. A técnica de alvenaria armada de blocos de concreto foi introduzida no país em 1966, em edificações de 4 pavimentos projetados com base em normas americanas. No atual cenário, a construção em alvenaria estrutural tem recebido atenção da comunidade técnica científica, resultando na formação de núcleos de estudo em universidades e consequentemente no aprimoramento da técnica (GIHAD, 2015).

“É um processo construtivo que emprega blocos vazados na construção de paredes que em sua maioria desempenham função estrutural substituindo as funções das vigas e pilares de uma estrutura convencional reticulada, além da função de vedação.”
(SANTOS, 2015)

Uma das principais vantagens da alvenaria estrutural é na questão econômica, em virtude da otimização de tarefas na obra, gerando uma redução no desperdício de materiais produzido pelo constante retrabalho. Para prédios de até quatro pavimentos de alvenaria estrutural, há uma redução no custo da estrutura de 25% a 30%, quando comparado ao concreto armado (tabela 3.3). Observa-se pela tabela 3.3 que a redução

diminui para até 4% em edifícios de dezoito pavimentos. Atualmente, programas de apoio a construções populares, de até quatro pavimentos, têm levado as construtoras a adotarem a alvenaria estrutural como um método construtivo adequado aos padrões de exigências dos órgãos financiadores (GIHAD, 2015).

*Tabela 3 - Custos aproximados entre as estruturas convencionais e a alvenaria estrutural no Brasil.
Fonte: WENDLER (2005)*

Característica da obra	Economia (%)
Quatro pavimentos	25-30
Sete pavimentos sem pilotis, com alvenaria não armada	20-25
Sete pavimentos sem pilotis, com alvenaria armada	15-20
Sete pavimentos com pilotis	12-20
Doze pavimentos sem pilotis	10-15
Doze pavimentos com pilotis, térreo e subsolo em concreto armado	8-12
Dezoito pavimentos com pilotis, térreo e subsolo em concreto armado	4-6

De acordo com SANTOS (2015), sistema com alvenaria estrutural também apresenta as seguintes vantagens:

- a) Técnica executiva simplificada;
- b) Facilidade de treinamento – profissionalização;
- c) Eliminação de interferências;
- d) Facilidade de controle;
- e) Menor diversidade de materiais e mão-de-obra;
- f) Redução de armaduras e fôrmas.
- g) Eliminação das etapas de moldagem dos pilares e vigas

Ainda segundo SANTOS (2015), o sistema possui as seguintes limitações:

- a) As paredes não podem ser removidas sem substituição por outro elemento de equivalente função;
- b) Vãos livres;
- c) Vãos em balanço;
- d) Esbeltez da edificação.

3.3.2 Steel Frame

Uma vez que a construção civil está em busca de sistemas construtivos mais industrializados, com menos perdas, e também mais sustentáveis, o *Light Steel Framing* surge como uma boa solução. Apesar disto, assim como a Alvenaria Estrutural, não se trata de um sistema novo, pois suas origens datam no século XIX nas habitações construídas pelos colonizadores no território que hoje em dia é os Estados Unidos. Entretanto, o sistema ainda precisa vencer a falta de cultura no país de construção em *steel frame*, muito difundida nos países da América do Norte (FARIAS, 2013).

A construção em *steel frame* utiliza-se de perfis de aço galvanizado forjados a frio juntamente com componentes industrializados presentes na construção civil como painéis e placas. Os perfis metálicos são unidos por parafusos autobrocantes e o fechamento se dá com chapas *Oriented Strand Board* (OSB), *drywall* ou placas cimentícias (figura 10). O sistema pode ser aplicado em edificações até seis pavimentos, e reduzem o tempo de construção em mais de 30% (TÉCHNE, 2008).

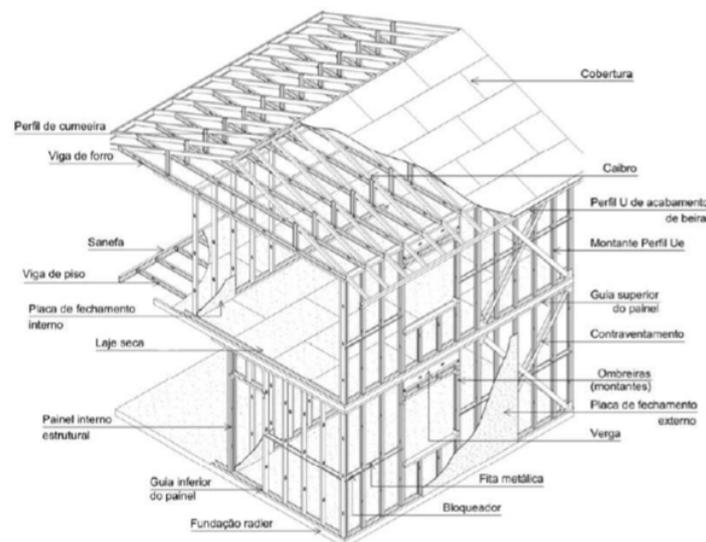


Figura 10 - Esquema construtivo LSF. Fonte: CASTRO (2005)

Uma das vantagens do sistema é que sua estrutura é composta por um grande número de elementos fazendo com que os esforços sejam melhor distribuídos pelos elementos que por sua vez são resistentes e leves. A leveza dos elementos também facilita a montagem e o transporte na construção. Por ser um sistema altamente industrializado, a matéria prima utilizada, os processos de fabricação, suas características técnicas e acabamento passam por rigorosos controles de qualidade. Além disso, a construção em

LSF é seca, diminuindo o uso de recursos naturais e desperdícios de materiais, e tem um bom desempenho termo acústico (FARIAS, 2013).

3.3.3 Parede de Concreto

Com o crescimento do mercado de habitação popular e o aumento da demanda por sistemas construtivos de rápida execução, a elaboração de projetos de edifícios com paredes estruturais de concreto representa uma solução factível para produção em escala. O sistema construtivo de parede de concreto, praticamente “extinto” no Brasil desde a década de 80, gera poucos resíduos no canteiro e exige menos mão de obra. É importante destacar a necessidade de um investimento inicial alto na aquisição de fôrmas metálicas, mas ele é recuperado tão mais rápido quanto maior a repetitividade obtida (TÉCHNE, 2008).

“O processo executivo de parede de concreto é resumido, basicamente, na montagem de formas metálicas, plásticas ou mistas e o preenchimento de concreto. Entre as formas de paredes são posicionados os itens de instalações prediais elétricas e de gás. Estas instalações são amarradas nas ferragens das paredes que são anteriormente posicionadas. As instalações prediais hidráulicas são, geralmente, executadas por fora das paredes, assim se houver algum tipo de vazamento na tubulação não há necessidade de rompimento do concreto para execução dos devidos reparos.”(ARÊAS, 2013)

No Brasil, até a o fim do século passado, a Alvenaria Estrutural era sinônimo de industrialização na construção civil. Todavia, nos últimos anos, com os incentivos financeiros concedidos pelo governo e setor privado, a construção de edificações utilizando parede de concreto como processo construtivo cresceu de forma notável¹⁰. A industrialização deste processo construtivo resulta na obtenção de um canteiro de obra onde se pode observar a racionalização de materiais, mão-de-obra e de tempo. (ARÊAS, 2013).

De acordo com a ABCP (2007), o processo construtivo com Parede de Concreto é totalmente sistematizado. O sistema construtivo racionalizado, permite fazer um planejamento completo e detalhado da obra. Nota-se que este baseia-se em conceitos de industrialização de materiais e equipamentos, mecanização, modulação, controle

¹⁰A redução de taxas de juros e o aumento do crédito imobiliário, somados a expansão do programa do governo Minha Casa, Minha Vida, abriu espaço para novos sistemas construtivos no Brasil (ARÊAS, 2013).

tecnológico e multifuncionalidade. Assim, a obra se transforma em uma linha de montagem, como na indústria automobilística.

Para ARÊAS (2013), o método construtivo com Paredes de Concreto não tem como principal objetivo a economia de tempo que é gasto para realização da construção. Ao mesmo tempo, quanto mais reduzido for o tempo de construção, menores serão os gastos com mão-de-obra, aluguel de máquinas e equipamentos, aluguel de containers habitacionais ou para depósitos. A produção em menos tempo, melhora os indicadores de produtividade e aumenta as margens do negócio.

Alguns cuidados devem ser tomados para evitarem gerar retrabalho com alto grau de dificuldade, principalmente na fase de concretagem. Erros na fase de vibração do concreto são os principais responsáveis pelo aparecimento de fissuras ou, até mesmo, de grandes brocas nas paredes. Outro erro comum, é a imperícia durante a execução das instalações prediais e armações de parede, de maneira que no ato da concretagem estas saiam da posição desejada. Por conseguinte, ocorre o entupimento das instalações e a armadura aflora na superfície do concreto. Também deve-se destacar, a desvantagem do sistema quanto a questão arquitetônica, uma vez que, uma vez o edifício foi construído, não há como fazer mudanças internas na organização das paredes.

3.3.4 Alvenaria Moldada

Nos últimos anos, no esforço de tornar a construção civil um setor também industrializado e mais eficiente, novos sistemas construtivos foram desenvolvidos, como por exemplo a Alvenaria Moldada. ESTA A técnica, desenvolvida em 2013, une características da alvenaria tradicional e das paredes de concreto para produzir uma construção econômica. O sistema consiste basicamente na inclusão de tijolos, ao invés de concreto puro, nas fôrmas para paredes de concreto moldadas in loco (COSTA et al., 2014).

Para que os tijolos permaneçam organizados dentro da fôrma, mesmo antes da inserção do concreto (ou argamassa), são usadas as juntas pré moldadas de entijolamento. Estas peças pré fabricadas funcionam como a argamassa das juntas de assentamento (entre os tijolos) na sistema de construção em alvenaria convencional. Além disso, as juntas pré moldadas de entilojamento têm ainda a função de fechar os furos destes tijolos (que estarão na vertical) para que não entre concreto no interior dos mesmos. As mesmas possuem ainda, espaçadores incorporados, que mantêm um distanciamento da fôrma,

deixando livre um espaço que no enchimento será ocupado pelo reboco(COSTA et al., 2014).

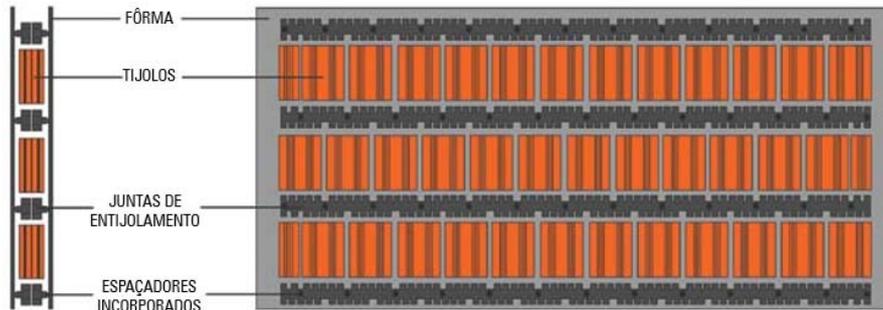


Figura 11 - Juntas Pré-Moldadas de entijolamento com espaçadores incorporados. Fonte:SHC (2013)

Como as juntas também são feitas de concreto, dentro da parede não haverá nenhum corpo estranho, apenas tijolos e cimento, como numa parede de alvenaria comum. Ao ser inserido o concreto (ou argamassa) de alta fluidez vai preenchendo todos os espaços vazios, envolvendo todos os tijolos e moldando, ao mesmo tempo, o reboco. Ao serem retiradas as formas, tem-se paredes alinhadas, lisas e com todas as características da parede artesanal, gastando-se pouco concreto (COSTA et al., 2014).



Figura 12 - Sistema de Alvenaria Moldada antes e depois da concretagem. Fonte: SHC (2013)

De acordo com a COSTA et al. (2014), os resultados quantitativos e qualitativos são, principalmente:

- a) Produto final similar à alvenaria tradicional;
- b) Permite industrialização do processo, dispensando o enquadramento manual dos tijolos (prumo);

- c) Melhor qualidade termo acústica relação à parede de concreto, o tijolo é excelente isolante acústico;
- d) 80% de redução do uso de cimento em relação à parede de concreto;
- e) 20% de redução do custo total da obra em relação à parede de concreto;
- f) Dispensa mão de obra especializada;
- g) Possibilidade de modificações futuras;
- h) Rapidez na execução: casa popular, paredes prontas em apenas um dia no ponto de pintura;
- i) Amplamente aplicável: edificações residenciais, comerciais, industriais, muros.
- j) O sistema permite a moldagem de uma casa popular inteira, in loco. O que evita os custos com montagem e transporte.

3.3.5 Concreto PVC

O sistema construtivo em concreto PVC possui uma metodologia inovadora de construção. O sistema é composto por perfis modulares de PVC que são combinados e preenchidos com concreto, produzindo paredes e divisórias resistentes para construção de edificações e tem como característica principal reduções significativas no cronograma de execução da obra com custo competitivo. Depois de montados os painéis de PVC, as paredes são travadas para assegurar o prumo e em seguida o concreto é aplicado utilizando uma bomba de argamassa adequada para brita 0 com mangote de 1½”, despejando concreto dentro da parede, evitando desperdícios (COSTA et al., 2014).

Ainda segundo a COSTA et al. (2014), as paredes são preenchidas com concreto com no mínimo F_{ck} 20Mpa e com slump de 23 cm com aditivo plastificante, garantindo a alta fluidez do concreto, eliminando a possibilidade de espaços vazios sem a necessidade do uso de vibrador. Para facilitar a passagem de fiação de tomadas e interruptores estão previstos nos painéis um módulo canaleta, substituindo assim a necessidade de conduítes e caixas para tomadas as paredes, que deverá ser instalado antes da concretagem. A laje de concreto é o principal apoio para as paredes de PVC. Na laje deverão ser empregados elementos estruturais em aço de construção, conforme cálculo estrutural. As tubulações de água e esgoto devem ser instaladas antes da montagem da malha de aço obedecendo as dimensões indicadas no projeto.



Figura 13 - Casa em Concreto PVC. Fonte: GLOBAL HOUSING (2013)

A maior vantagem do sistema construtivo concreto PVC é a significativa redução de homem/hora por m² de obra pronta. O prazo da obra se torna 5 vezes mais rápido quando comparado ao sistema convencional (tabela 4).

Tabela 4 - Comparativo Concreto PVC x Alvenaria. Fonte: GLOBAL HOUSING (2013)

Modelo Casa 43 m ²		
	Hh/m ²	Prazo Construção (dias)
Sistema Concreto PVC	2,41	12,9
Sistema Convencional	12,31	66,16
REDUÇÃO	11,9	53,26

De acordo com COSTA et al. (2014), outras vantagens do Sistema Construtivo em Concreto PVC são:

- a) O sistema de Concreto de PVC apresenta índice global de 2,41Hh/m², enquanto que o sistema convencional tem índice em torno de 12,31 Hh/m² construído;
- b) Ganho de até 27% com economia de materiais de construção;
- c) Redução em até 80% do desperdício com materiais;
- d) Economia de 75% de consumo de água e energia durante a obra;
- e) Ganho de até 7% na área útil devido a menor espessura das paredes;
- f) 70% menor o valor de contribuição para efeito de cálculo do INSS da construção, por se tratar de um sistema pré-fabricado;
- g) Os perfis são cortados no tamanho exato para o projeto, evitando desperdício;
- h) Facilidade de construção e possibilidade de ampliação após a entrega do projeto;
- i) Bloqueio contra umidade;
- j) Conforto térmico;

- k) Baixa manutenção;
- l) Facilidade com a limpeza das paredes;
- m) Conforto acústico;
- n) Permite aplicação de revestimentos; cerâmico, texturas, reboco, massa corrida ou pintura;
- o) Resistente a ação de fungos, e a maioria dos agentes químicos.

4. A TECNOLOGIA 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil tem sido reconhecida como uma indústria que consome uma quantidade considerável de recursos e causa significativo impacto ambiental. De acordo com ROODMAN e LENSSEN. (1995), a indústria da construção consome mais de 40% de todas as matérias-primas em nível mundial. Também devem-se considerar os seguintes problemas relativos à indústria de construção apontados por WARSZAWSKI e NAVON (1998): baixa eficiência de trabalho em comparação com máquinas automatizadas, alta taxa de acidentes, insuficiente força de trabalho qualificada e dificuldade de aplicar controles no canteiro de obras. A aplicação da tecnologia de impressão 3D pode minimizar esses problemas.

A construção habitacional foi identificada como uma área que poderia se beneficiar da aplicação de impressão em 3D. Como cada edifício é único, requer um investimento significativo em ferramentas especializadas. Inversamente, uma solução de impressão 3D exige apenas uma mudança no modelo de computador. Dessa forma, espera-se proporcionar melhorias no custo, eficiência, e velocidade para o consumidor e para o contratante (GARDNER et al., 2013).

WU et al. (2016), destaca que a utilização da impressora 3D pode trazer uma melhoria de produtividade em termos de:

- a) Redução do desperdício. O processo de impressão 3D permite uma maior precisão da quantidade do material que o objeto requer;
- b) Flexibilidade de design. O processo de impressão 3D permite que os projetistas desenvolvam estruturas que são difíceis de produzir usando as atuais práticas de construção;
- c) Mão de obra reduzida. Como a maioria do processo de impressão 3D é altamente automatizada, a mão de obra intensiva necessária no processo de construção pode ser significativamente reduzida.
- d) Tempo de construção pode ser altamente reduzido utilizando impressão 3D. Por exemplo, o tempo de construção de uma parede estrutural foi reduzido em 35% utilizando-se impressão 3D, quando comparado a construção com alvenaria (BUSWELL et al., 2007).

A construção civil tem acompanhado os desenvolvimentos em técnicas de impressão 3D e começou a aplicá-los em maior escala. Principalmente a impressão de concreto e materiais cimentícios ultimamente tem ganhado muito interessados no campo da arquitetura e construção. A primeira técnica de impressão 3D para construção civil é chamada de *Contour Crafting*¹¹, que é uma tecnologia de fabricação aditiva que usa o controle de computador para formar estruturas de materiais cerâmicos e a base de cimento (WOLFES, 2015).

A tabela 5 compara as 3 principais técnicas de impressão para prototipagem rápida apresentadas no item 2.2 com a tecnologia da *Contour Crafting*. A tabela resume os componentes, os processos de impressão, e os materiais empregados nas diferentes tecnologias de impressão 3D. Como pode ser visto para a impressão de objetos com base em metais, ambos o FDM e SLS podem ser usados como a tecnologia de impressão. Por outro lado, para a impressão de material cerâmico e concreto, o *Contour Crafting* é normalmente utilizado como a tecnologia de impressão.

Tabela 5 - Características de tecnologias de impressão 3D. Fonte: Adaptado de WU et al. (2016)

Tecnologias de impressão 3D	Componentes	O processo de impressão	Materiais de impressão
Estereolitografia	<ul style="list-style-type: none"> • Uma plataforma perfurada • Um recipiente de um líquido polímero curável por UV • Um laser UV 	Usando um laser UV para endurecer o polímero líquido e baixar a plataforma para criar múltiplas camadas	Resinas líquidas photosensíveis
FDM	<ul style="list-style-type: none"> • A cabeça de impressão • Material de impressão • Material de suporte 	O material de impressão é alimentado para a cabeça da impressora para depositar o material em camadas	ABS, Elastômero, Cera, Metais
SLS	<ul style="list-style-type: none"> • Feixe de laser focalizado • Material de impressão na forma de pó 	Material de impressão é depositado. Ele é, em seguida, consolidado utilizando um feixe de laser focado. O processo é repetido a partir de camada para camada	Materiais a base de nylon, aço, formas de areia
Contour crafting	<ul style="list-style-type: none"> • Um sistema de pórtico • Um bocal • Espátula • Material de impressão 	Material de impressão é extrudido a partir do bico e, em seguida, moldado. O sistema pórtico é controlado por computador e move-se com o bocal	Materiais cerâmicos, concreto

Além da *Contour Crafting*, há vários grupos de pesquisa que utilizam misturas especiais a base de cimento que podem ser impressos, formando grandes partes que

¹¹ Construção por contornos em tradução livre.

podem ser adequados para utilização como elementos de construção. Um grupo da Universidade de Loughborough desenvolveu em 2008 um sistema baseado na extrusão mais tradicional que eles chamam de *Concrete Printing*¹² que imprime partes a base de cimento. Sua abordagem é muito semelhante ao da operação de qualquer outra máquina FDM, no entanto, eles têm produzido peças grandes com todos os tipos de formas, com a possibilidade adicional de elementos internos, tais como a água, de gás ou de eletricidade. Já a técnica chamada de *D-Shape*, criada por Enrico Dini, utiliza um processo de deposição de pó (GARDNER et al., 2013).

Após a pesquisa sobre o tema, não foram encontrados sinais de estudos e testes de impressão de concreto nas universidades e construtoras brasileiras. Há uma iniciativa da *startup* Urban 3D, com sede em São Paulo, que busca a construção de moradias através da impressão 3D. A empresa está em fase de atração de investimentos e dialoga com governos e construtoras para viabilizar os empreendimentos. A proposta da Urban 3D é de vender sua tecnologia para construtoras interessadas. A partir daí, elabora um projeto e constrói uma fábrica de concreto pré-fabricado usando os aparatos tecnológicos mais modernos (DESIDÉRIO, 2016).

Este capítulo tem como objetivo discutir estas diferentes técnicas de impressão de concreto e comparar os principais prós, contras e áreas de aplicação.

4.1. *Contour Crafting* - CC

Contour Crafting (CC) é uma tecnologia de construção automatizada por computador, criada e desenvolvida na *University of Southern California*, para entregar uma produção rápida, facilidade de uso, redução significativa de resíduos e economias substanciais de custos. As primeiras publicações sobre a técnica de Khoshnevis podem ser encontrados em 1998 e muito progresso tem sido feito desde então. A técnica pioneira de impressão com materiais cerâmicos e cimentícios, serviu como base para o desenvolvimento de outras tecnologias.

Trata-se de um método de fabricação híbrido que combina um processo de extrusão para formar superfícies de objetos e um processo de preenchimento para

¹² Impressão de Concreto em tradução livre.

construir o núcleo do objeto em forma de camadas. Como mostrado na figura 14, o bocal de extrusão usado para criar elementos estruturais tem múltiplas saídas, uma para cada lado, e outras para o interior (núcleo) de uma estrutura de parede. Cada lado dos orifícios tem uma espátula adjacente. Com a extrusão do material, o atravessamento das espátulas cria (2 micron foi alcançado) superfícies lisas exteriores e de topo em cada camada (figura 15). O bocal pode ser ajustado para criar superfícies não-ortogonais, tais como cúpulas e abóbadas. A co-extrusão de múltiplos materiais também é possível. Por exemplo, gesso como o material de superfície exterior e concreto como material estrutural do núcleo podem ser co-extrudidos pelos bocais (KHOSHNEVIS, 2004).

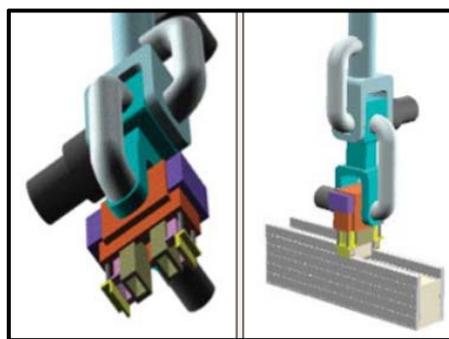


Figura 14- Conjunto do Bocal. Fonte: KHOSHNEVIS (2004)



Figura 15 - Parede impressa. Fonte: CONTOUR CRAFTING (2016)

De acordo com KHOSHNEVIS (2004), além do enorme potencial económico, a CC foi concebida para proporcionar melhor qualidade de vida, segurança superior, e redução no impacto ambiental. Neste sentido, a técnica promete a construção de habitações de design personalizado e com baixo custo e um nível de qualidade alto. Além disso, elementos de segurança inerentes ao processo pretendem reduzir significativamente a taxa de lesões no local de trabalho que são tão comuns na indústria da construção, diminuindo assim os custos dos litígios, seguros e tratamento médico. O impacto ambiental também pode ser significante através da economia de energia para a

construção e a quase eliminação dos resíduos. A tabela 6 apresenta a economia esperada com emprego da CC comparada a construção convencional.

Tabela 6 - Comparação Contour Crafting x Construção Convencional. Fonte: KHOSHNEVIS (2004)

Parcela de custo da Construção Convencional	Devido a	Se automatizado pela Contour Crafting
20-25%	Financiamento	Curta duração do projeto e controle do tempo de mercado irá eliminar ou reduzir drasticamente custo de financiamento
25-30%	Materiais	Sem desperdício na construção
45-55%	Mão de Obra	O trabalho manual será significativamente reduzido. O poder muscular será substituído pelo poder cerebral.

Atualmente, a técnica ainda se encontra em fase de testes e promete entrar no mercado em um ou dois anos. A tecnologia possui uma taxa de construção de 3min/m² para elevação das paredes, dessa forma pretende construir uma casa de 200 m² em apenas 20 horas, com uma mão de obra de apenas 4 pessoas. Com tal velocidade de construção e menor custo, Khoshnevis pretende utilizar a tecnologia para construir habitações acessíveis e dignas para população de baixa renda e para construir rapidamente abrigos em regiões que sofreram desastres naturais. A CC pretende construir as paredes das edificações *in situ* (figura 16), e realizar as instalações de forma automatizada com braços robóticos (CONTOUR CRAFTING, 2016).



Figura 16 - Esquema de construção com Contour Crafting. Fonte: CONTOUR CRAFTING (2016)

A pesquisa feita na *University of Southern California* vem sendo realizada em três fases:

Fase I - Visa desenvolver a tecnologia básica CC para imprimir estruturas de residência única de uma só vez. Um sistema de pórtico carrega o sistema de bocal e outros braços robóticos movimentam-se em duas faixas paralelas no local de construção (Figura 16).

Fase II - Consiste em expandir o sistema para maiores estruturas comunitárias e multi-residência (figura 17). O sistema de construção integrada também inclui métodos automáticos para ladrilhos, encanamento, fiação da rede elétrica e pintura. Desta forma, edifícios residenciais, hospitais, escolas e prédios do governo podem ser produzidos.

Fase III - Prevê adaptação da CC como a técnica de construção de comunidades inteiras. Sistemas e tecnologias de informação sensorial serão incluídos para inspeção em tempo real e *feedback* para gerenciamento de projetos buscando uma implantação eficaz.

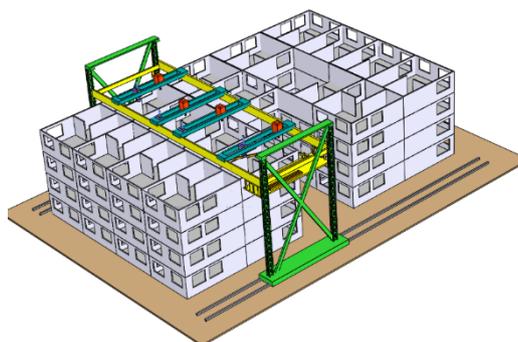


Figura 17 - Impressão de edifício. Fonte: CONTOUR CRAFTING (2016)

4.2. Concrete Printing

Outras tecnologias de impressão 3D também têm sido desenvolvidas nos últimos anos para acomodar as necessidades da indústria da construção, especialmente em impressão de concreto. Por exemplo, uma equipe de pesquisa na *Loughborough University* desenvolveu um processo chamado de *Concrete Printing*. Semelhante a técnica de Khoshnevis, a *Concrete Printing* possui processo de construção com base em extrusão de argamassa de cimento. No entanto, em comparação com CC, a tecnologia tem uma resolução menor de deposição (4-6 mm de profundidade em termos de camada) para alcançar uma maior liberdade tridimensional, tal como permite um maior controle de geometrias internas e externas (figura 18). Um dos subprodutos deste processo é o

acabamento da superfície com nervuras, pois a superfície resultante é fortemente dependente da espessura da camada (LIM et al., 2012).



Figura 18 - Concrete Printing. Fonte: LIM et al. (2012)

Apesar das muitas vantagens da CC, LIM et al. (2012) observaram algumas limitações da tecnologia. O molde, por exemplo, não é descartado e torna-se uma parte da parede. A CC requer passos excessivos incluindo moldagem, a instalação de reforço, e a extrusão de concreto para construir camadas de até 20 mm de altura. Estas limitações encorajou os pesquisadores da Loughborough a desenvolverem um outro método de construção, o *Concrete Printing*. A máquina de impressão de concreto tem um quadro de 5,4 m x 4,4 m x 5,4 m (altura) e uma cabeça de impressão que se movimenta uma viga móvel. Um bocal de 9 milímetros está apoiado com a cabeça de impressão para proporcionar o material de extrusão (YOSSEF e CHEN, 2015).

LE et al. (2012) conduziram um programa experimental para descobrir a mistura ótima para o concreto de alto desempenho. A busca considera além das propriedades de endurecimento (resistência à compressão de 100 MPa e a resistência à flexão de 10 MPa a 28 dias), mas também requisitos de trabalhabilidade e de extrusão. Uma mistura reforçada com fibra tem sido concebida, contendo superplastificantes e retardador para aumentar a trabalhabilidade e força.

4.3. D-Shape

D-Shape é um processo de impressão 3D, desenvolvido por Enrico Dini, que assim como a CC e a *Concrete Printing* é baseada em fabricação aditiva. Entretanto, a tecnologia de Dino não imprime peças por meio de extrusão como os outros dois modelos.

Ela usa deposição de pó seletivamente endurecido através da aplicação local de um material ligante. Camadas de areia são colocadas com a espessura desejada e assim compactadas. Uma cabeça de impressão composta com 300 bocais, montada numa estrutura de pórtico de alumínio (figura 19 - esquerda), se movimenta sobre a área de impressão e deposita o aglutinante, onde a peça deve ser sólida. A técnica pode imprimir até $6 \times 6 \times 6$ m de estruturas arquitetônicas (WOLFES, 2015)

Uma vez concluída, a peça é escavada para fora da camada de pó solto. A areia não endurecida atua como um suporte temporário para as camadas acima, o que permite formas que não podem ser criados por uma camada de material único de extrusão (Figura 19 - direita). Uma desvantagem desta técnica, é que a areia tem de ser espalhada e compactada para cada camada. Uma vez que o elemento é completado, toda a areia não utilizada deve ser removida (LIM et al, 2012).



Figura 19 - D-Shape. Fonte: WOLFES (2015)

4.4. Análise Comparativa das Principais Tecnologias

As tecnologias CC, *Concrete Printing* e *D-Shape* foram os principais métodos de impressão para a indústria da construção na década passada. Estes processos de impressão serviram como referência para o surgimento de novas tecnologias e para as recentes experiências na impressão de edifícios. Devido a esta relevância no cenário de impressão em concreto, e a maior abundância de informações sobre as técnicas, este tópico faz uma comparação entre os processos.

As três tecnologias são concebidas para impressão de concreto e têm muitas semelhanças em termos de processo de impressão. Todas as tecnologias de impressão são baseadas em fabricação aditiva. No entanto, cada tecnologia tem características distintas. A CC foi desenvolvida para ser um dispositivo montado na grua para aplicações in situ.

Tanto *D-Shape*, quanto *Concrete Printing* são processos de fabricação baseados em pórticos para fabricação fora do local de aplicação (WU et al, 2016).

Para GARDNER et al. (2013), o processo de impressão por extrusão oferece várias vantagens sobre os outros métodos. Escolhendo uma máquina a base de extrusão, a maior parte do desenho se torna independentemente do material a ser extrudido. Isso permite um certo grau de flexibilidade, de forma que algumas decisões de design podem ser adiadas ou desacopladas uma das outras. Em um sistema de deposição de pó, como *D-Shape*, as características exatas do material de impressão devem ser conhecidas no início do processo de design, visto que o seu confinamento e entrega tornam-se parte integrante do projeto mecânico da impressora. Por outro lado, para uma máquina a base de extrusão, se um melhor material é desenvolvido dentro do tempo de vida útil da impressora, basta uma mudança do fornecimento da cabeça de impressão e do material, mantendo toda a estrutura mecânica intacta.

Outra diferença das tecnologias se refere as soluções relativas as aberturas nas paredes. CC produz elementos verticais em grande parte de compressão. Nas aberturas de portas ou janelas uma verga é necessária, e a parede pode ser colocada acima, evitando problemas com o balanço. Já as tecnologias *D-Shape* e *Concrete Printing* necessitam de apoio adicional para criar estruturas em balanço ou com características de forma livre. *D-Shape* por ser um processo baseado em deposição de pó, utiliza o material não consolidado para apoio. *Concrete Printing* usa um segundo material, de maneira semelhante ao FDM. A desvantagem deste tipo de processos é que um dispositivo de deposição adicional requer mais manutenção, limpeza e instruções de controle. A simplicidade de abordagens baseados em pó, tais como a *D-Shape* devem ser equilibradas com os grandes volumes de material que devem ser depositados na área de construção e depois removidos para revelar a peça. Estas semelhanças e diferenças são resumidas na Figura 20 (LIM et al. 2012).

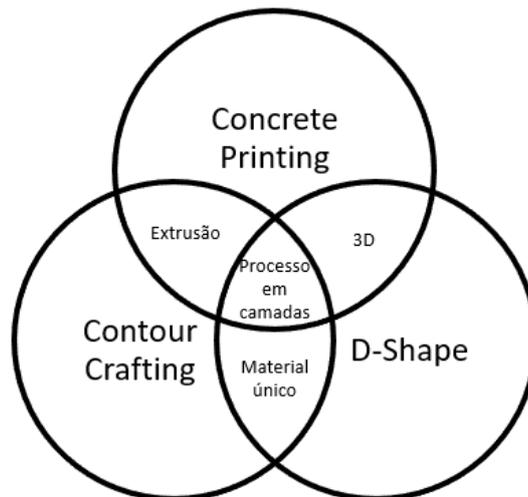


Figura 20 - Similaridades entre os processos. Fonte: Adaptado de LIM et al. (2012)

A resolução de impressão (em termos de espessura de camada) varia de 4 a 6 milímetros nas tecnologias *Concrete Printing* e *D-Shape*, para aproximadamente 13 milímetros na CC. A espessura de camada é proporcional a velocidade de construção, uma vez que quanto menor a espessura, menor a velocidade de construção. Os fatores de influência secundários para a resolução de impressão são o tamanho mínimo de detalhe, acabamento superficial e as características do material. Os processos de extrusão são fortemente influenciados pelo design da peça, tamanho das partículas que limitam a finura da extrusão e a estabilidade do filamento extrudido para criar uma ligação superior. No processo *D-Shape*, a questão relativa penetração do aglutinante através de cada camada é um importante parâmetro (LIM et al. 2012).

Para LIM et al. (2012) a velocidade de impressão também é afetada pelo material de impressão e/ou taxa de deposição de aglutinante. CC evita ciclos prolongados entre as camadas, imprimindo uma camada inteira com duas passagens da cabeça de deposição. O processo utiliza um diâmetro grande de extrusão resultando em uma alta taxa de construção de camadas, reduzindo o tempo de impressão. Já a tecnologia *D-Shape* utiliza um pórtico com vários bicos montados em série que requer uma única passagem por camada, embora o material de construção deve ser espalhado por toda área de construção, comprimido e achatado. *Concrete Printing* utiliza um único bico de deposição, e ao contrário da *D-Shape*, significa que apenas o material necessário é depositado para a construção. Contudo, a abordagem de bico único inevitavelmente limita a taxa de deposição porque o bocal deve atravessar toda a área de construção. A tabela 7 resume as características descritas de cada tecnologia.

Tabela 7- Comparação entre tecnologias de impressão de para construção civil. Fonte: Adaptado de LIM et al. (2012)

	Contour Crafting	Concrete Printing	D-Shape
Processo	Extrusão	Extrusão	Impressão tridimensional
Uso de forma	Sim. Torna-se parte da peça	Não	Primeira tentativa para construção livre
Material de Impressão	<ul style="list-style-type: none"> • Mistura de argamassa para molde • Material cimentício para construção 	Concreto para impressão (fórmula própria)	Material granular (pó de areia / rocha)
Aglutinante	Não. Extrusão de material úmido	Não. Extrusão de material úmido	Material à base de cloro líquido
Diametro do bocal	15mm	9 - 20mm	Desconhecido
Número de bocais	1	1	6 - 200
Espessura da camada	13mm	6 - 25mm	4 - 6mm
Reforço	Sim	Sim	Não
Prós	Bom acabamento. Devido a ação das espátulas laterais	Liberdade de forma	Liberdade de forma
Contra	Processo de extra (moldagem)	Taxa de deposição (bico único)	Remoção e limpeza do material após a impressão
Aplicações	Paredes e peças de concreto	Paredes e peças de concreto	Elementos paisagísticos e projetos marítimos

Finalmente, o acabamento e o pós-processamento diferem em cada processo. CC produz um acabamento característico com nervuras, que podem ser controladas e concebidas para explorar este efeito. Superfícies lisas, no entanto, exigem o alisamento do material úmido durante o processo de construção, ou a adição de acabamentos convencionais, tais como gesso ou argamassa sobre o acabamento impresso. O desenho da cabeça de deposição da CC permite a suavização da parte externa das paredes durante a fase de construção. Similar a *Concrete Printing*, o processo *D-Shape* produz uma texturano acabamento, o que requer moagem e polimento se tal superfície for desejada (LIM et al. 2012).

4.5. Outras Tecnologias

4.5.1 TotalKuston

Diversas evoluções na impressão 3D de concreto foram desenvolvidas ao longo dos últimos anos, mostrando resultados interessantes provenientes de diversas regiões do mundo. O empreiteiro norte-americano Andrey Rudenko fundou a TotalKustom, uma

empresa que é capaz de imprimir estruturas comparáveis a tecnologia CC (figura 21), porém com uma altura de camada muito menor (5 mm). Rudenko mostrou o potencial de sua técnica ao imprimir um modelo de castelo em escala no seu quintal (figura 22). Os componentes da torre foram impressos no solo e posteriormente montados, mas Rudenko pretende imprimir todas as futuras construções de uma só vez (WOLFES, 2015).



Figura 21 - Tecnologia TotalKustom. Fonte: TOTALKUSTON (2016)



Figura 22 - Castelo impresso3D. Fonte: TOTALKUSTON (2016)

Rudenko acredita que, em contradição com Khoshnevis, uma casa barata construída em um pequeno intervalo de tempo não é o alvo certo. Casas de boa qualidade, o que levará mais tempo para se construir do que edifícios mais baratos, será mais benéfico ao incluir aspectos como encanamento, isolamento e aspectos elétricos no processo de construção (WOLFES, 2015).

4.5.2 C-Fab

C-Fab é uma técnica de impressão, desenvolvida pela Branch Technology, para imprimir a estrutura de suporte de uma parede. Uma espuma isolante é pulverizada como parede interior, como ocorre nas práticas padrão de construção e revestimento com *drywall*, enquanto que o concreto é aplicado como o exterior da parede (figura). A composição do material de impressão é de aproximadamente 5% fibra de carbono e 95% de plástico ABS, mas a equipe de pesquisa ainda está testando outras misturas com fibra de vidro e retardantes de chamas (MOLITCH-HOU, 2015).

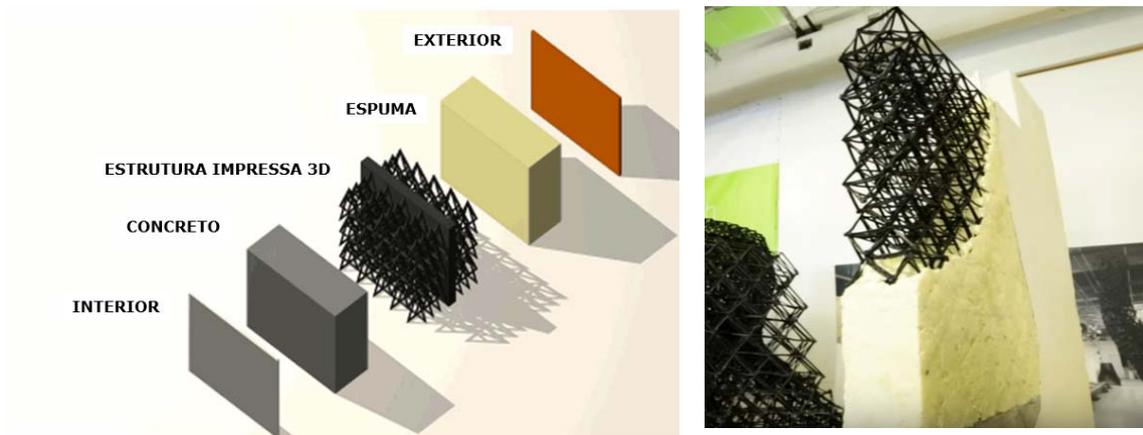


Figura 23 - Parede com tecnologia C-Fab. Fonte: MOLITCH-MOU (2015)

A máquina de impressão trata-se de um braço robótico de 3,8 metros de comprimento, que se translada em uma esteira de 10 metros de comprimento. C-Fab ainda está em fase de testes para aprovação das paredes estruturais. A ideia é que a estrutura treliçada impressa seja produzida em fábrica e enviada para os locais de aplicação. Esta estratégia de negócio considera o baixo peso da estrutura. As peças seriam então montadas *in-situ*, cobertas com materiais tradicionais de construção e endurecidas, porém com formas únicas de construção (MOLITCH-HOU, 2015).



Figura 24 - Braço Robótico da C-Fab. Fonte: MOLITCH - HOU(2015)

4.5.3 *Cybe Additive Industries*

Uma outra empresa que adotou a técnica de impressão de materiais cimentícios é a *Cybe Additive Industries*, fundada na Holanda. Esta empresa usa um tipo de argamassa que atinge uma resistência apropriada em poucos minutos. A máquina pode imprimir rapidamente o objeto, ou imprimir com uma textura mais lisa, que elimina o aspecto nervurado frequente em impressoras 3D de concreto. A máquina de impressão, chamada de ProTo 3DP, é baseada em um braço robótico de construção que tem um alcance de mais de 3 metros e imprime camadas de 30 milímetros. O braço robótico pode imprimir concreto a velocidades de 10mm por segundo até 400mm por segundo, dependendo do tamanho do cabeçote de impressão que está sendo usado (ANDERSON, 2015).



Figura 25 - Braço robô e Parede impressa pela Cybe. Fonte: ANDERSON (2015)

4.5.4 *Emerging Objects*

Uma técnica semelhante a *D-Shape* é aplicada pela *Emerging Objects*, uma subsidiária da *Rael San Fratello Architects*. A tecnologia utiliza uma mistura de cimento reforçado com fibra e com agregados miúdos, aplicando aditivos para melhorar a trabalhabilidade da mistura. Este método de impressão utiliza dois tipos de ligante: um aglomerante à base de álcool, que é um polímero sintético solúvel em água que tem alta adesão e propriedades de mistura e de alta resistência força. Este aglomerante vai ajudar a acelerar a cura da mistura e fazer com que seja mais denso e ter maior à flexão força. Um ligante secundário é adicionado para reforçar ainda mais o material, para sua hidratação, e juntando as fibras para a mistura de concreto. O resultado é um polímero híbrido de concreto (RAEL e SAN FRATELLO, 2011).

Emerging Objects já imprimiu diversos componentes de construção usando sua técnica. Os exemplos incluem a impressão do polímero de cerâmica chamado *Quake Columm*, que difunde as forças dinâmicas de um terremoto através dos componentes de intertravamento da coluna, e da produção cerâmica *Cool Brick*, que absorve água e deixa

a passagem do ar para esfriar passivamente uma sala (Figura A.27). Estas formas são possíveis, porque semelhante à técnica de Dini, o pó seco não utilizado atua como uma estrutura de suporte durante o processo de impressão e pode ser reciclado depois.



Figura 26 - *Quake Column e Cool Brick*. Fonte: RAEL e SAN FRATELLI (2011)

4.5.5 *Colônias Espaciais*

Diversas empresas de impressão de concreto, como: CC, TotalKuston e D-Shape possuem interesse na construção de colônias espaciais. CC ganhou interesse e financiamento da administração da NASA. De acordo com KHOSHNEVIS et al. (2012), os seres humanos irão retornar a lua e aterrissar em Marte no futuro, mas a maioria das propostas para a construção de colônias tem sido baseadas em transporte de elementos estruturais da Terra e montá-los em seu destino. Em vez disso, o uso de materiais *in situ* para a impressão é 3D sugerido pela CC. A tecnologia de Khoshnevis pretende usar uma combinação de argamassa de enxofre e do solo da lua sinterizado, chamado de regolito. Ambos podem ser facilmente obtidos *in-situ*, economizando assim custos de transporte. Experimentos promissores foram realizados, mostrando os benefícios da CC como um método de construção lunar (figura 27).



Figura 27 - *Experimentos para construções no espaço*. Fonte: KHOSHNEVIS et al. (2012)

Semelhante a CC, *D-Shape* tem encontrado financiamento em uma administração do espaço para desenvolver sua técnica: ESA. **D-Shape** também está interessado em usar regolito para imprimir estruturas em colônias lunares. Preliminares estudos têm sido realizados sobre o projeto eficiente (estrutural), as propriedades dos materiais, testes de vácuo e até mesmo em uma versão robótica da impressora *D-Shape* (CESARETTI, et al., 2014). O desenho de uma estrutura para posto avançado extraterrestre foi realizado, resultando numa estrutura semelhante a um iglu, com um escudo externo de regolito impresso. Este escudo possui uma estrutura, na qual as cavidades internas dão propriedades de isolamento térmico adequado e blindagem micrometeoróide, minimizando o uso de materiais (figura 28).

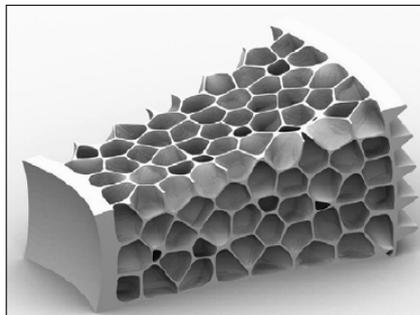


Figura 28 - Estrutura para posto avançado extraterrestre. Fonte: CESARETTI et al. (2014)

4.6. Concreto como Material de Impressão¹³

A fim de ser utilizado como um material para impressão, o concreto necessita se adequar a certos requisitos. Primeiramente, precisa ter um grau aceitável de extrusão de modo que possa ser extrudido a partir do bocal da impressora. Além disso, o concreto deve ligar-se entre si para formar cada camada e ter características de adequação suficientes que lhe permitam colocar-se por baixo corretamente, permanecer em posição, e ser suficientemente rígido para suportar as camadas superiores sem ruptura (WU et al, 2016).

¹³ Optou-se por se referir ao material de impressão como concreto para adequação as pesquisas estrangeiras. Apesar da literatura chamar de concreto, como somente é utilizada areia no traço e não brita, o correto seria argamassa com material de impressão.

Para GARDNER et al. (2013), o principal material a ser utilizado para impressão na construção civil deve ser o concreto. O tipo de concreto utilizado é importante, uma vez que tem de ser formulada para a utilização específica de fins de extrusão. O concreto de alto desempenho que usa aditivos de rápido endurecimento para torná-lo um material ideal para a extrusão. O traço do concreto deve ser tal que permita produzir um concreto com consistência adequada, de baixa fluidez, mas ainda ser capaz de fluir dentro dos tubos quando bombeada. Apesar do concreto ainda ser um material de construção convencional, a aplicação do mesmo, neste sentido, é inovadora com uma nova dosagem. Materiais adicionais de apoio serão necessários quando for imprimir em vazios, pois a auto sustentação não é possível em alguns casos. Ainda segundo GARDNER et al. (2013), este material de suporte pode ser o poliestireno e será removido com a utilização de acetona ou óleo de laranja, quando a impressão for finalizada. Alguns materiais alternativos, tais como plásticos, borracha e metal também foram exploradas para o futuro e a impressão mais sustentável.

O grupo de pesquisa de Khoshnevis tem alcançado uma mistura de concreto adequado com base em experimentos de tentativa e erro. Ela contém os seguintes componentes:

- Cimento CII- 37%
- Areia – 41%
- Plastificante - 3%
- Água - 19%

A mistura contém um aditivo plastificante para aumentar a trabalhabilidade e possui partículas pequenas para acomodar o diâmetro do bocal. A relação água / cimento é igual a 0,5, e experimentos mostram uma resistência à compressão média igual a 18,9 MPA. A mistura é concebida para que o processo de cura, em algumas horas, dê ao concreto a resistência necessária. Em várias publicações e entrevistas, Khoshnevis mencionou que a técnica de CC pode usar concreto reforçado com fibras, mas o tipo e percentual é desconhecido (WOLFES, 2015).

LE et al (2012), observaram que ao alterar as proporções de areia / agente ligante e as dosagens de outros aditivos na mistura, uma variedade de resistência à compressão foram alcançados. A resistência mais alta encontrada foi de 107Mpa aos 28 dias. Como tal, é razoável supor que a resistência do concreto impresso é suficientemente forte para

ser utilizada em projetos de construção residencial de grande escala, uma vez que concretos de 60-100 MPa são normalmente utilizados nestes projetos.

5. A EXPERIÊNCIA 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O progresso na impressão 3D evolui rapidamente: os custos caem, novos materiais de impressão estão sendo adicionados numa base regular e até mesmo vários materiais podem ser impressos uma só vez. A técnica mostrou o seu potencial em uma ampla gama de disciplinas, variando desde o mundo da medicina para o setor automotivo e da engenharia aeroespacial para usos domésticos. O estado atual da técnica permite, ainda, que as pessoas já possuam uma impressora 3D em suas casas por menos de 300 dólares (WOLFES, 2015). Seguindo a tendência, a indústria da construção civil visa a aplicação de impressão 3D para protótipos físicos e também para escalas maiores. Uma variedade de empresas e institutos espalhados pelo mundo as tornaram as perspectivas de impressão de concreto em realidade.

Neste capítulo buscou-se identificar experiências práticas do uso da impressora 3D na construção civil. Após uma revisão das principais tecnologias e estudos de impressão em concreto no capítulo anterior, neste apresentamos as aplicações na indústria da construção visando permitir melhor análise crítica dos métodos utilizados.

5.1. Descrição da Tecnologia 3D Aplicada em Protótipos Físicos

Novos paradigmas estão sendo criados com a introdução de tecnologias computacionais que disponibilizam poderosas ferramentas de projeto, gestão e visualização 3D, o que tem revolucionado a rotina dos escritórios de projetos e das construtoras. A possibilidade de utilizar modelos geométricos digitais para a produção de maquetes em escala, protótipos em tamanho real e até peças finais faz da prototipagem rápida e da fabricação digital grande aliada dos novos desafios de projeto (SENAI, 2012).

A modelagem 3D é particularmente pertinente para estudar as interferências entre projetos de especialidades, e a prototipagem pode ser potencialmente útil para estudo de detalhes e sequências construtivas de interfaces “complexas” ou que demandam grande precisão (CELANI et al, 2007). Comparativamente com os sistemas tradicionais de representação, a prototipagem rápida é, provavelmente, mais rápida e precisa na produção de modelos com maior nível de detalhe (MODEEN e CADCA, 2005).

Considerada uma ferramenta fundamental para compreensão e visualização de soluções construtivas, as maquetes físicas são amplamente utilizadas em diversas áreas como a de desenvolvimento de produtos, peças técnicas, artefatos biomédicos e construção civil. Utilizando a tecnologia com diversas vantagens sobre os métodos convencionais, a impressora 3D permite aos arquitetos, engenheiros e projetistas a confecção de protótipos e maquetes a partir de seus arquivos 3D, garantindo maior precisão e rapidez (COSTA e LEITE, 2014).

5.1.1 Aplicação na Produção de Protótipos Físicos para Fins Didáticos

No SENAI, a impressão 3D vem sendo utilizada largamente para demandas internas como as dos cursos técnicos em Desenho de Construção Civil e Edificações, a impressão de modelos de produtos para a mostra INOVA SENAI e pelos alunos em projetos finais dos Cursos Superior de Tecnologia e Pós-Graduação. Foram também produzidos protótipos físicos para fins didáticos que apoiam as disciplinas de desenho técnico e projeto arquitetônico.

Ainda segundo o SENAI (2012), o serviço de prototipagem rápida envolve uma metodologia composta por quatro fases. Para iniciar é necessária a confecção da modelagem 3D (tridimensional) da geometria, para tal se utiliza um software BIM. A segunda fase, ainda no ambiente 3D, consiste em converter o arquivo para o formato de entrada do software que realiza a preparação para a impressão, geralmente arquivo tem extensão STL (*Stereolithography Tessellation Language*). Na terceira fase, o modelo 3D STL é verificado, posicionado, orientado e enviado para fabricação. Na quarta e última fase, iniciada após a impressão do modelo, este passa por um processo de finalização, no qual é dado o acabamento final utilizando resinas específicas que conferem à peça características como resistência mecânica. Os modelos construídos a partir de arquivos com extensão STL podem ser customizados para atender às especificações do cliente e até mesmo pintados.

O investimento neste serviço diferenciado leva em consideração, além do valor agregado do recurso, o tamanho do protótipo, sua finalidade, bem como o nível de detalhamento e acabamento solicitado pelo cliente, por isso os valores e o tempo para execução do protótipo podem variar (COSTA e LEITE, 2014).

Segundo a COSTA e LEITE (2014), os resultados deste serviço são:

- a) Redução do tempo/custo para comunicar novas ideias;
- b) Visualização do modelo edificado em escala reduzida como grande colaboradora da compreensão espacial pelo cliente;
- c) Fácil duplicação das maquetes a custo reduzido;
- d) Cópias podem ser feitas em várias escalas;
- e) A construção da maquete deixa de ser ponto impactante no cronograma do projeto;
- f) Compatibilização dos processos de produção dos edifícios minimizando os problemas de engenharia como encaixes, montagens e interferências.

5.1.2 Aplicação na Produção de Prototipagem de Detalhes Construtivos Complexos

A tecnologia de impressão 3D também vem sendo utilizada para acelerar a construção da Sagrada Família em Barcelona, obra de Antoni Gaudí. O processo construtivo já utiliza essa tecnologia desde 2001, quando os protótipos artesanais foram substituídos pela prototipagem rápida. Na época, os arquitetos do projeto começaram a pesquisar tecnologias de ponta utilizados na engenharia aeronáutica e automotiva, como o software de CAD 3D. Após a interpretação dos dados, eles geraram arquivo 3D permitindo uma maior compreensão da matemática e das proporções inerentes aos projetos de Gaudí. O uso da impressora 3D, permitiu a materialização de desenhos CAD 3D de forma automatizada e com precisão em apenas algumas horas. A figura 29 mostra os protótipos impressos (3D SYSTEMS, 2015).



Figura 29 - Protótipos da Sagrada Família. Fonte: 3D SYSTEMS (2015)

O estúdio técnico da Sagrada Família adquiriu duas impressoras 3D Systems Spectrum Z510, que funcionam com tecnologia SLA. A tarefa da equipe de produção se tornou mais fácil, uma vez que dedicam a maior parte de seu tempo a pesquisa e

recomposição das formas. Como resultado, os arquivos CAD 3D das peças são gerados, e as Spectrum Z510 imprimem peças de acabamento impecáveis (3D SYSTEMS, 2015).

De acordo com a 3D Systems, a implementação da tecnologia apresentou os seguintes resultados:

- a) Modelos melhores: As impressoras são capazes de reproduzir pequenos detalhes sem esforço e com melhor precisão do que a mão humana.
- b) Menos material: As máquinas podem imprimir um processo inicial às escalas 1:50 e 1: 100 (e nas escalas de Gaudi de 1:10 e 1:25) e os resíduos dos materiais são reutilizáveis.
- c) Mais modelos, mais rápido: Trabalho rápido de impressão (2-3 cm no eixo Z, por hora).
- d) Melhor comunicação: Maior compreensão entre o escritório técnico e os construtores das peças.
- e) Menos erros: economia tempo e dinheiro.
- f) Peças funcionais: O material em forma de gesso da 3D Systems é semelhante ao utilizado nos modelos originais, o que permite a montagem das peças históricas e contemporâneas.

5.1.3 Aplicação na Produção de Maquetes

Outro exemplo de aplicação da tecnologia é a Eduardo Rodrigues Arquitetura, empresa sediada em Sorocaba (SP), fundada em 2009 pelo arquiteto e urbanista Eduardo Rodrigues. Buscando um diferencial para seu negócio, Rodrigues adquiriu o modelo de impressora 3D CubeX Duo, que conta com dois cabeçotes. O equipamento tem a maior área de impressão da categoria e, segundo a fabricante 3D Systems, conta com uma velocidade no funcionamento até duas vezes superior adas máquinas semelhantes.

A CubeX Duo permite utilizar cores e materiais (plásticos ABS e PLA) diferentes para imprimir cada projeto. No total, são mais de 30 opções de matérias-primas, sendo possível obter até 4 mil combinações para colorir as criações. Utilizando o equipamento, Rodrigues passou a fazer a impressão de maquetes de casas inteiras. Ele explica que, além das apresentações em programas específicos voltados para a arquitetura, a miniatura acaba sendo mais interativa e mais fácil de entender do que os desenhos em plantas convencionais (ROCHA, 2015).

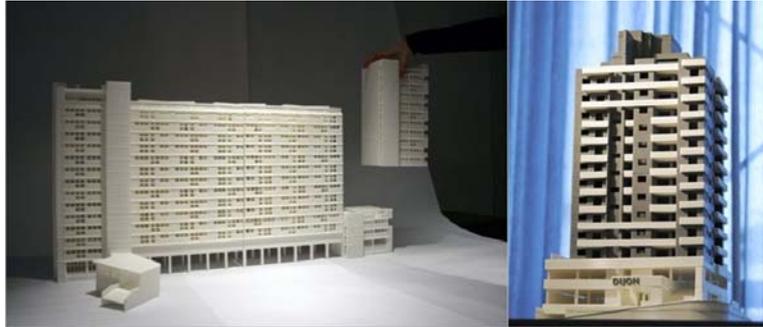


Figura 30 - Maquete impressa 3D. Fonte: ROCHA (2015)

Apesar das vantagens da prototipagem rápida, a utilização de maquetes não faz parte, necessariamente, do processo de desenvolvimento dos produtos na construção civil. Suas aplicações poderiam se estender a estudos completos sobre os vários subsistemas de uma edificação como, por exemplo, a localização das instalações elétricas e hidráulicas. Ainda poderia servir como simulador das condições de luminosidade e da disposição de móveis e aparelhos. A tabela 8 apresenta a relação entre os modos de produção na indústria seriada e na construção civil. A elaboração do pré-protótipo na indústria de produção em série tem sua forma análoga na construção civil através da fabricação das maquetes. O que se percebe, no entanto, é que estas possíveis funções das maquetes têm sido negligenciadas (CARRARO et al., 2016).

<i>INDÚSTRIA DE PRODUTOS SERIADOS</i>		<i>INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL</i>	
IDEALIZAÇÃO DO PRODUTO		IDEALIZAÇÃO DO PRODUTO	
↓		↓	
CONCEPÇÃO INICIAL (inclui estudos de viabilidade)		CONCEPÇÃO INICIAL (inclui estudos de viabilidade)	
↓		↓	
CONSTRUÇÃO, TESTES E ANÁLISES DOS PROTÓTIPOS			
↓		↓	
ANÁLISE DOS PROCESSOS	FORMALIZAÇÃO DOS PRODUTOS	ANÁLISE DOS PROCESSOS	FORMALIZAÇÃO DOS PRODUTOS
↓		↓	
DETALHAMENTO DE PRODUTO E PROCESSO		DETALHAMENTO DE PRODUTO E PROCESSO	
↓		↓	
IMPLANTAÇÃO, TESTES E ANÁLISES DO LOTE PILOTO			
↓		↓	
PLANEJAMENTO		PLANEJAMENTO	
↓		↓	
PRODUÇÃO		PRODUÇÃO	
↓		↓	
LANÇAMENTO DO PRODUTO NO MERCADO		ENTREGA DO PRODUTO	
↓		↓	
ASSISTÊNCIA TÉCNICA		OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	

Tabela 8 - Relação entre modos de desenvolvimento de produtos na indústria. Fonte: CARRARO et al.(2016)

Observa-se da tabela 8, a falta do processo de construção de protótipos na indústria da construção civil. Ao contrário, na indústria seriada a fase de protótipos é considerada de suma importância para a conformação final do produto e a sua definição pressupõe etapas sucessivas de modificações até se chegar ao produto ideal. Na construção civil, esta prática é pouco difundida. De acordo com CARRARO et al. (2016), isto pode ser explicado pelas variáveis que influem no seu processo, tais como: produtos únicos, custos, prazos de entrega, alta rotatividade e baixa qualificação da mão-de-obra, etc.

5.2. Descrição da Tecnologia 3D Aplicada na Produção de Edificações

Do ponto de vista da construção, os edifícios são também produtos que têm a potencial para empregar a impressão 3D. Houve muitas tentativas na indústria da construção civil para utilizar a impressão 3D para aumentar a personalização, reduzir tempo de construção e melhorar a acessibilidade (WU et al, 2016). Com uma melhoria significativa no desenvolvimento de impressoras 3D de grande escala para atender as necessidades da indústria, apresentam-se as experiências de sucesso de 4 empresas na impressão de edifícios.

5.2.1 Edifícios construídos com a montagem de partes impressas

A empresa chinesa Yingchuang usa uma impressora de 150 m (comprimento) x 10 m (largura) x 6.6 m (altura) para imprimir componentes de construção em grande escala com alta velocidade em suas fábricas. O método é semelhante a CC: uma folha interna e externa são impressas, seguidas por uma estrutura interna em forma de ziguezague. Como observa-se na figura 31, o reforço é colocado entre as camadas durante a impressão. A mistura utilizada contém fibra de vidro, aço, cimento, agentes de endurecimento e resíduos de construção reciclados (WOLFES, 2015).



Figura 31 - Paredes impressas pela Yingchuang e reforço estrutural. Fonte: CHARRON (2015)

Por mais parecido que a técnica se aproxima da CC, a empresa tem uma abordagem diferente quando se trata de logística. Onde CC visa imprimir uma construção inteira no local da construção, Yingchuang imprime grandes pedaços de um edifício em uma fábrica, os transporta e finalmente, executa a montagem no local da construção (WOLFES, 2015). A figura 32 apresenta o içamento das peças.



Figura 32 - Içamento das partes impressas. Fonte: CHARRON (2015)

Com esta técnica, a empresa construiu diversos edifícios, provando a aplicabilidade das impressoras na construção civil. Em 2014, dez casas de 200 m² foram montadas em um dia com partes impressas. Cada casa custou 4.800 dólares, porém maiores detalhes não foram informados. No ano seguinte, Yingchuang construiu o edifício mais alto do mundo com a tecnologia 3D. Junto com o prédio de 5 andares, foi lançado uma vila decorada de aproximadamente 1100 m² (CHARRON, 2015).



Figura 33 - Vista externa do prédio e da vila, e vista interna de um cômodo. Fonte: CHARRON (2015)

WU et al. (2016), apresentam os seguintes obstáculos que a Yingchuang enfrentou nos empreendimentos lançados:

- a) Processo indireto: semelhante a projetos pré-moldados de concreto, componentes de construção foram impressos numa fábrica fechada, transportados para a construção, e instalados no local. Assim, a vila e

prédio de 5 andares não foram impressos diretamente a partir de dados eletrônicos. Embora, ser comum o uso de conexões ao instalar componentes de concreto pré-moldado, na vila e no prédio foi adotado o contato direto das peças.

- b) Fragilidade: embora a fibra de vidro foi adicionada ao concreto impresso para aumentar a resistência, o material de impressão provou-se frágil para ser impresso como componentes estruturais e componentes de construção que abrangem cargas horizontais, como lajes e escadas. Quando usado em componentes de suporte de carga, o material pode ser impresso como forma. Assim, uma grande vantagem da tecnologia é a eliminação da fase de desforma.



Figura 34 - Forma de concreto da Yingchuang. Fonte: WU et al. (2016)

- c) Exclusão de serviços de construção: serviços de construção, como elétrica e canalizações não estavam integradas no processo de impressão 3D. Portanto, trabalho adicional teve que ser conduzido, causando problemas a integridade estruturais. A Figura35 mostra que os serviços de elétrica não estavam integrados no processo de impressão e a perfuração foi necessária, o que pode causar potenciais danos.



Figura 35 - Falta de integração com as instalações. Fonte: WU et al. (2016)

Outro marco importante é que da DUS Architects sediada em Amsterdã desenvolveu a sua própria impressora 3D de 6m de altura, chamada de *KamerMaker*, e possui o projeto de fabricar uma *canal house*¹⁴. A impressora já apresentou seu potencial imprimindo uma cabine urbana (figura36). *KamerMaker* é uma impressora com tecnologia FDM, e utiliza polipropileno como o material de impressão para produzir partes *in situ* com dimensões de até 2,2m × 2,2 m × 3,5 m. As partes são unidas para formar os cômodos e estes unidos para formar a casa. O projeto de construção será aberto ao público como um museu de design, com 12 quartos dedicado a diferentes tipos de pesquisa de edificios impressos. Este projeto foi previsto para ser concluído em 2017. (WU et al, 2016)



Figura 36 - Cabine urbana e Kamermaker. Fonte: Dusarchitects.com (2014)

VEEN (2014), após realizar uma pesquisa sobre a produção de casas utilizando polímeros como material impressão, chegou as seguintes conclusões:

- a) O comportamento do material de impressão sob altas temperaturas é muito menor do que para materiais de estruturas tradicionais. Portanto, o material de impressão atual não pode ser aplicado para criar estruturas (habitacionais).
- b) Não são esperados problemas para o material quanto a exposição a chuva e a neve, uma vez que o material de impressão bloqueia quase toda a água.

¹⁴*Canal House* é uma casa que está próxima de um canal. Estas casas costumam ser altas e esbeltas. Por causa do perigo de inundação, a porta da frente costuma estar em nível mais alto e o acesso se dá através de escadas. O piso do andar principal fica cerca de dois metros acima do nível da rua.

- c) O material isola bem o calor do ambiente. Para uma situação de inverno este é um dado positivo, mas para a situação no verão, isso significa que as medidas precisam ser tomadas para evitar que o interior do edifício possa se tornar muito quente.
- d) Para futuras impressoras 3D, recomenda-se aumentar o comprimento e a largura da área de impressão de tal forma que se tornem iguais à altura. Desta forma, aumenta-se a liberdade de design da edificação.
- e) No caso de se decidir por usar o polipropileno como material de impressão, este deve ser aplicado apenas como um molde permanente para o concreto. Nesse caso, os furos internos da geometria impressa podem ser preenchidos com concreto armado e materiais isolantes. No exterior da forma permanente, é necessário acrescentar pelo menos uma cobertura de fachada resistente ao calor.

5.2.2 Edifícios construídos com a impressão das paredes no local

A tecnologia de impressão da empresa TotalKuston foi utilizada para construir uma casa de festas de 130 m² anexa ao Lewis Grand Hotel, nas Filipinas. De acordo com BUREM (2016), foram necessários vários meses para preparar as peças em Minnesota, transportá-las para o local de aplicação, e montar a impressora. A equipe da TotalKuston encontrou nas Filipinas uma areia específica com cinzas vulcânicas, que apesar de ser difícil de extrudir, produziu paredes fortes com uma boa ligação entre as camadas. A impressão em 3D levou cerca de 100 horas, embora isso não incluía um grande número de paradas para instalar encanamento, fiação e na produção de vigas de concreto.



Figura 37 - Detalhes da impressão da casa de festas. Fonte: BUREM (2016)

De acordo com Rudenko, dono da TotalKuston, embora a impressão de casas seja barata em termos de materiais e mão de obra, ainda é muito caro montar uma fábrica em um país diferente e começar a montar impressoras. Diferente dos casos da Yingchuang, a casa nas Filipinas foi impressa *in - situ*. Rudenko afirma que com esta tecnologia é possível imprimir uma casa de tamanho médio em cerca de uma semana usando areia barata local, incluindo encanamento e fiação. O próximo objetivo da TotalKuston é construir 200 casas de baixa renda para a população das Filipinas (BUREM, 2016).

Uma experiência recente do emprego tecnologia de impressão 3D na construção civil foi a construção de um edifício de dois pavimentos pela empresa de Pequim chamada de HuaShang Tengda. Enquanto a Yingchuang imprimiu a maioria das peças com antecedência e as montou no local, a empresa de Pequim criou um processo de impressão 3D no local - um movimento que pretende reduzir muito os custos de transporte e aumentar a eficiência da produção. HuaShang Tengda construiu com tecnologia de impressão 3D o edifício de 400 m² em apenas 45 dias, enquanto que na construção convencional o prazo seria de três meses (BUREM, 2016).



Figura 36 - Edifício impresso pela HuaShang Tengda. Fonte: BUREM (2016)

O sistema de impressão possui algumas diferenças em relação a outros métodos, como a CC. As camadas de impressão são mais espessas (25 cm) e o material de cimento preenche toda a largura da parede, diferente da CC que possui folhas externas e internas (figura 39). Tais características indicam uma maior velocidade de impressão, porém não foram encontrados dados de sobre a velocidade da taxa de impressão das paredes. De acordo com BUREM (2016), todas as paredes e fundações são formadas com concreto C30, fornecendo resistência e durabilidade a estrutura. Durante os testes sísmicos, especialistas estimaram que ela pode suportar terremotos até o nível oito na escala Richter - que destruiria a maioria de outros edifícios.



Figura 37 - Impressão das camadas no sistema da HuaShang Tengda. Fonte: BUREM (2016)

O uso da impressora 3D reduz os custos de mão de obra, enquanto o aumento da eficiência obtido com o processo, significa que a mão de obra reduzida é necessária por períodos mais curtos de tempo. Deve-se salientar que, a armação e as instalações ainda não foram automatizadas e precisam ser levadas para o local e montadas artesanalmente. Além disso, nos locais de aberturas de portas e janelas foram utilizados suporte para elevação das paredes e escoras para sustentação das camadas acima (figura 40). Já o equipamento de impressão é controlado por sua configuração de software personalizado, que possui quatro sistemas separados: um sistema de formulação de ingrediente

eletrônico, um sistema de mistura de concreto, um sistema de transmissão e um sistema de impressão 3D (BUREM, 2016).



Figura 38 - Suporte e escora nas aberturas das janelas. Fonte: BUREM (2016)

O edifício apresenta as vantagens claras que a impressão 3D traz para a indústria da construção. Para BUREM (2016), este sistema de construção é mais rápido, mais eficiente e menos oneroso do que as técnicas tradicionais de construção. O material não precisa ser especialmente personalizado, para que os usuários possam simplesmente usar cimento produzido localmente para reduzir os custos de transporte de material. Além disso, a técnica reduz os desperdícios e o uso de formas.

5.3. Análise Comparativa das Principais Experiências

A tabela 9 apresenta a comparação entre as experiências de impressão 3D em edifícios. Observa-se que diferentes abordagens foram utilizadas pelas construtoras. Tanto a TotalKuston, quanto a HuaShang Tengda, optaram por imprimir toda a estrutura *in situ*. Já a Yingchuang produziu as partes do edifício em sua fábrica e como a DUS Architecturs juntou as partes no local de aplicação. Como era esperado, o concreto foi o material escolhido para impressão pela maioria das empresas. A opção da empresa de Amsterdã pelo polipropileno como material para as paredes da *Canal House*, mostrou-se equivocada de acordo com VEEN (2014).

Tabela 9 - Comparação das experiências de impressão de edifícios. Fonte: do autor

	Yingchuang	TotalKuson	DUS Architecturs	HuaShang Tengda
Material de Impressão	Mistura de fibra de vidro, aço, cimento, agentes de endurecimento e resíduos de construção reciclados	Mistura própria de concreto. Foi utilizada areia com cinzas vulcânicas	Polipropileno	Mistura própria de concreto C30.
Processo de construção	Impressão das paredes na fábrica e montagem no local de aplicação	Impressão de toda a estrutura <i>in-situ</i>	Impressão das peças <i>in-situ</i> seguido de montagem	Impressão de toda a estrutura <i>in-situ</i>
Estrutura das paredes	Dois folhas externas e estrutura interna em forma de zigzag. Reforçado com armadura	Dois folhas externas. Reforçado com armadura	Não informado	Camada única de concreto. Reforçado com armadura
Tempo de construção	Montagem em um dia (casa de 200m ²)	100 horas de impressão (casa de 130m ²)	Velocidade de impressão de 240mm / s	45 dias (casa de 400 m ²)
Custo	US\$4800,00 para uma casa de 400 m ²	Não informado	Não informado	Não informado

Em todos os casos, foram relatados como resultados: a diminuição de resíduos e redução dos custos e tempos de construção. Todavia, devido a fragmentação dos casos estudados, não é possível afirmar se os custos realmente serão menores com a aplicação da tecnologia 3D. A diminuição de resíduos e de mão de obra comum para todas as tecnologias de impressão 3D, indicam que a economia no orçamento de obra é possível. No caso da Yingchuang, foram impressas casas de 200m² por 4.800 dólares, custo menor que a tecnologia de construção tradicional. Os gastos com materiais também não são claros, pois o concreto utilizado em alguns casos trata-se de alto desempenho, com custo certamente superior ao de uma alvenaria cerâmica. Porém, algumas empresas trabalham com resíduos de construção reciclados que podem baratear a construção.

Outra questão que deve ser levada em consideração a aplicabilidade da tecnologia, é o preço de uma impressora de concreto. TotalKuston e *D-Shape* prometem lançar para os próximos anos a venda de impressoras a partir de 250.000 dólares. Considerando que estas impressoras serão utilizadas por grandes empreiteiros e agências governamentais, o preço é bastante acessível. Não foram encontrados dados relativos ao consumo energético da impressão em concreto.

A falta de dados mais concretos em relação a custos e prazos, impede uma análise mais concisa sobre a melhor abordagem para impressoras 3D na impressão de edifícios. Em sua pesquisa, GARDNER et al. (2013), avaliaram a possibilidade de uma máquina imprimir uma construção inteira numa única operação. Em seguida, foi decidido que a impressão em partes ofereceu várias vantagens sobre a impressão do edifício como um

todo. A principal vantagem da impressão em partes é que o tamanho da máquina seria muito menor do que um para construir como um todo. Isto reduziria significativamente o custo da impressora e o tempo necessário para configurá-la. A impressão em partes pode aumentar a precisão da máquina, embora o custo de construção após a impressão aumentaria à medida que as partes ainda têm que ser montadas.

Outro ponto que deve ser analisado é em relação a integração das instalações com o processo de impressão. No caso da Yingchuang foi necessário perfurar a parede para passagem dos conduítes de elétrica. Nos edifícios construídos com a impressão das paredes no local, os serviços de instalações também não foram robotizados. A evolução da tecnologia no sentido de automação destes serviços é fundamental para a customização em massa. Enquanto esta integração for feita de forma artesanal, será necessário um controle rígido, com acompanhamento de profissionais com grande conhecimento no projeto, seja no local da obra ou na fábrica de impressão. A falta de controle pode levar a erros na execução, aumentando sensivelmente os custos.

As experiências estudadas mostram que a tecnologia pode ser usada tanto para edificações de arquitetura complexa e elaborada, quanto para habitações padronizadas. TotalKuston construiu uma casa de festas luxuosa, incluindo até a impressão de uma jacuzzi. Já a empresa Yingchuang montou 10 casas em um dia, demonstrando o potencial da técnica em edificações para famílias de baixa renda. É importante ressaltar que, no caso da Yingchuang, as paredes foram impressas na fábrica, transportadas e montadas no local. Até o momento que este trabalho foi escrito, não houve casos de construções de habitações para população de baixa renda, através da impressão de casas inteiras *in - situ*.

A habitação sob medida, na forma de projetos arquitetônicos inovadores e únicos, é um mercado que pode se beneficiar da tecnologia 3D. Normalmente, os edifícios são tradicionalmente concebidos para serem simples e lineares. Através da utilização da impressão 3D, desde que o design foi analisado para a sua estabilidade estrutural, produzir uma curva não é mais complicado ou dispendioso do que produzir uma borda em linha reta. Para demonstrar as diversas possibilidades de concepção de edifícios, GARDNER et al. (2013) analisaram como seria a construção de uma *Shell House*¹⁵ a partir da montagem no local de peças impressas. Em 2016, com a tecnologia de impressão da

¹⁵*Shell House é um tipo de casa no Japão com arquitetura moderna em formato de concha.*

empresa Yingchuang, foi construído em Dubai o primeiro escritório do mundo com tecnologia de impressão 3D (DISTASIO, 2016). Ao comparar as figuras 41 e 42, observa-se a semelhança do escritório com a *Shell House* e comprova-se a aplicabilidade da tecnologia 3D na habitação sob medida com impressão em fábrica.



Figura 39 - Shell House. Fonte: GARDNER (2013)



Figura 40 - Escritório impresso em Dubai. Fonte: DISTASIO (2016)

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve, entre seus objetivos, apresentar os avanços e tendências da impressão 3D, e sua aplicação na construção civil. A tecnologia impressão 3D pode revolucionar a indústria como um todo, de forma que ela reduz os custos para a produção individualizada e para a customização. As impressoras possuem tecnologia que gera poucos resíduos, exige menos mão de obra comparada a outros processos construtivos e facilita a criação de protótipos. Enquanto que a construção civil ainda é uma indústria em que grande parte do processo é executada por técnicas artesanais, em contraste ao alto volume de produção e rapidez exigida pelo mercado atualmente.

Existem diferentes técnicas para a prototipagem rápida. Algumas impressoras extrudam plástico derretido em camadas para fazer os objetos (FDM), enquanto que outras usam laser para endurecer camadas de resina (SLA) ou pó (SLS). Essas tecnologias vêm apresentando bons resultados em diversos setores como na marinha, na produção de peças personalizadas em navios, e na aviação, contribuindo para a diminuição do peso dos aviões, o que resulta na redução do consumo de combustível e na emissão de poluentes no ar. A medicina é outra área de grandes avanços, com a impressão de réplicas de órgãos, e com as próteses ortopédicas impressas, que além de se adaptarem as características físicas de seus usuários apresentam um preço competitivo.

As novas tecnologias na construção civil acabam sendo inseridas a partir de tecnologias anteriormente já utilizadas e testadas por projetistas e construtores. Técnicas construtivas como a Alvenaria Estrutural e a Parede de Concreto, não são inovações, porém voltaram a ser muito utilizadas no Brasil nos últimos 10 anos como soluções de baixo custo. Por outro lado, a tecnologia BIM surge como novo software para modelagem, armazenamento e análise de modelo. A utilização do BIM é fundamental em obras com alto grau de industrialização, como no caso da construção com impressão de concreto, e a modelagem tem um importante papel no dimensionamento e na operação dos equipamentos de movimentação, bem como na logística da entrega.

Em relação as tecnologias de impressão com materiais cimentícios, foram apresentadas diversas abordagens. As principais experiências e pesquisas envolvem a produção a partir da extrusão do concreto, enquanto que outras utilizam a deposição de pó seletivamente endurecido. Além disso, as máquinas de impressão variam de acordo com a tecnologia, umas são formadas com um pórtico que carrega o sistema de bocal e

outros braços robóticos movimentam-se em duas faixas paralelas, enquanto que outras máquinas se resumem a um braço robótico.

As experiências de impressão 3D na construção civil se dividem entre protótipos físicos e na construção de edifícios. A utilização da impressora para produção de maquetes no Brasil vem crescendo e a tecnologia pode ser mais usada na fabricação de protótipos para a testes na construção.

A tecnologia 3D já é utilizada tanto na execução de casas simples e funcionais como em edificações com arquitetura complexa. Foram construídas casas com impressão *in-situ*, bem como edifícios que foram montados com paredes impressas em fábricas.

Ainda há no mercado, uma divergência de opiniões quanto o melhor emprego da impressão na construção civil. Devido as experiências no setor e a rápida evolução da técnica, a impressão de concreto merece atenção como candidata a baratear e acelerar a construção de habitações de forma geral. Para os próximos anos, entretanto, espera-se que a técnica seja mais usada para edifícios de arquitetura rebuscada, uma vez que a tecnologia já provou sua eficiência para a customização e personalização em outras áreas.

Devido a novidade do tema, a falta de dados mais concretos sobre custo, prazo e qualidade, impediu uma análise mais completa e a comparação mais prática com a construção convencional. Os estudos realizados não permitem ainda apurar qual a melhor tecnologia para ser aplicada em grande escala na construção civil. Somente o uso continuado em outras experiências poderá permitir uma análise crítica do custo benefício técnico prático para a seleção da tecnologia mais adequada.

Não foi encontrado nenhum trabalho brasileiro que abordasse o emprego da impressão 3D na construção civil. Desta forma a presente obra serve como guia inicial para o tema e abre espaço para que novas iniciativas surjam para aprofundar os estudos e aplicações da impressão com concreto. Para trabalhos futuros, há a sugestão de realizar pesquisa sobre: o concreto como material de impressão; integração dos sistemas elétricos e hidráulicos com a impressão de concreto; logística em uma obra de impressão de concreto; comparação da impressão de um edifício como um todo *in-situ* em relação a impressão de das partes em uma fábrica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D PRINTING INDUSTRY. **History of 3D Printing**. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history>> Acesso em: 15 ago. 2016, 19:43:11

3D SYSTEMS. **Sagrada Familia: Color Jet Printing (CJP) Helps Architects at Sagrada Familia Follow Gaudi's Method While Saving Time and Money**. 2016. Disponível em: < <http://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/sagrada-familia-color-jet-printing-cjp-helps-architects-sagrada-familia> > Acesso em: 09 nov. 2016, 17:33:11

ABCP. **Parede de Concreto - Coletânea de ativos 2007/2008**

AGOPYAN, V et al. **Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras**. Coletânea Habitare - vol. 2 - Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional, 226-249, São Paulo, 1998.

ANDERSON, C. **Makers A Nova Revolução Industrial**. Elsevier Brasil, 2012.

ANDERSON, S. (2015). **Concrete Plans: CyBe's Berry Hendriks Describes Plans to 3D Print with Mortar**, 2015. Disponível em:< <https://3dprint.com/35727/cybe-berry-hendriks-concrete/> > Acesso em: 04 nov. 2016, 20:14:11

ARÊAS, D. **Descrição do Processo Construtivo de Parede de Concreto para Obra de Baixo Padrão**. Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2013

BADOTTI, A. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado às peças obtidas por estereolitografia**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BARBOSA, A et al, **Segurança e saúde na Indústria da construção no Brasil: Diagnóstico e Recomendações para a Prevenção dos Acidentes de Trabalho**, Sesi – Departamento Nacional, Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/arquivos/projetos/estatistica/construcao-civil.pdf>> Acesso em: 03 ago. 2016, 18:44:31

BARBOSA, M. T. et al. **Concreto Ecológico**. Universidade Federal de Juiz de Fora/UFJF. 18º Concurso Falcão Bauer. 2011.

BASS, C. **The past, present and future of 3-D printing**, The Washington Post, 2011. Disponível em: <https://www.washingtonpost.com/national/on-innovations/the-past-present-and-future-of-3-d-printing/2011/08/21/gIQAg4fJZJ_story.html> Acesso em: 02 ago. 2016, 9:25:46

BBC NEWS, **Transplant jaw made by 3D printer claimed as first**, 2012. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/technology-16907104>> Acesso em: 23 ago. 2016, 17:03:46

BOELENS et al. **A Concrete Solution for a Concrete Problem**. Universidade de Delft. 2012. Disponível em: < http://www.foundation-imagine.org/uploads/media/Finalist_Bioconstruction_A_concrete_solution_for_a_concrete_problem.pdf >. Acesso em: 10 ago. 2016, 12:12:11.

BUREM, A. **Exquisite 400 m2 villa 3D printed on-site in Beijing in just 45 days**. 3Ders.org, 2016. Disponível em: <http://www.3ders.org/articles/20160614-exquisite-400-m2-villa-3d-printed-on-site-in-beijing-in-just-45-days.html>> Acesso em: 11 nov. 2016, 18:27:00

BUREM, A. **Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world's first 3D printed hotel, planning 3D printed homes**. 3Ders.com, 2015. Disponível em: < <http://www.3ders.org/articles/20150909-lewis-grand-hotel-andrey-rudenko-to-develop-worlds-first-3d-printed-hotel.html> > Acesso em: 11 nov. 2016, 16:47:00

BUSWELL, R., SOAR, R., GIBB, A. et al. **Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for Construction**, 2007.

CALÇADA, P. **Estudos dos processos produtivos na construção civil objetivando ganhos de qualidade e produtividade**. Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2014.

CAMPOS, V. F. Coluna liderança: A inovação contínua. **O Papel: revista mensal de tecnologia em celulose e papel**, v. 77, n. 2, p. 31-31, 2016.

CARRARO, F., SIQUEIRA, D., MELHADO, S. **Qualidade do Projeto: Uma Comparação entre a Indústria Seriada e a Indústria da Construção Civil**. Escola Politécnica da USP, 2016.

CASTRO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados. Light steel framing**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

CELANI, C.; PINHEIRO, E; GRANJA, D. **Lean thinking and rapid prototyping: towards a shorter distance between the drawing board and the construction site**. Virtual and Rapid Prototyping, 2007.

CHARRON, K. **WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building**. 3Ders.com, 2015. Disponível em: < <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html> > Acesso em: 11 nov. 2016, 16:47:00

COSTA, D., LEITE, R. **Caderno de casos de inovação na construção civil**, CBIC, 2014. Disponível em: < http://cbic.org.br/caderno_inovacao/caderno%20inovacoes%20abril_2014%20web.pdf > Acessado em: 08 set.2016, 20:20:12

CESARETTI, G., DINI, E., DE KESTELIER, X., et al. **Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology**. França, 2014.

CONTOUR CRAFTING, Home, 2016. Disponível em: < <http://www.contourcrafting.org> > Acesso em: 31 out. 2016, 18:21:00

DESIDÉRIO, M. **A startup brasileira que vai fazer prédios com impressão 3D**. 2016. Disponível em: < <http://exame.abril.com.br/pme/a-startup-brasileira-que-vai-fazer-predios-com-impresao-3d/> > Acesso em: 21 nov. 2016, 12:43:00

DISTASIO, C. **Dubai debuts world's first fully 3D-printed building**. Inhabitat, 2016. Disponível em: < <http://inhabitat.com/dubai-debuts-worlds-first-fully-3d-printed-building/> > Acesso em: 15 ago. 2016, 21:01:45.

DUARTE, H. **Descubra como surgiu a impressora 3D**, TECMUNDO, 2014. Disponível em: < <http://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2014/04/descubra-como-surgiu-impressora-3d.html> > Acesso em: 15 ago. 2016, 21:01:45.

FALLON, E. **A Look at 3D Laser Scanning in the Construction Industry and Beyond**. Rhodes Group, 2012. Disponível em: < <http://rhodes-group.com/newsletter/winter-2012/scanning-the-third-dimension-a-look-at-3d-laser-scanning-in-the-construction-industry-and-beyond/> > Acesso em: 4 set. 2016, 12:34:42

FARIAS, J. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do Método Construtivo Light Steel Framing numa Residência Unifamiliar de Baixa Renda**, Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2013.

FLORES, C. Z. **Procedimento para especificação e compra de materiais da construção civil de menor impacto ambiental**. Dissertação (Pós-graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR. 2011.

FORD, **Building in the Automotive Sandbox**. Disponível em: < <https://corporate.ford.com/innovation/building-in-the-automotive-sandbox.html> > Acesso em: 23 ago. 2016, 13:59:04

GARDNER, M., ALWI, A., KARAYIANNIS, S., et al. **Construktion, MegaScale 3D Printing**. University of Surrey, 2013.

GIHAD, M et al. **Construção em Alvenaria Estrutural**, Blucher, 2015.

GOLDBERG, D. **History of 3D Printing**, Autodesk, 2014. Disponível em: < <https://lineshapespace.com/history-of-3d-printing/> > Acesso em: 16 ago. 2016, 15:36:55

GRIMM, T. **Choosing the Right RP System. A study of seven RP Systems**, 2005.

GSV Capital. **A Whole New Dimension**, 2013. Disponível em: < <http://gsvcap.com> >. Acesso em: 20 ago. 2016, 21:24:21

GUERREIRO, A. Q. **Avaliação do Ciclo de Vida dos Cimentos de Produção mais significativa no Brasil.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS. 2014.

HIPOLITE, W. **Beijing University Unveils Enormous 3D Printed Aircraft Frames & More, Created with SLS Technology.** 3DPRINT.COM, 2015. Disponível em: <<https://3dprint.com/82169/3d-printed-aircraft-parts/>> Acesso em: 22 ago. 2016, 18:59:04

IBGE. **Censo 2010: Aglomerados Subnormais – Primeiros Resultados.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000015164811202013480105748802.pdf>> Acesso em: 5 jul. 2016, 12:45:01

ICHI, Á. **Análise da viabilidade da aplicação da tecnologia CAD-CAM por prototipagem rápida na confecção de estrutura metálica da prótese parcial removível comparando-a ao método convencional.** São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2010.

KARASINSKI, V. **Como funciona uma impressora 3D,** TECMUNDO, 2013. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/impressora-3d/38826-como-funciona-uma-impressora-3d-ilustracao-.htm>> Acesso em: 01 ago. 2016, 10:34:21

KARLGAARD, R. **3D printing will revive American manufacturing,** Forbes, 2011. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/richkarlgaard/2011/06/23/3d-printing-will-reviveamericanmanufacturing/>> Acesso em: 01 ago. 2016, 14:10:05

KHOSHNEVIS, B. **Houses of the future.** Disponível em: <http://craft.usc.edu/CC/images/houses_future.pdf> Acesso em: 01 jul. 2016, 19:43:21

KHOSHNEVIS, B., ZHANG, J. **Extraterrestrial Constructing Using Contour Crafting,** 2012

KRASSENSTEIN, B. **20,000 3D Printed Parts Are Currently Used on Boeing Aircraft as Patent Filing Reveals Further Plans,** 3DPRINT.COM, 2015. Disponível em: <<https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print>> Acesso em: 22 ago. 2016, 18:39:00

LE, T., AUSTIN, S., LIM, S., et al. **Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete.** Materials and Structures, 45(8), 1221–1232. 2012.

LEOPOLDO, J. **Estudo dos processos produtivos na construção civil objetivando ganhos de produtividade e qualidade.** Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2015.

LIM, S., BUSWELL, R., LE, T., et al. **Developments in construction-scale additive manufacturing processes.** Automation in Construction, 21, 262-268. 2012.

MEARIAN, L. **3D printing can re-create your vascular system for pre-op practice,** COMPUTER WORLD, 2015. Disponível em: <<http://www.computerworld.com/article/3008229/emerging-technology/3d-printing-can-recreate-your-vascular-system-for-pre-op-practice.html>> Acesso em: 23 ago. 2016, 15:11:00

MIZOKAMI, K. **The future of America's aircraft carriers? Floating drone factories.** The Week, 2016. Disponível em: <<http://theweek.com/articles/619455/future-americas-aircraft-carriers-floating-drone-factories>> Acesso em: 19 ago. 2016, 19:34:20

MODEEN, T. CADCA, M.: **The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture.** Automation in Construction 14 (2005) 215-224.

MOLITCH-HOU, M. **Brach technology is 3D printing the future of construction one wall at a time,** 2015. Disponível em: < <https://3dprintingindustry.com/news/branch-technology-is-3d-printing-the-future-of-construction-one-wall-at-a-time-54149/>

>Acesso em: 04 out. 2016, 17:55:07

MOTTA, J. C. et al. **Tijolo de Solo-Cimento: Análise das Características Físicas e Viabilidade Econômica de Técnicas Construtivas Sustentáveis.** 2014. Disponível em: < <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/view/1038/665> >. Acesso em: 04 ago. 2016.

MULLER, L. **Utilização da Tecnologia Bim (Building Information Modeling) Integrado a Planejamento 4D na Construção Civil,** Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA, T. **Estudo sobre o uso de materiais de construção alternativos que otimizam a sustentabilidade em edificações.** Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2015.

PAEZ, M. **Estudo para o projeto de um mecanismo para uma máquina de modelagem por fusão e deposição,** Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2013.

RAEL, R., SAN FRATELLO, R. **Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing,** 2011.

RAULINO, B. R. **Manufatura Aditiva: Desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (Modelagem por fusão e deposição),** Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

ROCHA, L. **Arquiteto utiliza impressora 3D para fabricar maquetes de casas inteiras.** TecMundo, 2015. Disponível em: < <http://www.tecmundo.com.br/impressora-3d/81186-arquiteto-utiliza-impressora-3d-fabricar-maquetes-casas-inteiras.htm>> Acesso em 05 nov.2016

ROODMAN, D., LENSSEN, N. **A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns Are Transforming Construction.** Worldwatch Institute, 1995.

SALA, L. **Proposta de Habitação Sustentável para Estudantes Universitários.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUI. 2006.

SANTOS, M. **Notas de Aula da Disciplina Alvenaria Estrutural**. UFRJ, 2015. Disponível em: <<http://www.comunidade-da-construcao.com.br/upload/ativos/229/anexo/matercomp.pdf>> Acesso em 05 set.2016

SENAI. **O Senai-BA oferece serviços de execução de maquetes tridimensionais**, 2012. Disponível em: < <http://portais.fieb.org.br/senai/component/content/article/6-noticias-senai/208-o-senai-ba-oferece-servicos-de-execucao-de-maquetes-tridimensionais.html> > Acesso em 05 nov.2016

SIMON. **Inspired amputee maker creates his own 3D printed robotic arm**, www.3ders.org, 2015. Disponível em: <<http://www.3ders.org/articles/20150128-inspired-amputee-maker-creates-his-own-3d-printed-robotic-arm.html>> Acesso em: 23 ago. 2016, 17:12:13

TÉCHNE. **Como construir para baixa renda**. Ano 16, Edição 130. Página 30 a Página 34. Jan de 2008.

TÉCHNE. **Planejamento Modelado**. Ano 22, Edição 213. Página 34 a Página 40. Dez de 2015.

TORGAL, F., JALALI, S. **A Sustentabilidade dos Materiais de Construção**. 2ª ed. Portugal. TecMinho. 2010

TOTAL KUSTON, Home, 2016. Disponível em: < <http://www.totalkustom.com/> > Acesso em: 03 out. 2016, 21:04:00

VEEN, A. **The structural feasibility of 3D-printing houses using printable polymers**. MSc Thesys, Delft University of Technology, 2014.

VERGAKIS, B. **Aircraft carrier Harry S. Truman prints spare, unique parts at sea with 3-D printer**. The Virginian Pilot, 2015. Disponível em: < http://pilotonline.com/news/military/local/aircraft-carrier-harry-s-truman-prints-spare-unique-parts-at/article_b46b30f0-2ad4-525f-8328-34d37034450c.html > Acesso em: 19 ago. 2016, 20:05:13

VILICIC, F. **A Nova Revolução Industrial**. VEJA, São Paulo. Ano 45. Nº 52. Página 240 a Página 247. Dez de 2012.

WARSAWSKI, A., NAVON, R. **Implementation of Robotics in Building: Current Status and Future Prospects**. Journal of Construction Engineering and Management, American Society of Civil Engineers, 124(1), 31–41, 1998.

WENDLER, A. **Relatório sobre alvenaria estrutural**. Considerações econômicas. Disponível em: < <http://www.wendlerprojetos.com.br/frame.htm> >. Acesso em: 5 set. 2016, 20:18:21

WISHBOX TECHNOLOGIES. **Saiba tudo sobre o avião da Airbus impresso em 3D que levantou voo**, 2016. Disponível em: <<http://blog.wishbox.net.br/2016/08/02/saiba->

[tudo-sobre-o-aviao-da-airbus-impresso-em-3d-que-levantou-voos/](#)> Acesso em: 22 ago. 2016, 18:05:13

WOHLERS, T. **Recent trends in additive manufacturing. 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing**, Paris, 12-14 junho 2012. 6.

WOLFES, R. **3D Printing of Concrete Structures**. Graduation Thesis, Eindhoven University of Technology, 2015.

WU, P., WANG, J., WANG, X. **A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry**. Curtin University, 2016.

YOSSEF, M., CHEN, A. **Applicability and Limitations of 3D Printing for Civil Structures**. Iowa State University. 2015.