



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Isadora Nunes de Almeida

IMPRESSÃO 3D E SUA APLICAÇÃO NA ENGENHARIA
CIVIL

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Estruturas, orientada pelo Professor Doutor Adelino
Vasconcelos Lopes e pelo Professor Doutor Sérgio Manuel Rodrigues Lopes e
apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências
e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Isadora Nunes de Almeida

IMPRESSÃO 3D E SUA APLICAÇÃO NA ENGENHARIA CIVIL

3D PRINTING AND ITS APPLICATION IN CIVIL ENGINEERING

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes e pelo Professor Doutor Sérgio Manuel Rodrigues Lopes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2021



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Resumo

A construção civil ainda depende muito da mão-de-obra. O recurso a soluções tecnicamente avançadas é possível, e muito racional, indo ao encontro das premissas de inovação, rentabilidade, produtividade, segurança, saúde e sustentabilidade num mundo que se deseja mais moderno.

Se no século passado, uma das grandes forças transformadoras do mundo foi o automóvel, com consideráveis impactos ambientais, neste novo século os objetivos voltam-se para que o mundo se regenere e continue a ter condições de habitabilidade para a humanidade, em harmonia com os animais e a flora existente. Trata-se de uma nova força transformadora, de dimensão mundial.

O desenvolvimento de tecnologias que permitam criar formas inovadoras são também inspiradoras tanto do ponto de vista estético como funcional. Neste sentido a invenção da impressora 3D pode fomentar uma revolução no fabrico de peças utilitárias ou estéticas, por exemplo. Inventada em 1984, os engenheiros tentam adaptá-la para agilizar e tornar as construções mais económicas e sustentáveis. Com a automatização de parte da construção, ou seja, sabendo que uma máquina é capaz de trabalhar com um elevado nível de precisão numa repetição de movimentos e processos, a mão-de-obra poderá ser redirecionada para a solução de outro tipo problemas. Para além disso, permite reduzir significativamente os desperdícios.

Atualmente, permanecem diversos obstáculos a serem superados para que a construção de edifícios de grande porte seja viável. Porém, diversas empresas têm vindo a analisar as modificações necessárias, tanto nos materiais como nas máquinas a serem utilizadas. A impressão 3D é realizada através do método de deposição de partículas em camadas, o qual foi primeiramente traduzido para a construção civil pela empresa D-Shape, não necessitando de reforços estruturais para pequenas alturas e tem como principal vantagem a não necessidade de cofragens. Tudo isto foi possível através do estudo detalhado do comportamento reológico dos materiais e da hidratação dos componentes da mistura do betão.

Palavras-chave: Engenharia Civil; Impressão 3D; Betão; Argamassa; Comportamento Reológico.

Abstract

Civil construction is still highly dependent on workmanship. The use of technically advanced solutions is possible, and very rational, meeting the premises of innovation, profitability, productivity, safety, health, and sustainability in a world that is wanted to be more modern.

If in the last century, one of the great transforming forces in the world was the automobile, with considerable environmental impacts. In this new century, one wants the world to be regenerated and to continue to have habitable conditions for humanity, in harmony with animals and the existing flora. It is a new transformative force with a global dimension.

The development of technologies that allow the creation of innovative shapes are also inspiring both from an aesthetic and functional point of view. In this sense, the invention of the 3D printer can foster a revolution in the manufacture of utilitarian or aesthetic pieces, for example. Invented in 1984, engineers have tried to adapt it to speed up and to make construction more economical and sustainable. With the automation of part of the construction, that is, knowing that a machine is capable of working with a high level of precision in a repetition of movements and processes, the workforce can be redirected to solving other types of problems. Furthermore, this type of production technology significantly reduces waste.

Currently, several obstacles remain to be overcome for the construction of large buildings to be viable. However, several companies have been analyzing the necessary modifications, both in the materials and in the machines to be used. 3D printing is carried out using the layered particle deposition method, which was first translated into civil construction by the company D-Shape, not requiring structural reinforcement for small heights and its main advantage is that it does not require formwork. All this was possible through the detailed study of the rheological behavior of the materials and the hydration of the components of the concrete mixture.

Keywords: Civil Engineering; 3D Printing; Concrete; Mortar; Rheological Behavior.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Índice	iii
Abreviaturas	v
1. Introdução.....	1
1.1. Impressão 3D	1
1.2. Enquadramento geral do trabalho	2
1.3. Organização da dissertação.....	3
2. Enquadramento histórico.....	5
2.1. Primórdios da impressão.....	5
2.2. Impressão 2D	6
2.3. Impressão 3D	7
3. Problemas e Soluções dos Materiais	10
3.1. Fendilhação por retração.....	10
3.2. Capacidade de bombeamento, de extrusão e de construção	12
3.3. Chochos	14
3.4. Reforços tradicionais	16
4. Tecnologias dos Materiais.....	17
4.1. Fibra de vidro como reforço estrutural	18
4.2. Partículas magnéticas para controle de fluidez.....	22

4.3.	Argila nanoatapulgitica para otimização das propriedades reológicas	24
4.4.	Betão de alto desempenho	29
4.5.	Pó de escória e de gesso no leito para o processo de Binder Jetting	30
4.6.	Mistura de cimento Portland comum com cimento de aluminato de cálcio	34
4.7.	Uso da Teoria de Fuller Thompson e o Modelo de Marson-Percy.....	39
4.8.	Compósitos à base de cimento com endurecimento por deformação	44
4.9.	Espuma de betão	46
5.	Técnicas de Impressão 3D.....	49
5.1.	D-Shape	50
5.2.	Contour Crafting	52
5.3.	Winsun 3D Printing	57
6.	Sustentabilidade.....	60
7.	Conclusão e Trabalhos Futuros	64
	Referências Bibliográficas.....	67

Abreviaturas

CO₂ – Dióxido de Carbono

CAD – Computer Aided Design (Projeto Assistido por Computador)

BIM – Building Information Manager (Gerenciamento da Informação da Construção)

MIT – Massachusetts Institute of Technology (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)

PZT – Cristal Piezoelétrico

3DCP – 3D Concrete Printing (Impressão 3D de Betão)

GF – Glass Fiber (Fibra de Vidro)

HPMC – Hidroxipropilmetilcelulose

CEM I – Cimento de Alto Desempenho

FeO – Óxido de Ferro

FA – Cinzas Volantes (Classe F)

OPC – Cimento Portland Comum

NC – Nano Clay (Nano Argila)

SS – Sulfato de Sódio

GP – Geopolímero à Base de Escória em Pó

ZP – Pó de Gesso Comercial

3DP – 3D Printing (Impressão 3D)

CAC – Cimento de Aluminato de Cálcio

3DCMP – 3D Cementitious Materials Printing (Impressão 3D de Material Cimentício)

SF – Sílica Ativa

SHCC – Strain-Hardening Cement-Based Composites (Compósitos à Base de Cimento com Endurecimento por Tensão)

CEM II – Cimento Portland Composto

HDPE – Microfibras de Polietileno de Elevada Massa Volúmica

FC – Foam Concrete (Espuma de Betão)

SP – Superplasticizer (Superplastificante)

CC – Contour Crafting

GRC – Placa de Gesso Reforçada com Fibra de Vidro

SRC – Cimento Reforçado com Fibra de Vidro

FRP – Compósito de Fibra de Vidro

CSC Slab – Concrete-Sandstone Composite Slab (Laje de Compósitos de Betão-Arenito)

GWP – Global Warming Potencial (Potencial de Aquecimento Global)

EoL – End-of-life (Fim de vida)

UBP – Ecological Scarcity Method 2013 (Método de Escassez Ecológica 2013)

1. Introdução

1.1. Impressão 3D

A construção civil na União Europeia representa cerca de 9,7% do produto interno bruto, PIB, e equivale a cerca de 6,6% da mão-de-obra. Alguns países desenvolvidos sofrem estagnação e, em alguns casos, uma redução da produtividade nesta área. As causas são numerosas e incluem fatores como a resistência à introdução de novas tecnologias neste setor tradicional, baixa industrialização dos processos de construção e pouca colaboração na introdução de novos métodos. A pequena margem de lucro das empresas de construção será, certamente, um dos motivos para esta situação, fazendo com que mesmo em países economicamente estáveis se canalizem poucos investimentos na pesquisa e no desenvolvimento (De Schutter, G. et al., 2018).

Existem diversos problemas e desafios associados à construção tradicional. Primeiramente, apesar das inúmeras vantagens do uso do cimento como material estrutural, a sua produção é problemática, consumindo muita energia na sua produção. Na verdade, é responsável por uma porcentagem significativa da produção global de CO₂, aproximadamente 5% de acordo com a World Business Council on Sustainable Development em 2002. Em segundo lugar estão os problemas associados com a mão-de-obra, uma vez que os processos de construções normais, como a colocação das cofragens e das armaduras, requerem um trabalho físico exigente, resultando em diversos problemas de saúde numa população envelhecida. O Occupational Health and Safety Administration of the US Department of Labor identifica em 2014 como os principais riscos à saúde dos trabalhadores da área da construção civil, a irritação dos olhos, da pele e do sistema respiratório devido à exposição ao pó de cimento, a inadequada sinalização de segurança, a manutenção de posturas estranhas por longos períodos, as quedas, as queimaduras químicas do betão e os acidentes de trabalho. O terceiro desafio é o uso de material, já que a necessidade de produzir peças de baixo custo favorece a simplicidade geométrica em vez da geometria otimizada, levando a um desperdício de matéria-prima (Bos, F. et al., 2016).

De forma a amenizar os problemas ilustrados acima, Börsch-Supan, um macroeconomista alemão, propõe uma solução para aumentar a produtividade e a riqueza económica substituindo o capital humano pela intensidade de capital na tecnologia e produtividade criando uma noção de “Indústria 4.0”, ou seja, super-flexíveis e intensamente automatizados os processos de manufaturas, em que sistemas de automação e robôs altamente autónomos e em rede cooperam para produzir produtos complexos com produtividade consistentemente sustentada, gerando, assim, uma 4ª Revolução Industrial (Bock, T., 2015).

A melhoria na qualidade e no custo ao integrar o design digital com a construção automatizada pode aumentar significativamente a produtividade do setor, tornando a impressão 3D um método mais aceitável pelas construtoras. Esta é uma evolução lógica do CAD (Computer Aided Design), já desenvolvido e utilizado em grande escala, o qual pode ainda ser integrado com o método BIM (Building Information Management), de forma a reduzir as possibilidades de erros e auxiliar no planejamento da produção, manutenção, reabilitação e reciclagem da obra (De Schutter, G. et al, 2018). Acredita-se que a construção convencional irá dar origem a novas tecnologias, em que numa fase inicial a sua performance será inferior devido a obstáculos económicos, técnicos e organizacionais em contraponto a um ambiente ainda limitado e dominado pelas técnicas consideradas tradicionais. No entanto, tal como em muitos outros setores, a previsão é que estas novas tecnologias venham a substituir as convencionais com o tempo (Bock, T., 2015).

Como a automação da construção necessita de uma mudança complementar e disruptiva em todo o setor para avançar, pode ser considerada um tipo bastante complexo de inovação ou mudança para permitir um desenvolvimento pertinente de todo o seu potencial. Mudanças de tal complexidade levam tempo, às vezes décadas. No entanto, após quase 45 anos de desenvolvimento técnico e experimentação neste campo, é possível encontrar os primeiros resultados da aceitação, com atividades dentro de empresas, criação de institutos de pesquisas, associações e até mesmo institutos governamentais. Isso indica uma tendência de aceitação e adoção das novas tecnologias, permitindo que essas se encaminhem para uma fase de crescimento e evolução (Bock, T., 2015).

1.2. Enquadramento geral do trabalho

Este trabalho consiste numa revisão bibliográfica de modo a apresentar os principais estudos realizados no âmbito da impressão 3D para construção civil, enumerando-se os problemas inerentes aos materiais e descrevendo-se os ensaios realizados com o objetivo de estudar as possíveis inovações em relação à tecnologia dos materiais. Pretende-se ainda apresentar as técnicas mais utilizadas atualmente e como essas foram implementadas em obras de pequeno e grande porte. Finalmente, uma questão de grande importância no atual cenário mundial: analisar-se a sustentabilidade desta nova técnica a curto e longo prazo, identificando-se algumas soluções para tornar esse novo método de construção mais ecológico.

Atualmente, o principal problema da utilização de impressoras 3D na construção civil são as inadequadas propriedades reológicas dos materiais disponíveis, uma vez que estes devem ser suficientemente fluídos para serem extrudidos pelo bocal da impressora, mas também devem apresentar a necessária robustez (não há cofragens) de modo a manterem a forma e o posicionamento escolhidos. Portanto, estamos na presença de dois objetivos contraditórios.

Para além disso, por ser um processo de deposição em camadas existe uma redução da adesão entre si, formando as chamadas “cold joints”, locais com baixa resistência. Embora a adesão entre camadas aumenta durante o processo de hidratação do cimento, este fenómeno constitui um outro problema a ultrapassar (Buswell, R. A. et al., 2018).

A trabalhabilidade do material dependerá de diversos fatores, principalmente dos parâmetros reológicos tais como, a tensão de cedência e a viscosidade plástica. A tensão de cedência determina a tensão em que a fluidez do material inicia e termina, e determina a estabilidade da suspensão e é responsável pelos resultados dos testes de imobilização, como o de queda de fluxo (slump flow). A viscosidade plástica representa a resistência ao fluxo, que aumenta com a taxa de deslizamento tangencial, um parâmetro importante para a robustez (Marchon. D. et al., 2018). Porém, estes não são os únicos fatores a serem levados em consideração. Por exemplo, o aumento da pressão hidrostática gerada pelas camadas subsequentes e perturbações durante o processo de extrusão também podem gerar problemas (Buswell, R. A. et al., 2018).

Foram identificadas inicialmente três técnicas diferentes para a aplicação das camadas (Lowke, D. et al., 2018): a Técnica Selective Binder Activation; a Técnica Selective Paste Intrusion; a Técnica Binder Jetting.

Cada técnica apresentava restrições, principalmente em relação à dimensão de cada peça a ser impressa, uma vez que necessitava de ser realizada num local controlado. Depois de pronta, cada peça devia ser transportada até o local de instalação, tal como na pré-fabricação. Com o desenvolvimento tecnológico, surgiu uma quarta técnica, a Contour Crafting, mais utilizada hoje em dia, podendo ser realizada no próprio local da obra. No entanto, esta apresenta certas restrições em relação às dimensões das construções, não tanto pela capacidade da impressora, mas sim devido às propriedades dos materiais utilizados (Contour Crafting Corporation, 2017).

1.3. Organização da dissertação

Resumidamente, a presente dissertação segue a seguinte linha organizativa: enquadramento histórico; apresentação dos problemas associados aos materiais devido ao processo de impressão 3D; apresentação de estudos que visam inovar nos materiais utilizados; métodos de impressão empregados em obras de escala real; principais pontos da sustentabilidade que envolvem a aplicação da impressão 3D como processo construtivo; considerações finais e trabalhos futuros.

Mais detalhadamente, a dissertação é estruturada em 7 capítulos. O Capítulo 1 da introdução é subdividido em 3: primeiramente procura-se apresentar de forma sucinta as principais

vantagens e desvantagens da adoção da impressão 3D como processo construtivo; em seguida faz-se um enquadramento; e por último faz-se a exposição da estruturação desta dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma evolução das tecnologias que culminaram na impressão 3D e na sua utilização na Engenharia Civil.

O Capítulo 3 aborda os principais problemas apresentados pelos materiais quando sujeitos ao processo da impressão 3D. Procura-se encontrar soluções para a não restrição da aplicação desta técnica devido a esses empecilhos.

No Capítulo 4 é realizado uma revisão bibliográfica das diversas tentativas de otimizar as propriedades reológicas, tixotrópicas e mecânicas dos materiais quando submetidos à impressão 3D, levando sempre em consideração a necessidade de também se encontrar as características exigidas para o processo de extrusão e deposição em camadas. Esta tentativa de otimização é feita através de soluções inovadoras em termos de materiais, sendo por recurso aos geopolímeros, ou substituindo o cimento tradicional por outras opções, ou tentando substituir o reforço tradicional, ou fazendo uso de teorias para otimizar a gradação dos agregados.

O Capítulo 5 apresenta as técnicas mais comumente utilizadas e a sua aplicação em escala real, ou seja, em obra. Essa aplicação é exemplificada pela construção em laboratório para posterior instalação na obra, ou pela impressão das cofragens para posterior instalação das armaduras e preenchimento do núcleo, ou pela completa impressão do edifício/habitação no próprio local da obra. Esta última é a situação que se pretende alcançar em larga escala dentro de alguns anos.

O Capítulo 6 consiste na exposição dos principais pilares da sustentabilidade que estão envolvidas na impressão 3D, nomeadamente a parte da conservação ambiental e a pegada ecológica de uma estrutura impressa relativamente à uma produzida de maneira tradicional.

Por último, no Capítulo 7 apresentam-se as conclusões mais relevantes do trabalho realizado para a produção desta dissertação e algumas recomendações para estudo em trabalhos futuros.

2. Enquadramento histórico

Neste capítulo pretende-se abordar a impressão do ponto de vista histórico. Por impressão entende-se qualquer marca capaz de ser observada e reproduzida. Assim, desde os primórdios da impressão, passando pela impressão 2D, até a nova impressão 3D, procura-se elencar um conjunto de factos históricos que permitem prever a continuidade do seu desenvolvimento com potencial aplicação no âmbito da Engenharia Civil.

2.1. Primórdios da impressão

A história da impressora 3D iniciou-se ainda antes da era de Cristo, no Disco de Festo (ver Figura 2.1), uma tabuleta de argila com quase 4 mil anos, encontrada na ilha de Creta, na Grécia, e consiste em duas faces com impressões hieroglíficas impressas na argila (Harford, T., 2021). Antes disso, e até mesmo depois em outras regiões, a reprodução de documentos, maioritariamente religiosos, era manual, sendo feita em materiais nobres e de difícil manuseio. Mais tarde, por volta do ano 700, os chineses desenvolveram uma técnica chamada de xilografia, que consistia em tábuas de madeira ou latão esculpidas onde era necessário passar tinta em cima e depois transferir o conteúdo para o material desejado, funcionando como uma versão inicial do carimbo. A técnica teve seu auge com a invenção do papel e com o uso de caracteres removíveis, em 1430 na Holanda, onde foram impressos os primeiros livros xilográficos (Maçã, C., 2021).



Figura 2.1 - Disco de Festo (Foto: Getty Images).

2.2. Impressão 2D

Por volta do ano de 1455, Gutenberg, um ourives, criou a impressão de documentos, nos moldes usados atualmente. Embora o método utilizado já fosse utilizado na China, a inovação consistiu em usar metal no lugar da madeira e na melhoria da tinta utilizada, ficando conhecida como a Prensa de Gutenberg. Um livro escolar de 28 páginas foi o teste à sua máquina. Após esse primeiro sucesso, imprimiu a Bíblia em latim. Porém, a grande revolução consistiu na acessibilidade ao conhecimento que esta metodologia passou a permitir, com a possibilidade da produção em massa de textos, com a consequente queda dos preços dos livros. Antes de Gutenberg, o preço de um manuscrito equivalia a cerca de seis meses de salário. Em pouco tempo, passou a ser mais próximo do salário de seis dias, e no início do século 17, do salário de seis horas (Harford, T., 2021).

Esta nova tecnologia foi tão bem-sucedida, que no primeiro século após a invenção da Prensa de Gutenberg foram produzidos mais livros do que haviam sido copiados à mão em toda a história da Europa pré-Gutenberg. Um exemplo disso é a biblioteca da Universidade de Cambridge, no Reino Unido, que continha somente 122 livros no início do século XV; hoje são 8 milhões. A impressão permitiu a dissipação do conhecimento de maneira a aumentar o prestígio dos pensadores, como provado nas cidades italianas por volta de 1470, onde o salário dos professores sofreu um aumento considerável (Harford, T., 2021).

Durante vários séculos, a técnica de Gutenberg permaneceu praticamente inalterada, até ao início do século XX. Em 1904 surge, a impressão offset. O processo consiste na aplicação de camadas de tinta no papel com uma série sequencial de cilindros, cada cilindro com a sua chapa ou folha de alumínio perfurada (por onde passa a tinta do cilindro para o papel) e a sua tinta específica. À medida que o papel passa pelos cilindros que estão em permanente rotação, estes deixam sair a tinta e assim se constroem camadas de cores, resultando em imagens e textos completos. No entanto, devido aos elevados custos associados com a gravação das chapas, este processo de impressão não é rentável para pequenas quantidades de impressão (Carolina, 2021).

Em 1938, o norte-americano Chester Carlson desenvolveu uma outra impressora, chamada de “Impressora de Impacto”. Operava através de fitas para o aparecimento das letras nos papéis, muito semelhante à máquina de datilografia. A sua qualidade de impressão dependia da quantidade de agulhas que faziam parte da máquina. Porém, gerava muito barulho e levava horas para reproduzir uma página (Leandro, 2018). Utilizando o mesmo método, em 1953 surgiu a primeira impressora ligada ao primeiro computador comercial da história (o Univac). Na altura foi designada de impressora de alta velocidade. Contudo, e de acordo com os atuais padrões, por ser uma impressora de impacto, as imagens não eram nítidas (Pacievitch, Y., 2010).

Foi no fim da década de 80, do século passado, que chegou ao mercado a primeira impressora a jato de tinta, acompanhando o desenvolvimento imprimido às tecnologias de informação. Ainda hoje é utilizada. Com este modelo, e seus derivados, evolui-se nos métodos de impressão e na qualidade das impressões, com cartuchos de tinta preta e a cores. Um pouco mais tarde surgem as impressoras a laser que utilizam cartuchos de toner. O toner consiste num pó fino que é depositado e absorvido pelo papel (Leandro, 2018). Neste momento a tecnologia está tão avançada que permite que qualquer pessoa possa adquirir uma impressora a preços razoáveis para imprimir, em casa, as fotos tiradas com os mais diversos aparelhos. Tendo o papel certo, a qualidade é equivalente à das antigas casas de revelação das velhas películas das fotos. Muito para lá da impressão dos jornais, dos livros, e das revistas de duas décadas atrás.

Sendo arriscado perspectivar o futuro, é possível afirmar que neste contexto, este será o limite da impressão 2D. Não porque se tenha atingido o limite dos desenvolvimentos tecnológicos. Sim porque as necessidades atingiram o limite. No entanto, existe todo um mundo para explorar: o mundo 3D. De fato, estão reunidas todas as condições para dar-se início ao processo de desenvolvimento das impressoras 3D. Obviamente que o início já aconteceu e o desenvolvimento está em marcha acelerada; como sempre acontece em todos os contextos em que o mercado evidencie necessidades.

2.3. Impressão 3D

Em 1984, a primeira base da impressão 3D foi descoberta, após a produção de aditivos à base de pó e utilizando técnicas a laser para sintetizar metais, plásticos, polímeros e pós cerâmicos em objetos sólidos. Em 1993 foi apresentada uma técnica desenvolvida no MIT, por Sachs et al., sendo a mais próxima do atual conceito de impressão 3D. Os autores usaram ligantes fluidos para ligarem seletivamente partículas de pó no sentido de produzirem componentes cerâmicos (Lowke, D. et al., 2018).

A primeira proposta para a impressão de elementos de betão foi realizada por Pegna em 1995. Pegna apresentou uma ideia de construção sem cofragens, fazendo uso de cimento Portland. A mistura (de argamassa) era depositada em camadas, produzindo elementos ocos. Basicamente, os objetos eram produzidos adicionando uma camada matriz de material, a areia (os inertes), a qual era seletivamente coberta por um agente reativo, o cimento (desempenhando a função de ligante), o qual era hidratado aplicando vapor de água à pressão atmosférica a cada camada (Pegna, J., 1995). Mais tarde, em 2007, Dini estabeleceu um dos primeiros métodos de ligações seletivas para grandes objetos, designado de D-Shape, que será detalhado posteriormente neste trabalho (D-Shape, 2020).

Em 2010, Gibbons et al. usaram misturas de cimento juntamente com a tecnologia de uma impressora piezoelétrica. Ou seja, utilizando um cristal piezoelétrico (geralmente PZT, titanato de zircônio de chumbo) que ao mudar de forma por imposição de uma determinada voltagem, pressiona e expelle o material líquido para fora da câmara, entretanto pré-preenchida com a mistura. Esta tecnologia oferece uma grande precisão de impressão, sendo utilizada para produzir modelos com precisão de até 0,1 mm de espessura (Gibbons, G. J. et al., 2010). Utilizando esta ideia e com foco no design, Hansmeyer e Dillenburger criaram, em 2013, o chamado “Digital Grotesque” (ver Figura 2.2), uma “obra de arte” de 3,5 m de altura. Pretendiam encontrar o limite dos algoritmos utilizados para dar forma aos objetos e visualizar o potencial do método de Binder Jetting na arquitetura (Digital Grotesque, 2021).



Figura 2.2 - Grotto I (Foto:Digital Grotesque, 2021).

Em 2014, Fromm publicou a ideia de reforçar a ligação de elementos de betão tubulares com cavidades ocas. Seguidamente, após o término da impressão dos componentes, as cavidades poderiam ser preenchidas com plástico ou metal, na forma líquida de maneira a reforçar o objeto. Neste mesmo ano, Fromm descreveu uma variação não reforçada da técnica de ligação usando a impressora Voxeljet, na qual os bocais pulverizam uma camada líquida de base com uma mistura de areia de quartzo, um agente ligante e um composto de sílica, tudo composto com o objetivo de criar um material que poderia ser aplicado em camadas tão finas que atingiria um alto nível de exatidão na forma (Lowke, D. et al., 2018).

Perseguindo novos projetos, Rael e San Fratello apresentaram um estudo chamado “3D Printed House 1.0”, em 2013, no qual um conjunto de impressoras 3D produziriam pequenos componentes que combinados formariam uma casa completa. Em 2015, estes autores apresentaram um novo projeto chamado “Bloom”, um pavilhão independente, com 2,7 m de altura, cobrindo uma área de 3,7x3,7m² e foi realizado com 840 blocos customizados e impressos tridimensionalmente (Rael San Fratello, 2021).

A primeira pesquisa fundamental focada na tecnologia do material, usando técnicas seletivas de ligações com base em materiais cimentícios foi realizado em 2015 por Lowke et al. Os autores investigaram o efeito da razão água/cimento (w/c ratio) na resistência de elementos produzidos pela técnica de hidratação seletiva do cimento. Assim descobriram, que com o aumento da razão w/c, melhora-se a adesão entre camadas e a sua resistência global (Lowke, D. et al., 2018). Em 2017, Shakor et al usaram uma impressora 3D comercial com tecnologia piezoelétrica para produzir amostras em um leito de pó de cimento, tendo diferentes teores de água para cada espécime, sendo estes depois testados após 28 dias para a resistência à compressão, confirmando o fenômeno proposto por Lowke et al (Shakor, P. et al., 2017).

Em 1996, Behrokh Khoshnevis, professor no Instituto das Ciências da Informação da Escola Viterbi para a Engenharia da Universidade do Sul da Califórnia, criou uma técnica para construção de moldes para utilização industrial através de uma tecnologia de construção por contornos para uma maior precisão de forma. Porém, após observar as consequências dos sismos nas áreas urbanas do seu país natal, Itália, resolveu adaptar este método para a construção civil, sendo hoje um dos métodos mais utilizados, consistindo no uso de um guindaste ou de um pórtico rolante com um bocal para extrusão do material, tudo controlado através de um computador, criando assim o método Contour Crafting, quem em 2014 ganhou o prêmio Grand Prize da NASA e foi eleito como uma das “25 Melhores Invenções do Ano” pelo National Inventor’s Hall of Fame and History Channel’s Modern Marvels Program (Contour Crafting Corporation, 2017).

3. Problemas e Soluções dos Materiais

A construção civil envolve um conjunto vastíssimo de estruturas para os mais diversos fins: obras hidráulicas, túneis, estradas, pontes, prédios, casas, muros, etc. Verifica-se neste contexto que a impressão 3D incide essencialmente na construção de simples habitações; em geral casas de piso único. Entende-se que a tecnologia se desenvolva a partir daquilo que é o mais simples.

Como é óbvio, as casas que conhecemos resultam da evolução ao longo das metodologias de construção, desde a construção em terra, passando pela utilização da madeira, até aos novos materiais, como o aço e o betão, constituintes dos edifícios atuais. Atualmente, estes são feitos, não só com o propósito de providenciar abrigo, mas principalmente para melhorar a qualidade de vida do ser humano.

A materialização da construção das casas em particular carece de reunião de um determinado número de requisitos: desde os materiais à mão-de-obra. Conhecendo o peso financeiro da mão-de-obra na construção, a impressão 3D evidencia todo um potencial de aplicabilidade. Contudo, aquilo que à primeira vista parece óbvio, não o é.

Assim, tendo em consideração os diferentes processos construtivos conhecidos, a deposição em camadas e a não utilização de cofragens, características principais da impressão 3D, não é possível esperar o mesmo comportamento mecânico dos materiais relativamente ao processo tradicional de construção. Consequentemente, ao utilizar-se esta inovadora técnica surgem novos problemas que devem ser estudados e solucionados, na medida do possível, para que não exista comprometimento da integridade estrutural da obra (segurança relativamente aos estados limites últimos e de utilização). Neste contexto, pretende-se neste capítulo enunciar alguns destes problemas e apresentar algumas das possíveis soluções, indicadas na bibliografia.

3.1. Fendilhação por retração

Numa das primeiras experiências de deposição por camadas, o material utilizado no processo de impressão 3D, utilizou uma argamassa inadequada; após a cura, apresentava sérios problemas de fendilhação por retração (ver Figura 3.1). Torna-se, portanto, necessário elaborar uma mistura apropriada, de modo que, após a cura, a fissuração esteja controlada. (De Schutter, G. et al., 2018). Isto não significa ausência de fissuração; significa ausência de outros tipos de problemas devido à fissuração.



Figura 3.1 - Exemplo de fendilhação por retração da argamassa impressa em 3D (Foto: De Schutter, G. et al., 2018).

Neste processo que consiste na deposição de camadas aplicadas em diferentes momentos, a penetração da pasta de cimento entre as camadas é um fator muito importante. Em primeiro lugar contribui para a ligação entre camadas, ou seja, para a sua adesão. Em segundo lugar, a resistência mecânica (tração ou compressão) será tanto maior quanto melhor for a ligação. Esta adesão pode ser controlada através do diâmetro médio dos agregados e dos parâmetros reológicos da pasta, traduzindo-se, principalmente, pelo controle da quantidade de água na mistura. Se essa quantidade for insuficiente, ela não irá penetrar homogeneamente, fazendo com que as áreas não hidratadas apresentem uma deficiente ligação entre camadas (Lowke, D. et al., 2018). Ou seja, a pasta necessita de valores elevados da razão água/cimento de modo a garantir a adesão entre camadas e a manter a fluidez da pasta necessária para a impressora funcionar adequadamente para garantir a precisão da forma escolhida. Porém, como se sabe, valores elevados da quantidade de água na mistura dão origem a elevadas retrações da mistura após secagem. Para além disso, a resistência à compressão do material também sai prejudicada.

No entanto, deve notar-se que as propriedades do material endurecido não são somente afetadas pela tecnologia utilizada na produção da argamassa, isto é, da razão água/cimento e da composição, ou da granulometria e massa volúmica da mistura seca, apesar destes parâmetros serem fundamentais. Importa considerar também os parâmetros relacionados com o processo da tecnologia tais como: altura da camada, pressão de extrusão (do jato) e o tratamento pós-impressão. Na realidade, o processo da tecnologia de impressão 3D pode ser mais agravante do que a tecnologia do betão em si, principalmente quando se considera a ausência de cofragens, permitindo que a secagem seja agravada logo, desde o início da extrusão da argamassa (Lowke, D. et al., 2018). Ademais, não há a possibilidade de inserção de um vibrador para uma eficiente homogeneização e compactação da argamassa, comprometendo as suas propriedades mecânicas.

3.2. Capacidade de bombeamento, de extrusão e de construção

Tal como referido anteriormente, a tecnologia do processo de impressão 3D é de importância capital para uma estrutura impressa tridimensionalmente. Um dos grandes problemas associados ao processo é a capacidade de fluxo do material pelo bocal, uma vez que o 3DCP (3D Concrete Printing) é particularmente sensível a pausas na extrusão. Nessa eventualidade, podem surgir as designadas “cold joints”, onde posteriormente a nova argamassa entra em contato com argamassa já endurecida dificultando a adesão entre camadas. Assim se formam superfícies de fraqueza estrutural na estrutura. Essas pausas podem ser causadas pela segregação das partículas na mangueira gerando um entupimento, devido à composição da mistura e/ou deficiente mistura antes do bombeamento para a impressora.

No processo de bombeamento para a impressora e posterior extrusão pelo bocal existe um intervalo de tempo crítico (“open window”), em que a viscosidade e a tensão de cedência da mistura são as ideais. A capacidade da impressora extrudir a mistura pelo bocal, sem deformações consideráveis e com um nível aceitável de rotura/separação da camada (ver Figura 3.2) é de importância fundamental para o resultado final. Os fabricantes das impressoras recomendam a realização de ensaios preliminares à construção, para determinar essa “janela” para a argamassa/betão a ser utilizada. Tais ensaios consistem na realização de uma série de filamentos únicos em diferentes intervalos de tempos (ver Figura 3.3), sendo o intervalo inicial o momento em que o cimento entra em contato com a água (Buswell, R. A. et al., 2018). No caso da Figura 3.3, o intervalo ideal situa-se entre 60 e 80 min.

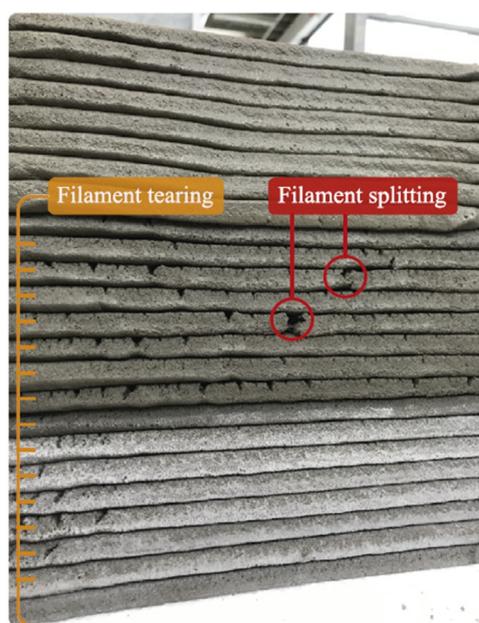


Figura 3.2 - Rotura e separação das camadas (Foto: Buswell, R. A. et al., 2018).

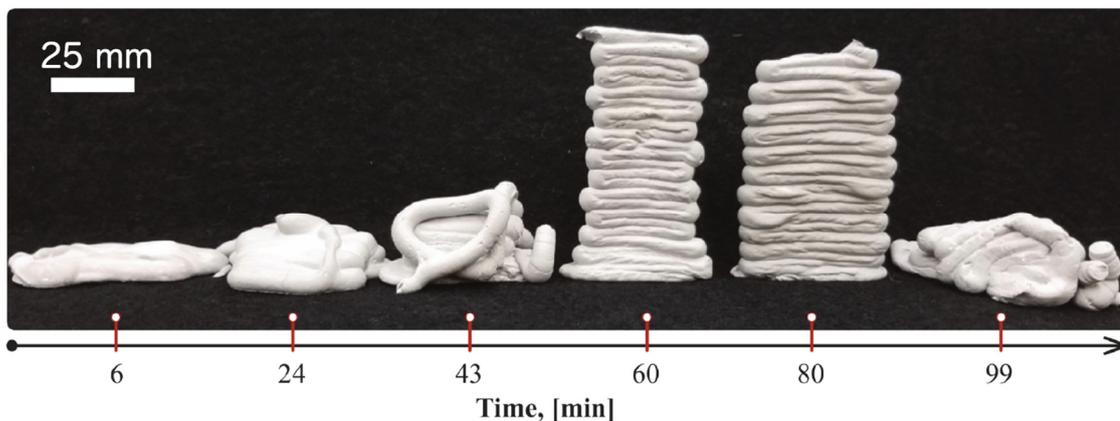


Figura 3.3 - Ensaio de determinação da “janela de abertura” (Foto: Buswell, R. A. et al., 2018).

Para além disso, também o intervalo de tempo do ciclo de deposição de uma camada é crítico para a adesão entre as camadas e a não formação das referidas “cold joints”. Este aspecto depende da velocidade (fluxo extrudido) e da geometria (Buswell, R. A. et al., 2018). Logo, a velocidade deve ser controlada de tal maneira que ao ser depositada uma nova camada, a que se encontra por baixo não esteja muito líquida para não sofrer deformações devido ao novo peso adicionado (ver Figura 3.4), mas também não esteja muito seca para que haja uma adesão apropriada entre elas. Deve lembrar-se que uma certa deformação pode sempre ocorrer dependendo da altura (total) da estrutura e da maneira que foi realizada, podendo ter sido feita de uma só vez, o que acabaria provocando altas deformações devido ao peso próprio, ou em intervalos, de modo que as camadas inferiores adquiram a necessária resistência.



Figura 3.4 - Deformações das camadas devido ao ciclo de deposição (Foto: Buswell, R. A. et al., 2018).

Outro problema que pode ocorrer relativo às limitações de construção do material, relaciona-se com a altura da construção e a correspondente pressão “hidrostática”: claro que quanto maior for a primeira maior será a segunda. Porém, o problema surge quando na prática se mantém a altura da camada constante durante toda a impressão, fazendo, assim, que a distância entre o bico de extrusão e a superfície de trabalho aumentem com a altura, o que tem como consequência uma alteração na forma do filamento, afetando a adesão da camada. Este efeito é exacerbado com cada camada adicional, ou seja, com a altura, o que pode, eventualmente, fazer com que o filamento “serpenteie” à medida que é depositado, levando à deformação da estrutura e ao, inevitável, colapso (ver Figura 3.5). Buswell, R. A. et al. (2018) apresentaram duas abordagens possíveis: o ajuste dinâmico da altura do bico de extrusão durante a impressão; e/ou o controle cuidadoso do acumulado de peso próprio, podendo ou não incluir o uso de aceleradores de presa injetados antes da extrusão para o rápido endurecimento das camadas inferiores, de modo a suportarem a carga progressivamente crescente (Buswell, R. A. et al., 2018).

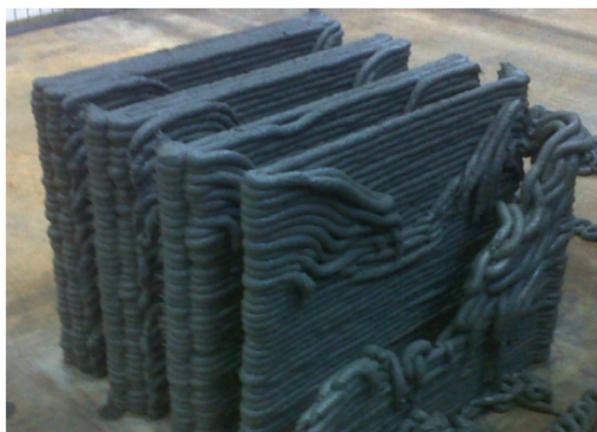


Figura 3.5 - Colapso da estrutura devido ao acumulado (Foto: Buswell, R. A. et al., 2018).

3.3. Chochos

Para geometrias sólidas, pode ocorrer o problema chamado de chochos, ou seja, a criação de espaços vazios involuntários nos componentes, reduzindo a massa volúmica e colocando potencialmente em causa a durabilidade (ver Figura 3.6). A criação destes vazios depende da composição da mistura e da estabilidade das propriedades reológicas durante o processo de impressão, uma vez que isto afeta o formato característico do filamento a ser extrudido. Estes vazios também podem ser criados em resultado das mudanças de direção do bocal no processo de enchimento (ver Figura 3.7). De fato, o filamento é limitado a seguir o raio de uma curva durante a mudança de direção, o raio que pode ser acomodado sem criar fraturas ou defeitos. Este raio de colocação depende das propriedades de fluidez do material, do tamanho e da

geometria do bico de extrusão, bem como da velocidade de deposição. Embora as deformações que ocorrem no interior dessas geometrias sólidas possam ter efeitos positivos, uma vez que ao gerarem uma compressão, vão “empurrando” o material para dentro dos vazios (Buswell, R. A. et al., 2018), no final, os chochos constituem um problema.

Quando se pretende a criação de camadas sólidas, sem chochos, a geometria pretendida deve ser subdividida num número finito de volumes divisíveis pelo tamanho do filamento. Tal processo quase sempre consiste numa aproximação razoável da geometria inicial.



Figura 3.6 - Chochos na amostra da esquerda, onde os filamentos podem ser facilmente identificados e uma amostra de boa qualidade na direita, onde os filamentos são indiscerníveis (Foto: Buswell, R. A. et al., 2018).



Figura 3.7 - Chochos devido a mudança de direção do bocal da impressora 3D (Foto: Buswell, R. A. et al., 2018).

3.4. Reforços tradicionais

Como se sabe, o betão armado tem por objetivo primordial resistir a tensões de compressão e de tração que qualquer elemento sujeito a ações fica submetido. No caso da impressão 3D, o uso de reforços tradicionais no betão é um tanto desafiador no caso de estruturas. Apesar disso, devem ser estudados para que a implantação desse processo em larga escala seja possível.

Se o reforço a considerar é paralelo às camadas a imprimir, essas armaduras devem ser totalmente envolvidas por essas camadas para que desempenhem o seu objetivo. É o mesmo conceito que rege as construções em betão armado. Tratando-se de superfícies, as malhas de aço são mais indicadas. Porém, quando for necessário o uso de barras de ferro, em elementos de características lineares, deve considerar-se o seu diâmetro na determinação da espessura das camadas, afetando, conseqüentemente, o diâmetro do bocal de extrusão, o volume de discretização do filamento e o seu percurso (Buswell, R. A. et al., 2018). Estas mudanças afetam conseqüentemente as propriedades reológicas requeridas do material e o tempo do ciclo de deposição de camadas, ou seja, o uso de um reforço estrutural faz com que aconteça toda uma reação em cadeia em todo o processo tecnológico para a impressão 3D de uma estrutura.

Quando for necessário o uso de reforços perpendicularmente às camadas, deve fazer-se uso de um sistema similar ao de cabo de pré-esforço, ou seja, utilizando pós-colocação e pós-tensionamento. Nessa eventualidade, é necessário a criação e impressão de espaços vazios na estrutura para que o reforço seja colocado, pós-tensionado e, em seguida, embebido no material utilizado. Outro sistema utilizado nestes casos consiste na impressão de cofragens permanentes, nas quais, ao serem ocas, os reforços são posicionados em seu interior para depois serem preenchidas completamente pelo betão/argamassa, tornando-se elementos estruturais sólidos (ver Figura 3.8).

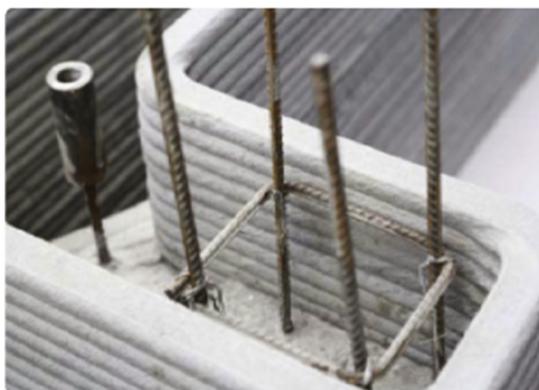


Figura 3.8 - Sistema de cofragens permanentes impressas tridimensionalmente (Foto: Severson, B., 2015).

4. Tecnologias dos Materiais

Pretende-se neste capítulo realizar uma revisão bibliográfica dos principais ensaios realizados na área das tecnologias dos materiais utilizados na impressão 3D para a engenharia civil, nomeadamente os ensaios que abordem as propriedades reológicas dos materiais. Interessa garantir a possibilidade de análise da resposta estrutural; o princípio básico das verificações de segurança. Isto é, de acordo com todas as normas e legislações aplicáveis, a resistência da estrutura deve ser sempre superior ou igual às ações a ela impostas.

Uma impressão 3D eficaz depende de 4 fatores de acordo com Le, T. T. et al. (2012): capacidade de extrusão do betão pelo bocal; trabalhabilidade do betão, ou seja, a sua consistência; capacidade de construção, associada à capacidade de imprimir uma determinada quantidade de camadas em altura; “janela de abertura” que se caracteriza como um intervalo de tempo em que a capacidade de extrusão e a trabalhabilidade do betão sejam adequadas. Todos esses conceitos se relacionam de forma intrínseca. A maioria dos estudos que estão expostos neste capítulo tentam convergir para a solução e otimização destes fatores.

Importa ressaltar um importante aspecto para a Engenharia Civil; a resistência à compressão do material resultante da impressão. De fato, no contexto das estruturas de betão armado, o conhecimento da resistência do betão à compressão é um requisito fundamental para estimar a resposta estrutural. É conhecida a questão relativa à compactação; caso não se reduza convenientemente os vazios, fica comprometida a referida resistência à compressão. Na impressão 3D, camada a camada, é um desafio a resolução deste problema. Por um lado, não existe a possibilidade de vibrar o material; por outro lado não é possível recorrer ao conhecimento dos betões auto compactáveis porque não existem cofragens laterais. Portanto, neste caso, a massa específica do material após a cura (inversamente proporcional ao volume de vazios) depende da consistência com que é colocado. Para além disso, a sua colocação também apresenta os seus desafios: os bocais são verticais e a colocação é horizontal. Portanto, o material é sujeito a um conjunto de tensões de corte no intervalo de tempo entre a extrusão e a colocação. Submeter uma mistura sólida a tensões de corte é exercer sobre ela um fenómeno simétrico à compactação. E as velocidades de extrusão (caudal) e de deslizamento horizontal do bocal influenciam as tensões de corte. Simplificadamente, numa massa líquida viscoelástica (linear), as tensões de corte resultam do produto da viscosidade pela variação no tempo da deformação, ou seja, do gradiente normal das velocidades tangenciais. Pois, são todas estas questões que se encontram pendentes na impressão 3D, nomeadamente nas misturas a utilizar.

Vale lembrar que este capítulo busca apresentar ensaios com materiais diferentes do tradicional. É conhecido que na impressão 3D com materiais convencionais, a redução das suas resistências

(compressão e tração) pode atingir até 30% relativamente ao processo construtivo normal, com os mesmos materiais. Padilha, V. Z. (2020) realizou um estudo das propriedades mecânicas de provetes impressos tridimensionalmente. Utilizou-se como material o cimento Portland CP V-ARI, sílica ativa, filler de calcário, agregados de pequenas dimensões, aditivo dispersante e água. Ensaando os provetes com diferentes tempos de cura, foi comprovado a relação apresentada anteriormente da resistência dos provetes impressos com os provetes preparados manualmente.

4.1. Fibra de vidro como reforço estrutural

Panda, B. et al. (2017) estudaram o efeito da adição de fibras de vidro (GF – Glass Fiber) na composição de um tipo de geopolímero para aplicação em grande escala na impressora 3D. A composição desta argamassa reforçada com fibra de vidro é a seguinte: 23% de FA; 5% de escórias/resíduos de pedra separados de metais durante a fundição ou refinação de minério; 3% de microsíllica; 47% de areia fina fluvial com no máximo 1,18mm de tamanho; 15% de silicato de potássio líquido (razão molar de 2,0); 2% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC); 5% de água de torneira.

Foi introduzido adicionalmente um agente flocculante¹, devido à necessidade de impor propriedades tixotrópicas² à mistura, aspecto essencial para a extrusão eficaz. Utilizou-se fibra de vidro picada (GF: massa volúmica 1,7 – 2,2gm/cm³) com três comprimentos diferentes (3mm, 6mm e 8mm) e quatro percentagens em massa na composição (0,25%, 0,5%, 0,75% e 1%). Acredita-se que o agente de flocculação não perturbasse o processo da ativação alcalina (mecanismo inerente) do geopolímero. As misturas iniciaram-se pelas componentes secas; posteriormente a adição do silicato de potássio líquido e a água. As fibras foram introduzidas com um limite máximo de 1% da argamassa para evitar entupimentos e garantir a fluidez e contínua extrusão através do bocal da impressora.

Inicialmente foram impressos blocos com dimensões de 540x40x100mm³. Posteriormente foram extraídos provetes, em diferentes direções, com dimensões de 160x40x40mm³ para os ensaios de flexão, provetes de 40x40x40mm³ para ensaios de compressão e de 40x40x100mm³ para ensaios de rotura à tração pura. A pressão do bocal da impressora era mantida entre 10 e 15bars com uma velocidade de extrusão de 4l/min, e o intervalo de deposição de camadas era de 7 a 8s (Panda, B. et al., 2017).

¹ Flocculação é o processo no qual colóides saem de suspensão na forma de agregados e formam partículas maiores, ditos “flocos”.

² Propriedades tixotrópicas, particularidade dos colóides, é a capacidade de um fluido reduzir a sua viscosidade ao longo do tempo quando submetido à uma velocidade de corte constante.

Após a cura em temperatura ambiente, os provetes foram ensaiados à flexão e à compressão de acordo com a norma BS EN 196-1:2016 (também disponível como NP EN 196-1:2017, “Método de ensaio de cimento. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas). As ações foram aplicadas em três diferentes direções tal como é indicado na ver Figura 4.1. No caso T1 a ação foi aplicada perpendicularmente ao plano das camadas. No caso T2, a direção da ação era paralela ao plano das camadas, mas transversal ao eixo de cada camada. No caso T3, a ação tem a direção do eixo de produção das camadas. Para os ensaios de deformação por flexão a taxa de carregamento era de 10N/s, para os de rotura à tração de 0,1mm/s e de compressão de 100kN/min (Panda, B. et al., 2017).

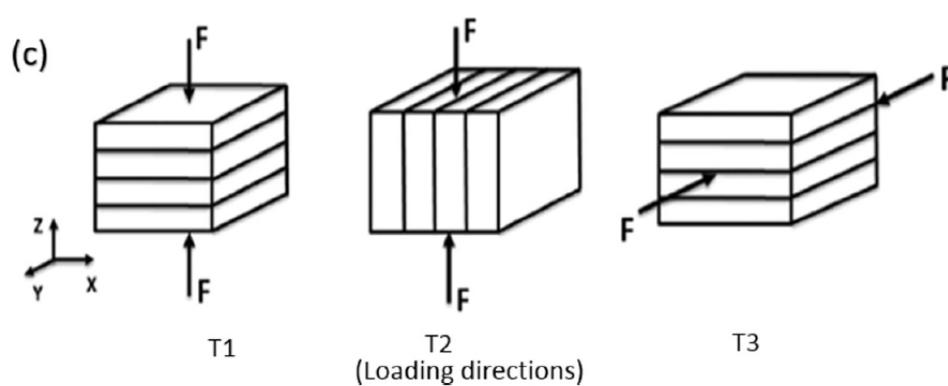


Figura 4.1 - Direções de carregamento (Ilustração: Panda, B. et al., 2017).

Os resultados dos ensaios de flexão (ver Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4) mostraram dependência direcional das propriedades, o que se acredita ser um atributo inerente do processo de deposição por camadas. Os provetes carregados na direção T1 apresentaram maiores valores de resistência, seguidos de perto pelos casos T2. Os casos T3 foram sempre os menos resistentes. Pior do que isso é que ainda que a proporção de fibras fosse aumentada na mistura, isso não conduziria a um aumento da resistência à tração por flexão. Em muitas situações ocorreu até uma diminuição. De acordo com os autores, os provetes carregados na direção T1 encontravam-se na parte inferior do bloco impresso inicialmente, razão pela qual, apresentavam melhor compactação relativamente aos restantes provetes (Panda, B. et al., 2017). Para além disso, a adesão entre camadas constitui um parâmetro essencial para a resistência no caso T1. Mas este aspecto não foi considerado pelos autores.

De qualquer modo, são muito interessantes para a Construção Civil os valores da ordem de 5-6MPa para a resistência à tração por flexão. Valores de 2-3MPa são algo reduzidos. Relativamente à deformação que é indicada nestes resultados, presume tratar-se da flecha alcançada no ensaio de tração por flexão indicado na referida norma. Assim, considere-se como exemplo o caso do provete com 0,75% de fibras com comprimento de 3mm (Figura 4.2), no

ensaio T1. Neste caso, a deformação vale cerca de 0,7mm quando a tensão de tração vale cerca de 5MPa. Nestas condições, o módulo de elasticidade do material é inferior a 1GPa. Este valor é problemático para o contexto da engenharia civil.

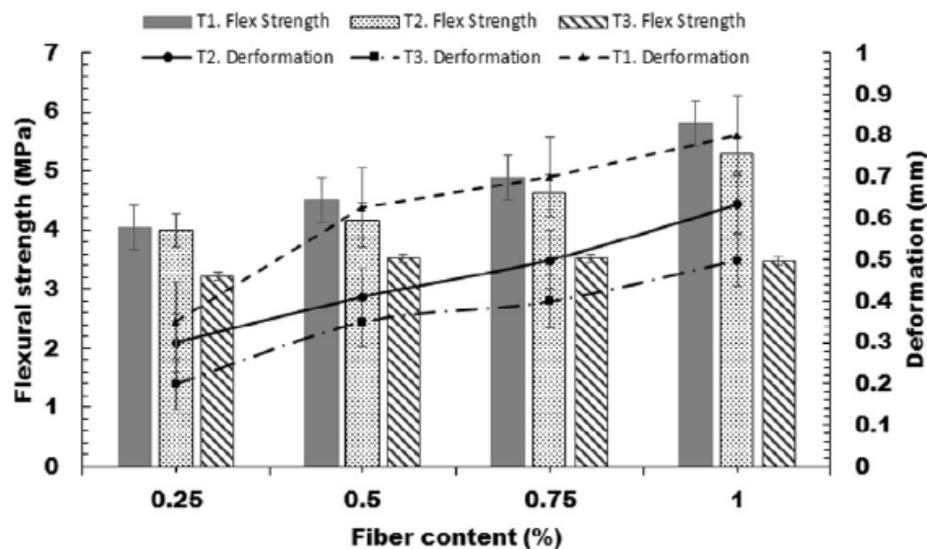


Figura 4.2 - Resultados dos testes de flexão para argamassa com adição de GF com 3mm de comprimento (Gráfico: Panda, B. et al., 2017).

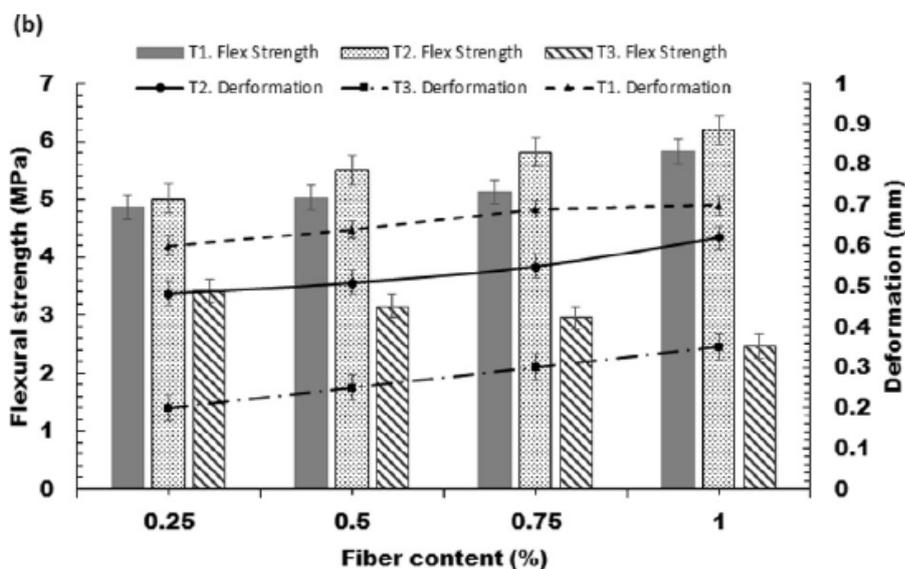


Figura 4.3 - Resultados dos testes de flexão para argamassa com adição de GF com 6mm de comprimento (Gráfico: Panda, B. et al., 2017).

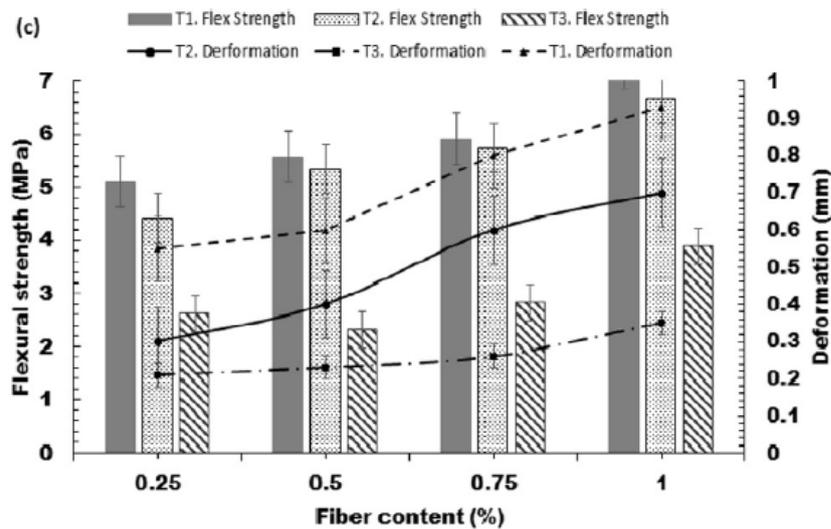


Figura 4.4 - Resultados dos testes de flexão para argamassa com adição de GF com 8mm de comprimento (Gráfico: Panda, B. et al., 2017).

Os resultados dos testes de compressão para fibras com 3mm (ver Figura 4.5), revelaram que a adição de fibras de vidro à mistura conduz a uma ligeira redução da resistência à compressão do geopolímero. Tal ocorrência foi explicada pelos autores como consequência do posicionamento das fibras. Verificaram que as fibras agem como vazios. Portanto, as ações que lhe forem perpendiculares verificam uma menor resistência à compressão. Razão pela qual os provetes carregados na direção T3 apresentaram uma maior resistência à compressão. Os autores somente apresentaram os resultados dos testes de compressão para argamassa com adição de GF com 3mm de comprimento (Panda, B. et al., 2017).

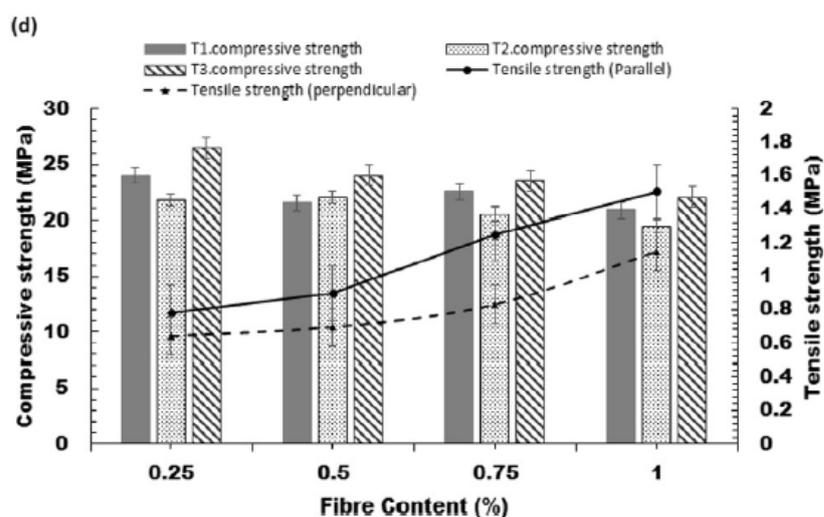


Figura 4.5 - Resultados dos testes de compressão para argamassa com adição de GF com 3mm de comprimento (Gráfico: Panda, B. et al., 2017).

Para um carregamento do tipo T1, uma boa adesão entre as camadas normalmente resulta numa boa resistência à tração por flexão. Porém, como em alguns casos não houve uma boa adesão, devido ao uso de argamassa de rápido endurecimento, obteve-se uma melhor resistência à tração com o carregamento tipo T2 relativamente ao tipo T1. Este parâmetro, relativo à adesão entre camadas parece não afetar os resultados da resistência à compressão (Panda, B. et al., 2017).

4.2. Partículas magnéticas para controle de fluidez

De Schutter, G. et al. (2018) propuseram um projeto chamado “SmartCast”, onde se pretendeu desenvolver um betão com reologia e rigidez ativamente controláveis, utilizando partículas magnéticas e campos magnéticos. Propôs-se a introdução de um componente reativo na pasta, neste caso o óxido de ferro, FeO, o qual contribuiria para a sua resistência ao alinhar-se com as linhas do campo magnético, formando uma estrutura mais “rígida” ou emaranhada. No caso de partículas magnéticas, espera-se que uma rede estrutural criada contribua para a resistência à rotura da pasta. Pretende-se fazer com que essa combinação de partícula-campo magnético seja um método primordial para controle do fluxo do filamento extrudido pela impressora 3D. A viabilidade deste método depende da relação entre a força do campo magnético aplicado e a quantidade de partículas magnéticas adicionadas na pasta. Não é claro neste estudo como as dosagens afetam a resposta reológica imediata para o campo ou se há efeitos de longa-duração devido a períodos de magnetização precoce.

Duas pastas foram preparadas com cimento CEM I 42,4N (com w/c de 0,35) com e sem a adição de 5% de partículas magnéticas, FeO. Ambas as pastas foram submetidas às mesmas séries de forças do campo magnético (0T, 0,34T, 0,76T e 0T) permanecendo sempre no interior do reômetro rotacional³, a uma temperatura constante de 20°C. Além disso, para evitar a secagem da pasta de cimento, esta foi coberta, no lado exposto, por um óleo de silicone. Os ensaios foram iniciados após 15 minutos da mistura das pastas (De Schutter, G. et al., 2018).

Os campos magnéticos foram aplicados por 10 minutos em cada pasta. Entre cada intervalo as pastas foram sujeitas à tensão tangencial durante 30s. As medidas dos módulos de empacotamento⁴ (storage modulus) foram retiradas após cada intervalo de 10 minutos (De Schutter, G. et al., 2018).

Pode ser observado que a adição das partículas magnéticas provoca o aumento do módulo de empacotamento mesmo para uma força de campo zero (ver Figura 4.6). Isto se deve à superfície

³ Reômetro rotacional é um dispositivo usado para medir as propriedades reológicas dos materiais, principalmente a viscosidade dinâmica.

⁴ Módulo de empacotamento é uma propriedade dos materiais viscoelásticos, e mede a sua energia potencial elástica armazenada.

adicional das partículas magnéticas. De referir que as pastas não tiveram adição de nenhuma água ou plastificante para compensar a sua perda de fluidez. Porém, é observado que o aumento do módulo de empacotamento com o campo magnético não é proporcional. De salientar o fato de o módulo de empacotamento ser maior depois de submetido a um campo magnético (e retirado dele) relativamente ao seu valor inicial. Este comportamento é de grande importância para a impressão 3D, uma vez que interessa manter a tensão tangencial constante após a imposição de diferentes taxas de deslizamento tangencial⁵. Isto é possível através da aplicação de diferentes campos magnéticos.

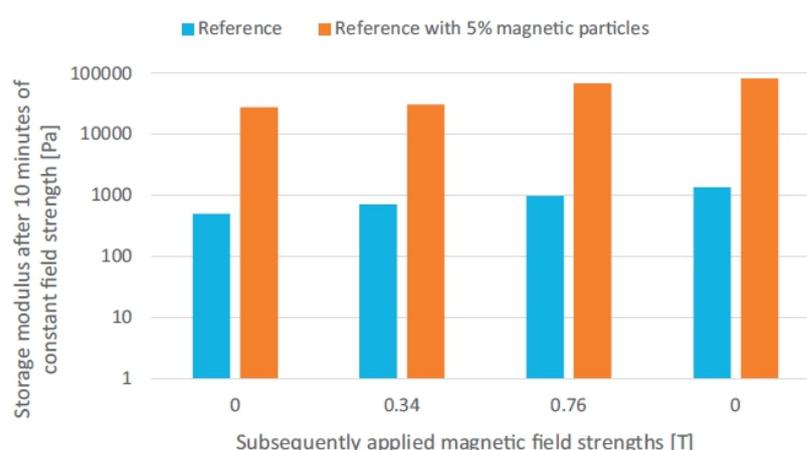


Figura 4.6 - Módulo de empacotamento de duas pastas de cimento com e sem 5% de partículas magnéticas, submetidas a variados campos magnéticos (Gráfico: De Schutter, G. et al., 2018).

Sequencialmente, e para o estudo da tensão tangencial, foram realizados 3 ensaios no reômetro rotacional aplicando taxas de deslizamento tangencial em 3 pastas contendo 5% de partículas magnéticas. Cada ensaio foi subdividido em 2 fases. Na primeira fase de cada ensaio, a taxa de deslizamento tangencial aplicada foi de 15/s, o suficiente para homogeneizar as amostras. Na segunda parte, para o Ensaio 1, o campo magnético foi aumentado de 0 para 0,17T, causando um aumento significativo na tensão tangencial. Na segunda parte, para o Ensaio 2, o campo magnético foi aumentado da mesma maneira que para o Ensaio 1. Porém, a sua taxa de deslizamento tangencial foi diminuída de 15/s para 7/s. Tendo em conta os resultados apurados (ver Figura 4.7), observa-se que uma diminuição na taxa de deslizamento tangencial de aproximadamente 50% reduz a tensão tangencial em 20% apenas, demonstrando o reduzido impacto do campo magnético utilizado. Para compensar esse efeito, no Ensaio 3, o campo magnético foi aumentado de 0 para 0,34T mantendo a taxa de deslizamento tangencial do Ensaio 2. Neste caso, os valores das tensões tangenciais aproximaram-se dos obtidos no Ensaio

⁵ Taxa de deslizamento tangencial é o gradiente (normal à superfície) da velocidade (paralela à superfície) de um líquido viscoelástico que escoar sobre uma superfície.

1. Assim conclui-se, que é possível manter constante a tensão tangencial para diferentes taxas de deslizamento tangencial através do ajuste do campo magnético aplicado (De Schutter, G. et al., 2018). Teria sido muito importante conhecer a evolução do módulo de empacotamento relativamente a este parâmetro.

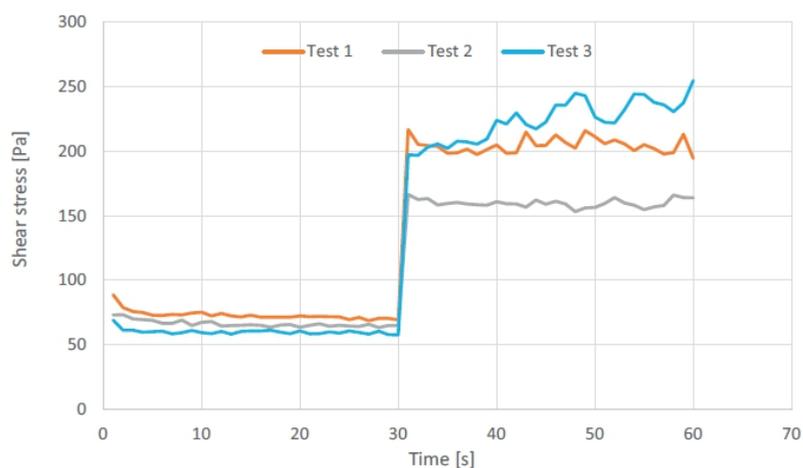


Figura 4.7 - Tensões tangenciais para os Ensaios 1,2 e 3 (Gráfico: De Schutter, G. et al., 2018).

Baseado nesses resultados iniciais, a contribuição da aplicação de um campo magnético para o controle da fluidez da argamassa e a possibilidade de um controle ativo da sua reologia, leva o autor a considerar essa solução para a impressão 3D. Porém, ainda deve ser alvo de refinamento em trabalhos futuros, com o objetivo de explorar mais técnicas para a redução da tensão tangencial e a otimização da fluidez da pasta. No final do processo, interessa garantir um material cujas características mecânicas se ajustem ao exigido no contexto da construção civil.

4.3. Argila nanoatapulgita para otimização das propriedades reológicas

Panda, B. et al. (2019) propuseram-se otimizar a composição da argamassa para a impressão 3D com recurso a cinzas volantes e através da adição de argila nanoatapulgita⁶, caracterizada pelos seus cristais alongados. Os principais ligantes utilizados neste estudo foram cinzas volantes de classe F (FA) e cimento Portland comum (OPC), adicionando-se nano argila (NC) na forma de um aluminossilicato de magnésio altamente purificado, o qual desempenha a função de aditivo na mistura. As partículas de NC variam em termos de morfologia e apresentam extremidades afiadas; o diâmetro vale aproximadamente 3nm, enquanto seu comprimento varia de 1,5 a 2µm. Nos materiais secos foi adicionado um agente ativante, sulfato

⁶ Tradução do termo inglês nano-attapulgite.

de sódio (SS) em pó. Para a produção da argamassa, o ligante foi misturado com areia fina fluvial com partículas de diâmetro inferior a 2mm.

Foram realizados dois tipos de amostras em formato de pasta: uma com NC e outra sem NC, para servir de controle. Ambas, compostas por 70% de FA e 30% de OPC. Na amostra de controle, o agente ativante foi a água. Na amostra com NC foi utilizado 3% de SS (por massa de ligante). A razão água/ligante (w/b) foi mantida entre 0,40 e 0,45 (Panda, B. et al., 2019).

Recorrendo a um reômetro, foi aplicada uma deformação nas amostras a uma taxa de deslizamento tangencial constante de 0,1/s. A tensão tangencial aumentou progressivamente até um valor máximo e depois reduziu-se até um valor de equilíbrio. A tensão de cedência foi definida neste valor máximo da tensão tangencial. A seguir, foi realizado um ensaio de curva de fluxo, aumentado a taxa de deslizamento tangencial da pasta de 0 até 100/s durante 1min, seguida de uma diminuição de 100 até 0/s durante 1min. O efeito do NC na capacidade de recuperação da taxa de deslizamento tangencial do repouso no decorrer do processo de impressão 3D foi simulado aplicando 3 diferentes taxas de deslizamento tangenciais (0,01/s durante 60s, 300/s durante 30s e 0,01/s durante 60s). Essa seleção de taxas de deslizamento tangenciais é compatível com o processo de impressão 3D, no qual o material está inicialmente em repouso, em seguida é extrudido e volta a estar em repouso após a deposição (Panda, B. et al, 2019).

Os resultados do reômetro apresentam que o efeito da adição de NC em argamassas de cinzas volantes ajuda em uma rápida recuperação da taxa de deslizamento tangencial do repouso. As extremidades das partículas de NC que estão com cargas opostas tendem a se unirem, produzindo uma microestrutura mais resistente, correspondendo a uma maior tensão de cedência do escoamento (ver Figura 4.8). Além disso, os cristais alongados, típicos da argila nanoatapulgita, e a quantidade de água na argamassa, apresentam um papel importante na floculação das partículas, cooperando para o aumento da tixotropia. Na impressão 3D, importa recordar, é fundamental que o material apresente uma alta tensão de cedência e uma reduzida viscosidade. Este comportamento pode ser observado em argamassas de cinzas volantes com adição de NC, onde o aumento da tensão de cedência do material, não afeta significativamente a viscosidade (ver Figura 4.9) (Panda, B. et al., 2019).

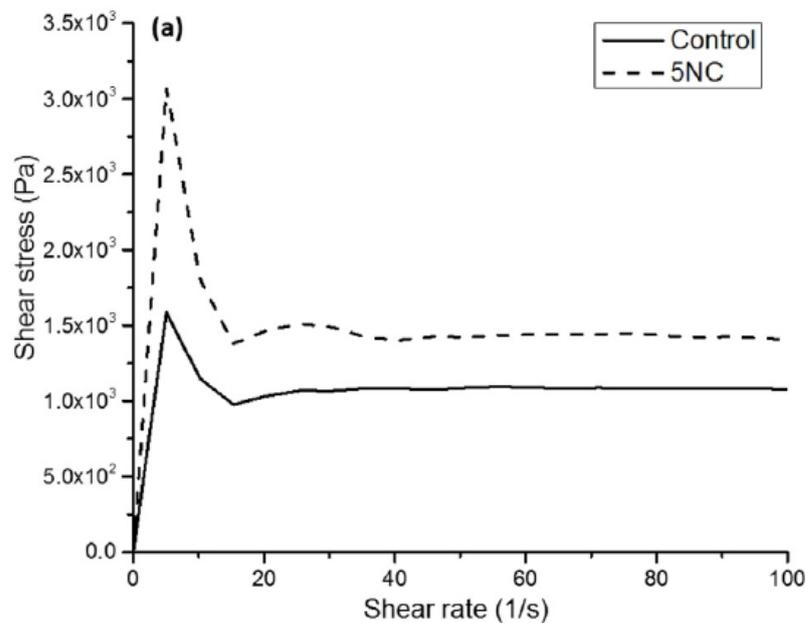


Figura 4.8 - Curva de fluxo da mistura de controle e da mistura modificada com NC (Gráfico: Panda, B. et al., 2019).

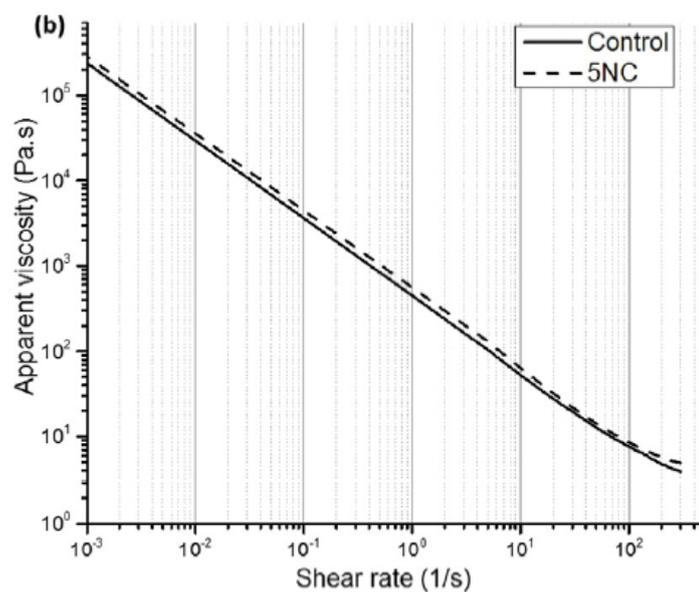


Figura 4.9 - Relação entre a taxa de deslizamento tangencial e a viscosidade da mistura de controle e da mistura modificada com NC (Gráfico: Panda, B. et al., 2019).

Os autores realizaram ainda ensaios de compressão uniaxial à taxa de 100kN/min. Neste estudo não foram definidas as especificações dos provetes a serem submetidos aos ensaios de compressão. E, portanto, a interpretação dos resultados deve ser feita com todas as cautelas. De fato, mais importante que definir a taxa de carregamento em termos de força, seria mais

aconselhado fazê-lo em termos de tensão. Porém, para o ensaio de rotura à tração por flexão, foram impressos dois tipos de provetes: um com um intervalo entre aplicação de camadas de 5min e outro com intervalo de 30min. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.10. No que diz respeito à resistência à tração, o provete com intervalo de deposição de 30min apresentou uma redução drástica da sua resistência relativamente ao provete com intervalo de deposição de 5min. Acredita-se que este resultado está associado às propriedades tixotrópicas da argamassa com NC. A tensão de cedência tende a aumentar ao longo do tempo (ver Figura 4.11), característica que indica a capacidade de construção de uma argamassa. Ou seja, a capacidade de uma camada suportar a carga imposta pela camada seguinte. Porém, esse aumento da tensão de cedência ao longo do tempo pode resultar em valores acima do valor máximo definido anteriormente, conduzindo a uma fraca adesão entre as camadas (Panda, B. et al., 2019). Relativamente aos valores apurados para a resistência à tração, importa referir que valores inferiores a 1MPa ficam muito aquém do desejável.

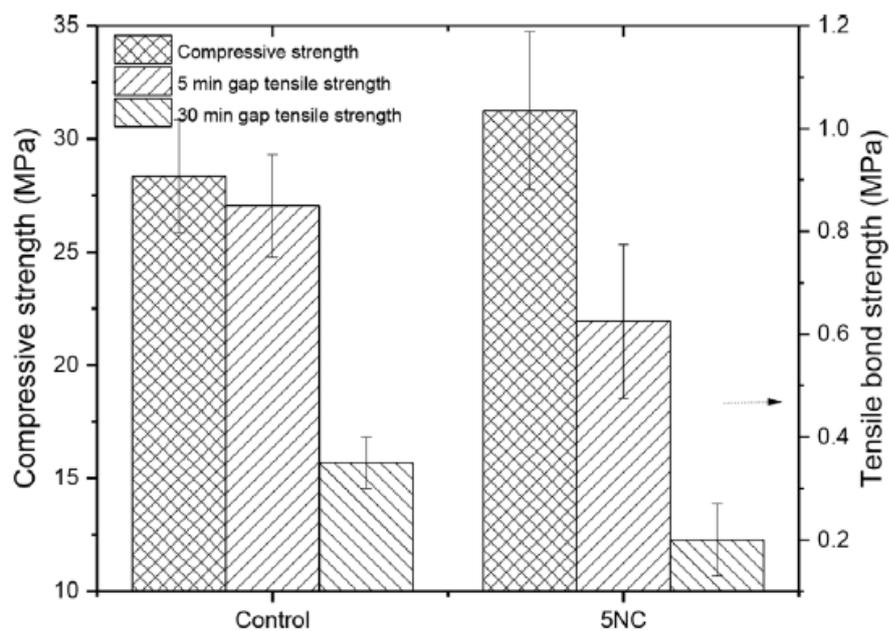


Figura 4.10 - Resistência à compressão e à tração das duas amostras (Gráfico: Panda, B. et al., 2019).

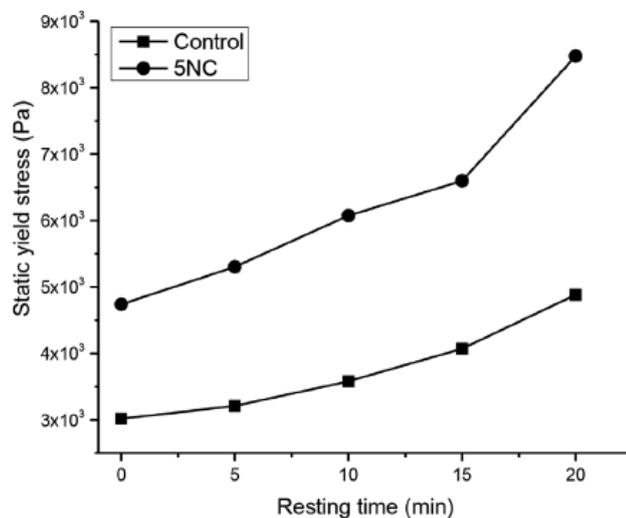


Figura 4.11 - Evolução da tensão de cedência com o tempo (Gráfico: Panda, B. et al., 2019).

Para uma demonstração da capacidade de construção das argamassas de cinzas volantes com adição de NC, foram impressas tridimensionalmente estruturas cilíndricas com diâmetro de 20cm (ver Figura 4.12). Foi utilizado um bocal de extrusão retangular de 30x15mm, e imprimiu-se 20 camadas, com um intervalo de tempo entre elas de 5s. Observou-se que a amostra de controle começou a deformar-se após a deposição da 10ª camada. A deformação inicial foi de 30mm, mas, com o avanço da impressão atingiu-se 65mm. Por outro lado, na argamassa com adição de NC, foi possível obter-se 20 camadas sem nenhum problema de estabilidade e uma deformação da base limitada. Este comportamento foi atribuído à tixotropia otimizada da argamassa devido a presença de NC. No entanto, é necessária uma maior otimização da composição da argamassa para se obter o comportamento tixotrópico desejado para diferentes designs em 3D e taxas de deposição de camadas (Panda, B. et al., 2019).

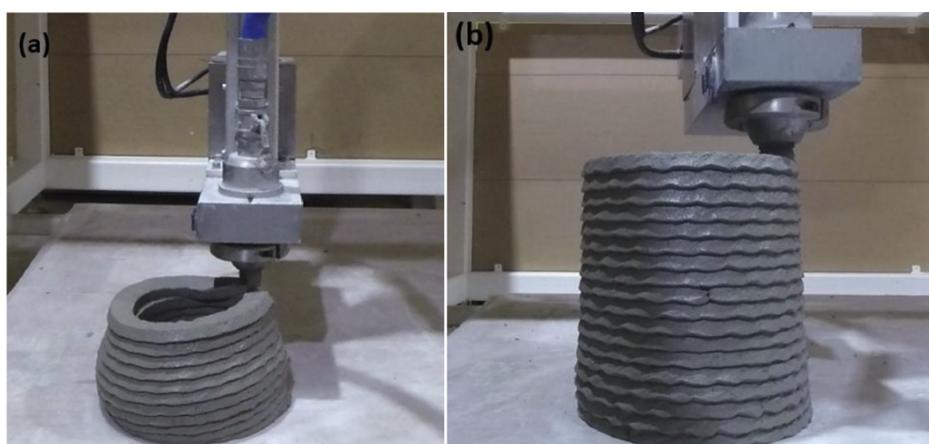


Figura 4.12 - Impressão 3D com a argamassa de controle (a) e com a argamassa de cinzas volantes com adição de NC (b) (Foto: Panda, B. et al., 2019).

De acordo com os autores, os resultados mostraram que a adição de NC melhorou a propriedade tixotrópica das amostras. O uso de NC aumentou a floculação do material, o qual resultou numa maior tensão de cedência. Este acréscimo na tensão de cedência permitiu uma maior capacidade de construção e apresentou reduzidas deformações da amostra durante o processo de deposição. É referido neste estudo que a baixa quantidade de NC utilizada não alterou a composição química final das misturas. Na conclusão do estudo, os autores referem que a incorporação de NC foi positiva na melhoria da impressão 3D de amostras com altos volumes de cinzas volantes. No entanto, esta metodologia ainda deve ser otimizada com estudos mais aprofundados da sua influência nas propriedades resistentes da argamassa (Panda, B. et al., 2019).

4.4. Betão de alto desempenho

Gosselin, C. et al. (2016) propuseram a realização de um betão de alto desempenho para impressão 3D em larga escala. Juntamente com a empresa LafargeHolcim, que forneceu os materiais com as características desejáveis de trabalhabilidade para aceleração do processo de impressão. Entre outras características, precoce resistência mecânica para resistir ao processo de deposição de camadas sucessivas. A mistura primária é composta por: 30 a 40% de cimento Portland CEM I 52,5N; 40 a 50% de sílica cristalina; 10% de sílica ativa; 10% de massa calcária.

Uma vez misturada com água, na razão (água/(cimento+areia)) $w/(c+s)$ de 0,1, a pasta de argamassa passa a ser de alto desempenho. Para além disso, adicionou-se uma resina baseada em polímeros de alta adesão para melhoria da qualidade da adesão entre camadas, e aplicou-se um agente controlador da presa para se obter a reologia adequada e um tempo de preparo compatível com as contingências da impressão 3D.

Os ensaios mecânicos foram realizados em provetes de formato prismático e com dimensões de 40x40x160mm que foram retirados de um bloco impresso tridimensionalmente, curado por um período de 90 dias em temperatura ambiente. Os provetes foram cortados de modo a garantirem a perpendicularidade entre as camadas impressas e o carregamento (Gosselin, C. et al., 2016).

Três provetes foram utilizados para os ensaios de flexão. Foram submetidas a taxas de deformação de 1mm/min e 5mm/min (ver Figura 4.13). A rotura ocorreu dentro da zona de flexão pura, mas nenhum defeito na adesão entre camadas foi observado nos mecanismos de rotura. O valor médio obtido da resistência à flexão foi de 14,3MPa. Um valor considerável no contexto da construção civil. Os autores estimaram a resistência à compressão dos provetes através de uma relação entre a razão $w/(c+s)$ da argamassa com os valores obtidos da resistência à flexão. Para razões tão pequenas, neste caso de 0,1, a relação considerada entre a resistência à flexão e a resistência à compressão foi de 10%. Assim, estimou-se um valor conservativo da

resistência à compressão superior à 120MPa (Gosselin, C. et al., 2016). De referir que esta extrapolação, avaliada para o betão, não está provada a sua aplicação neste âmbito. Aliás, permanece a questão de não terem utilizados as metades resultantes dos ensaios à tração para realizarem os ensaios à compressão. Tendo em conta os valores da tensão de tração à flexão alcançado (~14MPa) e as flechas indicadas na Figura 4.13, o módulo de elasticidade do material seria inferior a 6GPa. Um valor reduzido portanto.

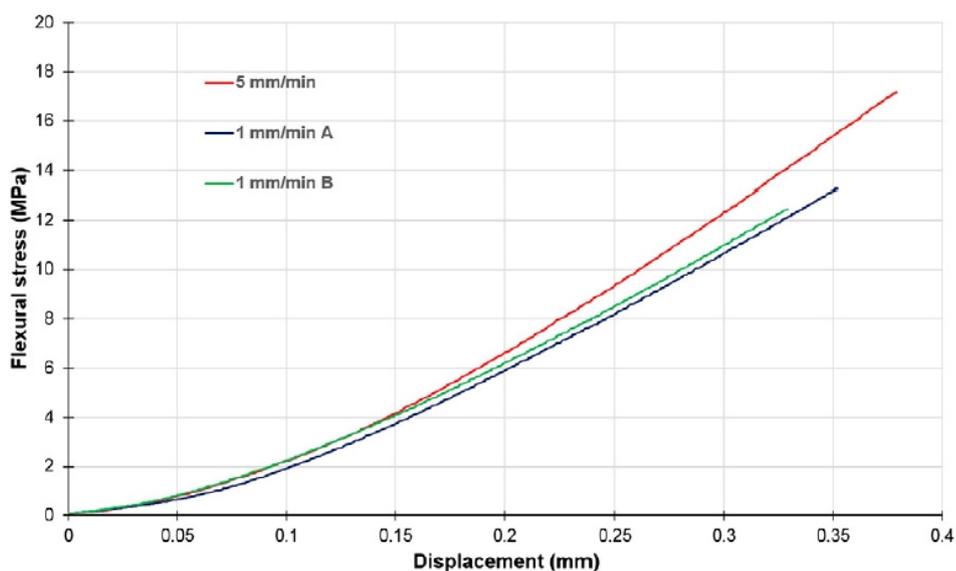


Figura 4.13 - Resultados dos ensaios mecânicos de flexão (Gráfico: Gosselin, C. et al., 2016).

Ao obter-se um alto desempenho mecânico observado entre as camadas, os autores concluíram ser possível a fabricação de estruturas delgadas recorrendo a este tipo de betão (Gosselin, C. et al., 2016).

4.5. Pó de escória e de gesso no leito para o processo de Binder Jetting

Xia, M. e Sanjayan, J. (2016) propuseram a utilização de dois sistemas de leitos/camadas de pó para o processo de impressão 3D utilizando o método Binder Jetting, que será pormenorizado mais à frente. Porém, para uma melhor compreensão deste ponto, este processo é ilustrado na Figura 4.14. Esta técnica consiste na injeção de um líquido (“binder jetting”) ativador numa camada de um pó. Para esta mistura de pó, recorreram à utilização de um geopolímero à base de escória em pó, designado de GP, ou do pó de gesso comercial, designado de ZP.

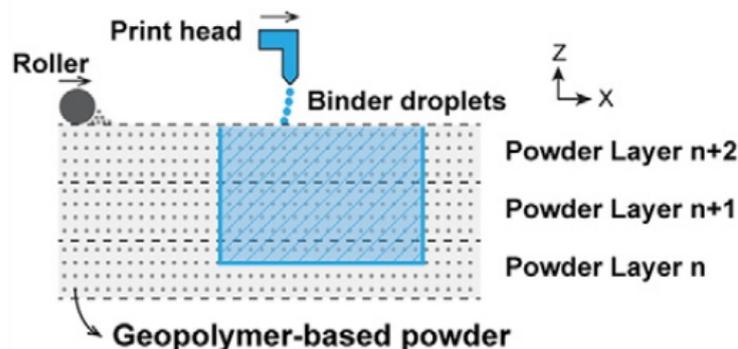


Figura 4.14 - Ilustração do processo de Binder Jetting (Ilustração: Xia, M e Sanjayan, J., 2016).

Uma mistura de escória, com um ativador à base de sílica (metassilicato de sódio anidro) e areia fina (com um tamanho médio de partícula de $184\mu\text{m}$) foram usadas na preparação do GP. O pó de ZP não passou por nenhum tipo de preparação prévia. Um solvente aquoso que consistia praticamente em água e 2-Pirrolidona foi utilizado como ligante durante o processo de 3DP (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

Uma estrutura plana ($40,4 \times 40,4 \times 4\text{mm}$) foi impressa tridimensionalmente com diferentes tamanhos e formatos de “poros” para identificação da resolução da impressão. Esses “poros”, que na realidade consistem em espaços vazios nesta estrutura plana, apresentaram dimensões de 0,5 a 5mm. Uma estrutura cúbica com aresta de 20mm foi impressa para avaliação da qualidade da solução (ver Figura 4.15). A espessura das camadas foi definida em 0,10mm e a razão binder/volume (ligante/volume) foi de 0,24 para as camadas externas superiores e inferiores e de 0,14 para as camadas internas. Após a impressão, as estruturas cúbicas permaneceram em repouso por 2h à temperatura ambiente. A seguir, o pó em excesso foi retirado usando ar comprimido. Nenhum dos cubos feitos com ZP foram submetidos a outros processos de pós-tratamento. Alguns cubos feitos com GP foram imersos numa solução saturada de metassilicato de sódio anidro de 1 até 7 dias à temperatura de 60° (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

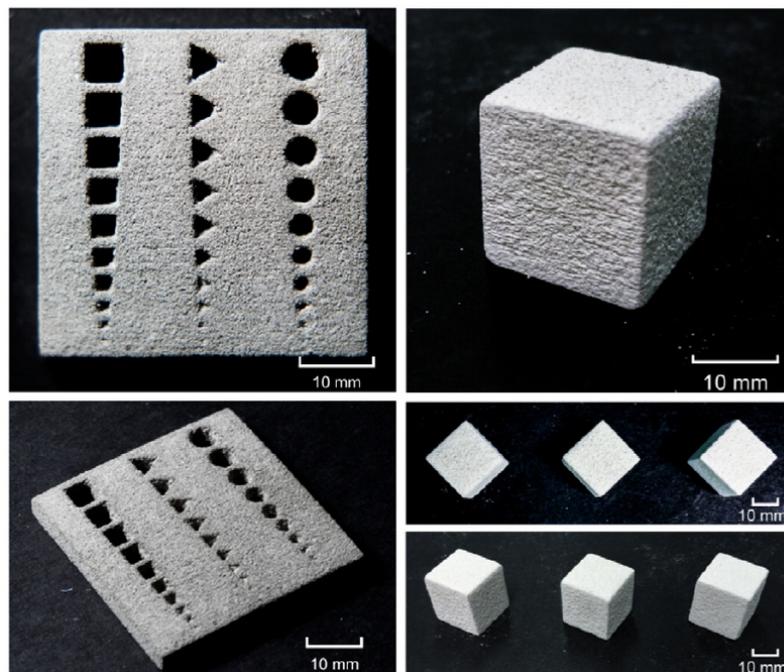


Figura 4.15 - Estruturas impressas tridimensionalmente (Foto: Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

A precisão de impressão mostrou ser da ordem de 0,01mm. A porosidade dos provetes cúbicos foi medida submergindo-os num líquido durante 30min e depois pesando-os numa balança de precisão de 0,001g, neste processo os autores seguiram a norma Australian Standard AS 1774.5:2014. Para a avaliação das propriedades mecânicas dos provetes cúbicos, eles foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial com uma taxa de carregamento de 0,03kN/s (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

Os resultados dos ensaios mostraram que o pó de GP exibiu uma menor massa volúmica e uma menor massa volúmica aparente na camada base de partículas. Contudo, apresentou uma maior porosidade quando comparado com o pó de ZP. As análises realizadas concluíram que o pó de GP continha mais partículas finas do que o pó de ZP. Tais partículas têm a tendência de se aglomerarem durante o processo de deposição, causando vazios nas camadas e, assim, aumentando a sua porosidade (ver Figura 4.16). Isto pode ser evitado realizando a compactação das camadas (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

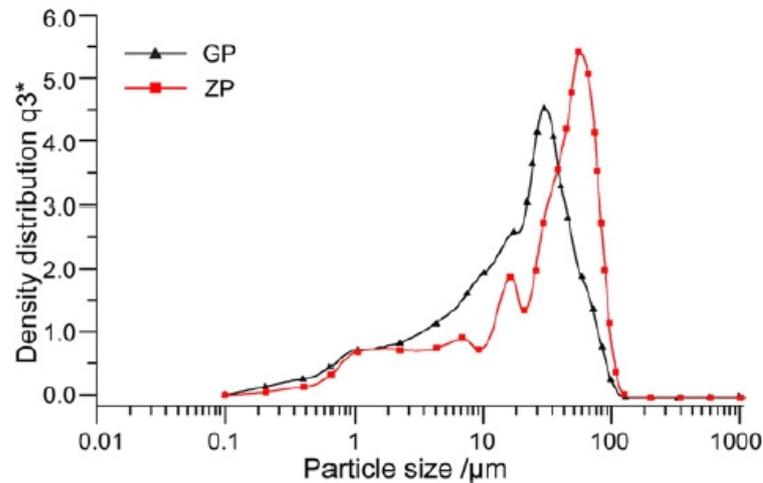


Figura 4.16 – Massa volúmica (em g/cm^3) das partículas do ZP e do GP (Gráfico: Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

Em relação à qualidade das camadas de pó, após a sua deposição, verificou-se que a de pó de GP apresentou uma superfície mais rugosa, enquanto que a de ZP se apresentou mais lisa e homogênea (ver Figura 4.17). Apesar disso, a qualidade da superfície da camada de GP foi considerada suficiente para o processo de impressão. (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

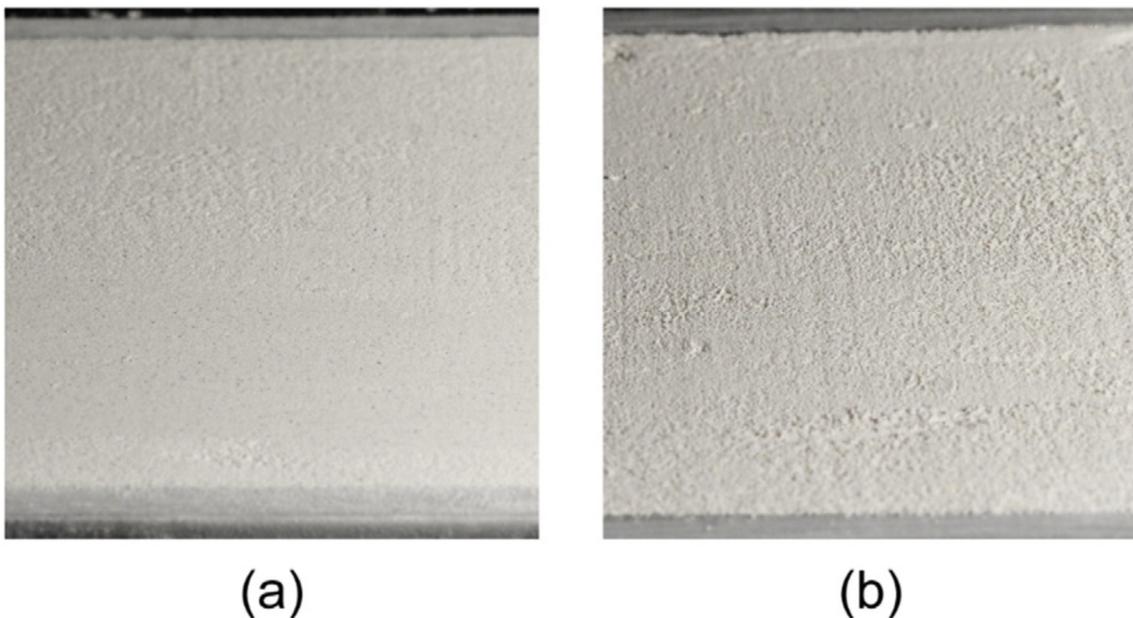


Figura 4.17 - Qualidade da superfície da camada com pó de ZP(a) e com pó de GP(b) (Foto: Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos podem ser observados no Quadro 4.1. Para cada tipo de leito foram impressos 15 provetes cúbicos, e cada valor apresentado corresponde à média dos valores obtidos. Esses resultados de resistência à compressão são muito baixos para

que esta solução seja considerada para aplicação na construção. No entanto, observa-se que a resistência à compressão é ligeiramente superior na direção X paralela às camadas.

Quadro 4.1 - Resistência à compressão dos cubos sem pós-tratamento (Adaptado de Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

Resistência uniaxial à compressão (MPa)		
Pós	Eixo X	Eixo Z
ZP	0,69 ± 0,12	0,61 ± 0,11
GP	0,91 ± 0,03	0,76 ± 0,10

Para os provetes impressos a partir do pó de GP e posteriormente submersos na solução saturada de metassilicato de sódio anidro, à temperatura de 60°, os resultados dos ensaios de compressão podem ser observados no Quadro 4.2. Foram impressos 15 provetes cúbicos, e cada valor apresentado é uma média de todos os valores obtidos. Não se sabe como iria evoluir a resistência à compressão dos provetes, mas após 7 dias de submersão, os valores próximos de 16MPa começam a ser considerados. Os valores após 1 dia de submersão valem quase 2/3 daqueles valores, o que é significativo. Isto pode ser justificado como uma consequência da continuação do processo de geopolimerização quando na presença de uma solução ativadora alcalina (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016). O efeito da direção de impressão nas propriedades mecânicas não é significativo: cerca de 10%.

Quadro 4.2 - Resistência à compressão dos cubos com pós-tratamento (Adaptado de Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

Resistência uniaxial à compressão (MPa)		
Tempo de imersão	Eixo X	Eixo Z
1 dia	10,3 ± 0,2	9,2 ± 0,2
7 dias	16,5 ± 0,4	15,7 ± 0,2

Assim, os autores concluíram que esta solução apresentou características (depositabilidade, porosidade e resistência) que possibilitam a sua utilização no processo de Binder Jetting. Neste estudo também foi apresentado um processo alternativo de pós-tratamento que otimiza os valores de resistência das estruturas impressas. Valores de até 16MPa podem ser alcançados através deste método. Esta técnica deve ser sujeita a melhoramentos para possíveis aplicações na construção. Os autores afirmam que este estudo é facilmente escalável para a produção de maiores componentes estruturais (Xia, M. e Sanjayan, J., 2016).

4.6. Mistura de cimento Portland comum com cimento de aluminato de cálcio

Shakor, P. et al. (2017) estudaram o uso de uma mistura de dois materiais na impressão 3D: cimento Portland comum (OPC) e cimento de aluminato de cálcio (CAC). O OPC é o mais convencional e mais utilizado mundialmente, consistindo numa mistura de cálcio, sílica, alumina e ferro. O CAC é menos utilizado e é composto essencialmente de aluminatos de cálcio

hidráulicos. Realizou-se a distribuição das partículas do OPC em 0,19, 8,93 e 38,46 μ m, e do CAC em 3,38, 79,93 e 127,11 μ m, após passagem por uma peneira de 150 μ m. A mistura apresenta uma razão mista contendo 67,8% de CAC e 32,2% de OPC. Adicionalmente, 4,5% de toda a mistura foi substituída por carbonato de lítio para realização da ativação alcalina do ligante. Esta substância, além de possuir um baixo custo, fornece uma alta resistência precocemente e uma excelente adesão e estabilidade.

O processo de impressão 3D utilizado neste estudo foi o Binder Jetting, onde a camada de impressão consistiu na mistura de OPC e CAC. Para a realização do ensaio de compressão e medição da porosidade foram fabricados provetes cúbicos com aresta de 20mm. Estes provetes foram preparados de três formas distintas: impressão 3D da argamassa de CAC e OPC com carbonato de lítio; impressão 3D da argamassa de CAC e OPC sem carbonato de lítio; preparação manual da argamassa de CAC e OPC com carbonato de lítio. Resultando num total de 29 provetes. Alguns provetes foram testados sem o tempo de cura (designado de green part), outros com uma cura em água em temperatura ambiente por 1, 7 e 28 dias, e alguns provetes foram curados numa solução aquosa contendo 2% de hidróxido de cálcio (Shakor, P. et al., 2017).

Os ensaios de porosidade foram conduzidos nos provetes contendo o carbonato de lítio. O processo de ensaio consistiu na secagem dos provetes em estufa a 105° durante 2h. A secagem prosseguiu à temperatura ambiente antes de serem pesados. Após a pesagem, os provetes foram colocados numa máquina de vácuo durante 10min. Depois foram submersos em água por 10min, até estarem completamente saturados. E por último, foram pesados novamente (Shakor, P. et al., 2017).

As dimensões dos provetes desviaram-se do projetado de 0,09mm até 1,79mm. Os resultados dos ensaios de compressão nos provetes impressos contendo carbonato de lítio podem ser observados na Figura 4.18. Os resultados mostram que um aumento da saturação conduz a um ligeiro aumento da resistência. De fato, o preenchimento dos poros por água permite um ligeiro acréscimo da correspondente resistência. Os autores afirmam que os valores baixos de resistência observados são uma consequência da quantidade limitada de água libertada pelo bocal da impressora e do próprio processo, não sendo suficiente para a hidratação de todas as partículas do ligante. A morfologia das partículas do cimento pode ser outro motivo, partículas finas aumentam o ângulo de contato reduzindo a hidratação. Além disso, o líquido ativador (“binder jetting”) utilizado não foi água pura, incluindo de 5 a 10% de glicerol (humectante⁷). Humectantes não são adequados para ligantes (“binder”) à base de água, porque reduzem a

⁷ Humectantes são substâncias hidrofílicas que ajudam no controle da perda de água.

resistência à compressão dos materiais cimentícios. Assim, os provetes impressos apresentaram uma reduzida resistência quando comparados com os provetes preparados manualmente (ver Figura 4.19) (Shakor, P. et al., 2017). Os autores equivaleram os valores da razão w/c (água/cimento) dos provetes preparados manualmente aos níveis de saturação dos provetes impressos. Isto se deve ao fato do parâmetro razão w/c influenciar diretamente as propriedades do betão. Quanto maior for o seu valor, mais porosa e permeável é a pasta de cimento, tornando o betão menos resistente. Na técnica de Binder Jetting os níveis de saturação atuam de maneira inversa, uma vez que não há uma mistura manual dos elementos secos com os húmidos, é necessário o uso de uma maior quantidade de líquido ativador/aglutinante para uma eficaz hidratação de todas as partículas secas. Esta limitação da hidratação do material constitui o principal desafio a ultrapassar pela impressão 3D.

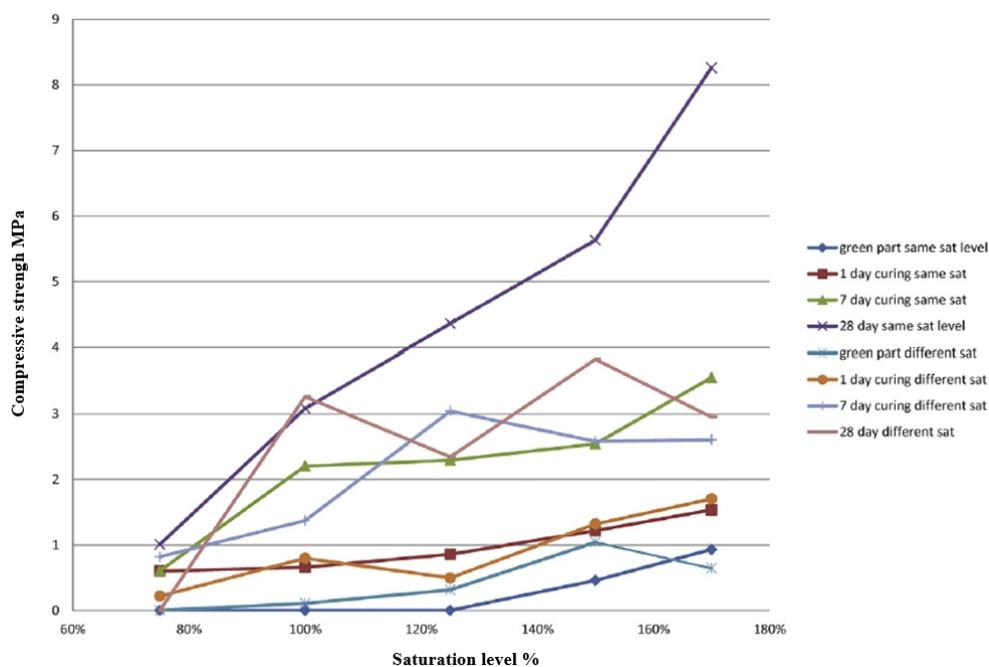


Figura 4.18 - Resistência à compressão dos provetes impressos tridimensionalmente contendo carbonato de lítio (Gráfico: Shakor, P. et al., 2017).

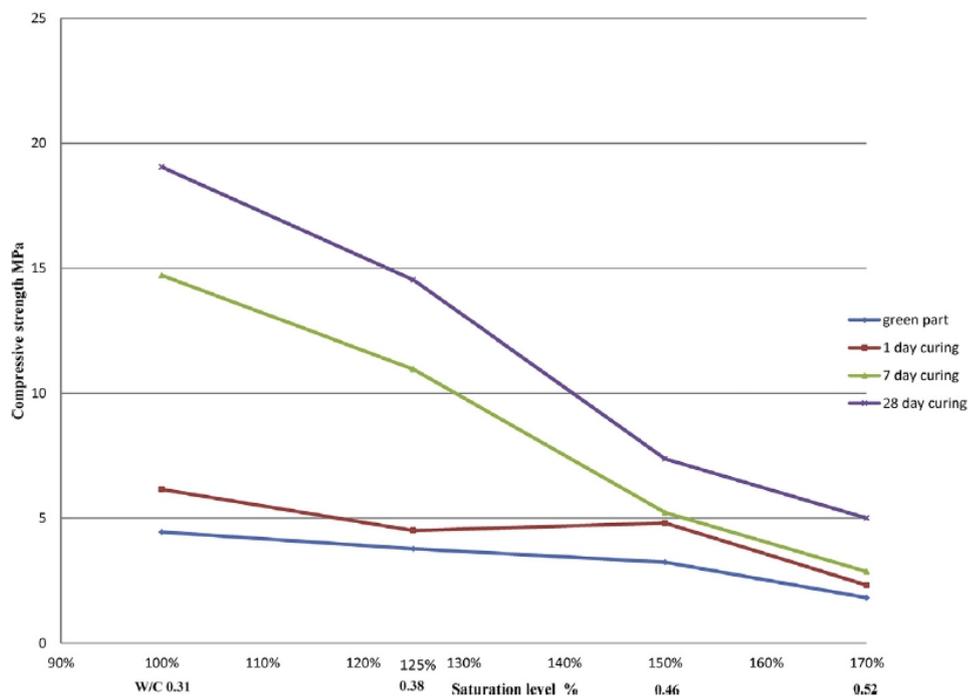


Figura 4.19 - Resistência à compressão dos provetes preparados manualmente (Gráfico: Shakor, P. et al., 2017).

Também se realizaram ensaios de compressão para os provetes impressos com argamassa de CAC e OPC sem a adição do carbonato de lítio. Os resultados podem ser observados na Figura 4.20. Os valores obtidos pioram relativamente à solução com a adição do carbonato de lítio. A relação da porosidade com a saturação dos provetes impressos tridimensionalmente com e sem a adição de carbonato de lítio podem ser observados na Figura 4.21. De acordo com este estudo, os provetes cúbicos não apresentaram elevadas resistências devido à presença de poros abertos entre as camadas (Shakor, P. et al., 2017). Os valores de resistência apresentados para os provetes impressos tridimensionalmente, com e sem a adição do carbonato de lítio, são problemáticos para o uso na Engenharia Civil. Nas melhores condições obteve-se um valor máximo de resistência à compressão de 8MPa, o qual é muito reduzido relativamente ao valor máximo obtido com os provetes produzidos manualmente, 19MPa.

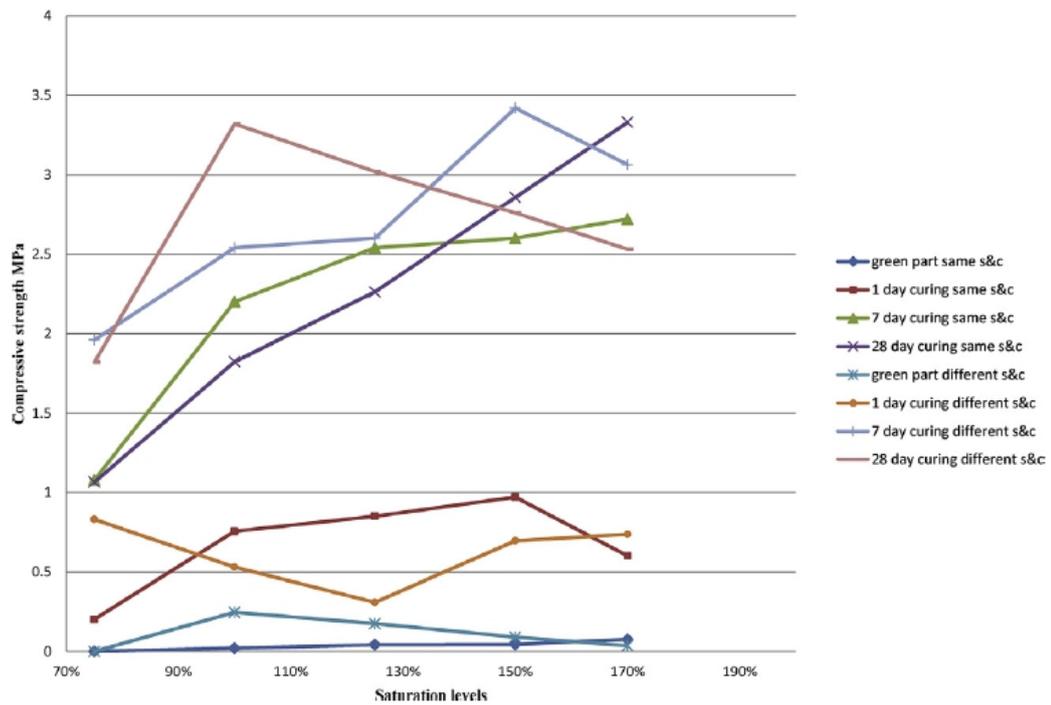


Figura 4.20 - Resistência à compressão dos provetes impressos tridimensionalmente sem a adição do carbonato de lítio (Gráfico: Shakor, P. et al., 2017).

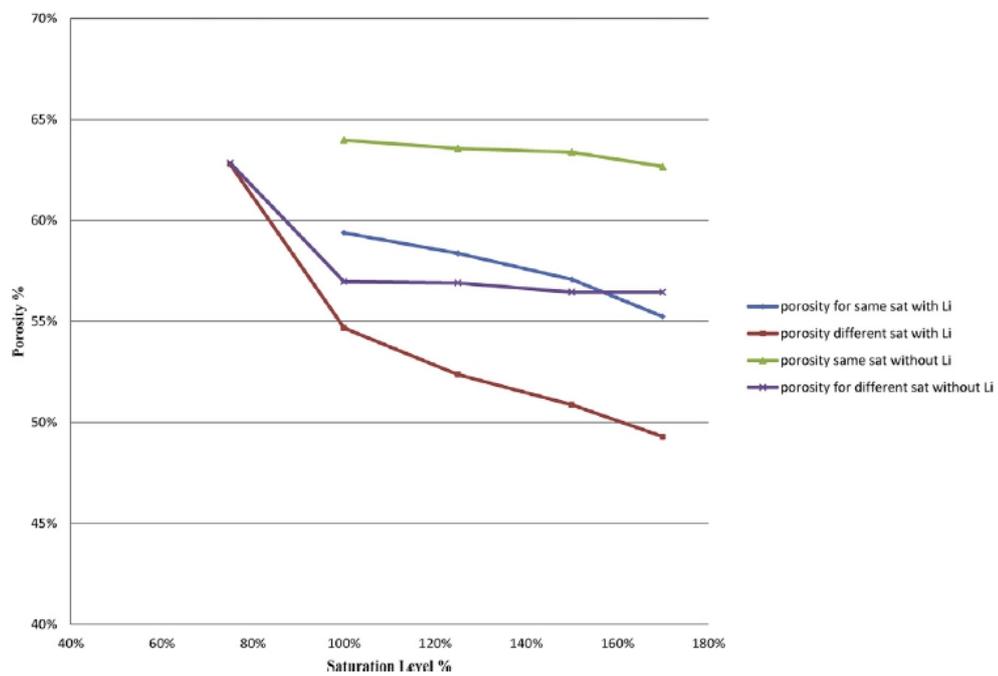


Figura 4.21 - Porosidade dos provetes impressos tridimensionalmente (Gráfico: Shakor, P. et al., 2017).

4.7. Uso da Teoria de Fuller Thompson e o Modelo de Marson-Percy

Weng, Y. et al. (2018a) propuseram a utilização de materiais cimentícios seguindo a Teoria de Fuller Thompson e o Modelo de Marson-Percy. O primeiro vem sendo usado para a produção de betão de alto desempenho, para a composição de betão sustentável recorrendo à mínima quantidade de cimento e para a otimização da sua reologia. O segundo consiste num modelo que propõe que quanto maior o empacotamento dos materiais, menor será a sua viscosidade plástica. Estes métodos foram aplicados em 3DCMP (3D Cementitious Materials Printing) para estudar se cumprem as exigências das propriedades reológicas do material.

A gradação é um importante atributo para a produção de materiais cimentícios com máxima massa volúmica e mínimo volume de vazios. Este objetivo pode ser maximizado aplicando a Teoria de Fuller Thompson na gradação contínua da areia. Numa gradação contínua, a interação entre as partículas existe em muitos pontos de contato maximizando a massa volúmica. Pelo contrário, a gradação de vão, gerada a partir da falta de uma certa faixa de dimensões de partículas de agregados na composição, produz um maior número de vazios e menos pontos de contato quando comparado com o sistema de gradação contínua. Ao utilizar-se um agregado de dimensão única, atinge-se uma gradação uniforme que apresenta pontos de contatos mínimos entre as partículas (ver Figura 4.22). Os pontos de contato entre as partículas contribuem para a transferência de tensões (normais e tangenciais) na mistura. Assim, quando há um aumento nos pontos de contato, há um aumento da resistência global, gerado em consequência de um aumento do número de pontos de escoamento estático da mistura (Weng, Y. et al., 2018a).

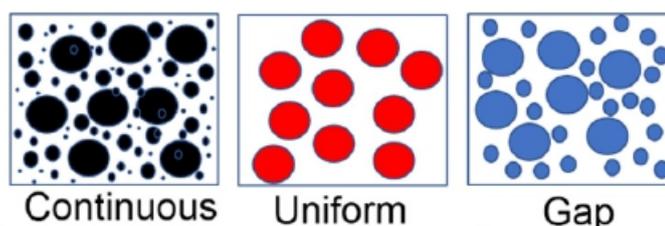


Figura 4.22 - Representação dos tipos de gradação (Ilustração: Weng, Y. et al., 2018a).

As composições, neste estudo, consistem em cimento Portland comum (OPC), sílica ativa (SF), areia de sílica, cinzas volantes (FA, classe F), areia natural fluvial, água e um superplastificante. Foram utilizadas 4 diferentes areias de sílica: de dimensões 0,6-1,2mm; 0,25-0,6mm; 0,15-0,25mm; e inferiores a 0,15mm. A amostra A seguiu a Teoria de Fuller Thompson para atingir um sistema de gradação contínuo. As amostras B e C tiveram uma composição com gradação uniforme, e as amostras D e E apresentaram uma gradação de vão. Em todas as amostras anteriores foi utilizada areia de sílica. A amostra F foi usada como controle, utilizando areia natural fluvial (ver Figura 4.23) (Weng, Y. et al., 2018a).

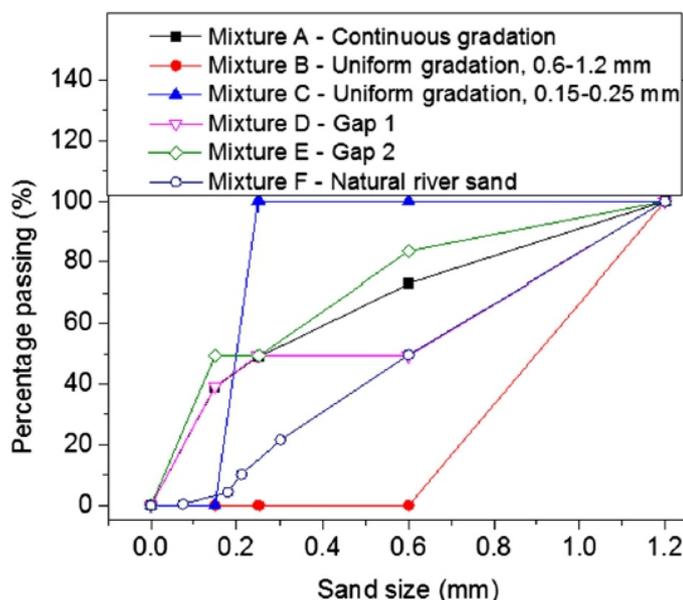


Figura 4.23 - Curvas de graduação da areia para as diferentes amostras (Gráfico: Weng, Y. et al., 2018a).

Para a determinação das propriedades reológicas dos materiais foi utilizado um reômetro e realizou-se um “mini-slump test” (um “slump-test” com cone de altura de 70mm) para medir a trabalhabilidade das amostras. Imprimiram-se provetes com as amostras anteriores para estudar a capacidade de construção das diferentes misturas. Cada mistura foi impressa no formato de uma coluna circular com 10cm de diâmetro interior, composta por 50 camadas. Cada camada foi projetada com 20mm de largura e 10mm de altura. Para a determinação da massa volúmica e a realização do ensaio mecânico de compressão, as argamassas foram introduzidas em moldes cúbicos com aresta de 50mm. Os provetes foram retirados dos moldes após 24h e cobertos por um plástico, para posterior cura em recipientes de plástico. Os ensaios de compressão e de massa volúmica foram realizados após 7, 14 e 28 dias de cura. Os ensaios de compressão foram realizados através de carga uniaxial com taxa de carregamento de 100kN/min, isto é cerca de 0,67MPa/s (Weng, Y. et al., 2018a).

Para os ensaios de flexão, foram impressos filamentos através de um bocal de extrusão retangular com dimensões (transversais) de 30mmx15mm. Estes filamentos foram cortados em provetes separados, cada um com 350mm de comprimento e 30mm de altura, o correspondente a duas camadas. Os ensaios foram realizados após 7, 14 e 28 dias de cura (Weng, Y. et al., 2018a).

O 3DCMP requer que o material apresente baixa viscosidade plástica e altas tensões de escoamento estático para capacidade de construção e para boas características para ser bombado (ver Quadro 4.3). Isto foi atingido com a amostra A, onde os agregados tinham a seguinte

composição: 39,2% de areia com dimensão inferior a 0,15mm; 10,1% de areia 0,15-0,25mm; 23,8% de areia 0,25-0,6mm; e 26,8% de areia 0,6-1,2mm. Os resultados do estudo da trabalhabilidade das misturas podem ser observados na Figura 4.24. Pode ser observado que para todas as misturas o diâmetro interno tende a diminuir. A cada momento de medida, a mistura A foi a que apresentou melhor performance. Os resultados dos ensaios da capacidade de impressão das misturas podem ser observados no Quadro 4.4. Estes valores confirmam o concluído com os ensaios de trabalhabilidade e das definições das propriedades reológicas; a mistura A mostra ser a mais adequada (Weng, Y. et al., 2018a).

Quadro 4.3 - Performance reológica das diferentes misturas (Adaptado de Weng, Y. et al., 2018a).

Mistura	Tensão de escoamento estático (Pa)	Tensão de escoamento dinâmico (Pa)	Viscosidade plástica (Pa.s)
A	3350	492,7	16,65
B	2411	261,3	19,00
C	2107	252,8	21,81
D	3318	290,6	18,03
E	2693	274,1	33,31
F	1874	208,4	16,95

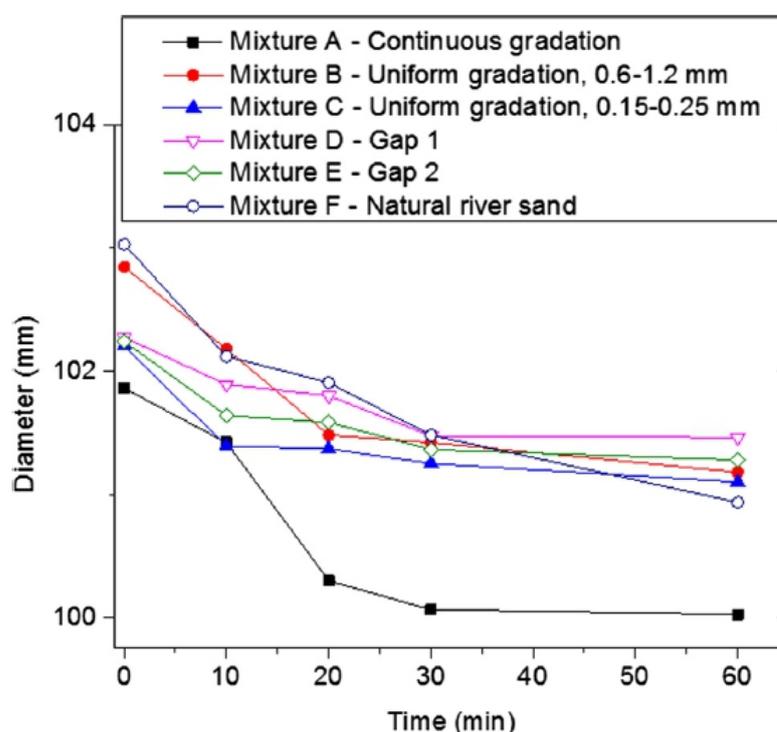


Figura 4.24 - Resultados do "mini-slump test" (Gráfico: Weng, Y. et al., 2018a).

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios da capacidade de construção (Adaptado de Weng, Y. et al., 2018a).

Mistura	Camada na qual é perceptível deformação	Camada na qual houve colapso
A	42 ^a	43 ^a
B	30 ^a	31 ^a
C	27 ^a	32 ^a
D	31 ^a	36 ^a
E	32 ^a	34 ^a
F	24 ^a	25 ^a

A massa volúmica de um material cimentício depende sempre da sua compactação. Uma melhor compactação de um sistema de gradação contínua resulta numa maior massa volúmica. Porém, uma maior massa volúmica tem como consequência um maior peso próprio, o que pode levar a um aumento das deformações. No entanto, isto também implica uma maior resistência mecânica. Assim, é importante encontrar uma solução em que estas vantagens e desvantagens estejam balanceadas. Observando os resultados (ver Figura 4.25), a mistura A apresenta-se novamente como a ideal. Os ensaios mecânicos realizados mostram, como esperado, que as resistências à compressão (ver Figura 4.26) e à flexão (ver Figura 4.27) aumentam com o tempo de cura. No final dos 28 dias de cura, a amostra F foi que mostrou melhor resistência à compressão (~60MPa). Num nível inferior (~50MPa, cerca de 16% menos), surgem as amostras A e C. As amostras B, D e E encontram-se num nível (mais) abaixo (~40MPa, cerca de 30% menos). Relativamente à tração por flexão, as tensões resistentes de todas as amostras encontram-se no intervalo 4-4,5MPa, excepto as amostras A e B que estão um pouco mais abaixo (~3,5MPa) (Weng, Y. et al., 2018a).

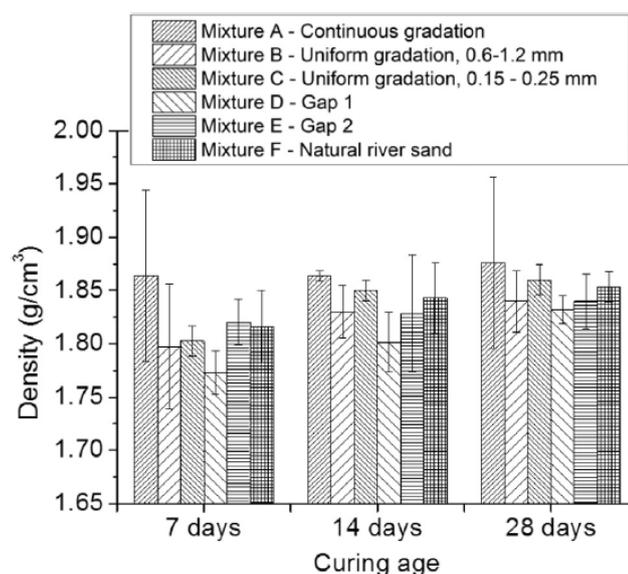


Figura 4.25 - Massas volúmicas de todas as misturas (Gráfico: Weng, Y. et al., 2018a).

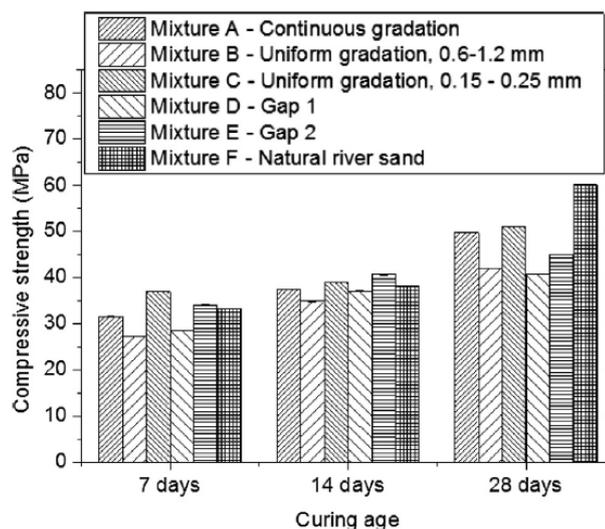


Figura 4.26 - Resistência à compressão de todas as amostras (Gráfico: Weng, Y. et al., 2018a).

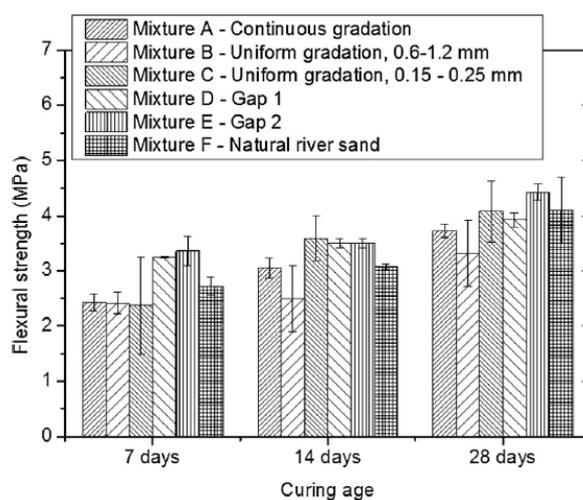


Figura 4.27 - Resistência à flexão de todas as amostras (Gráfico: Weng, Y. et al., 2018a).

Relacionando todos os resultados obtidos anteriormente, a mistura A mostra-se pertinente para o processo de impressão 3D, provando, segundo os autores, a funcionalidade da solução proposta. No entanto, a adoção direta da gradação da areia e a proporção da composição não é muito realística na prática, devido à disponibilidade dos materiais e outras restrições. Mas, segundo os autores, uma simples orientação na composição adotando a Teoria de Fuller Thompson e o Modelo de Marson-Percy ainda oferece significativas compreensões para o desenvolvimento de materiais que possam ser impressos em 3D para a indústria da construção (Weng, Y. et al., 2018a).

4.8. Compósitos à base de cimento com endurecimento por deformação

Ogura, H. et al. (2018) desenvolveram e testaram compósitos à base de cimento para endurecimento por deformação (SHCC – Strain-Hardening Cement-Based Composites). Realizaram-se 4 misturas de SHCC, designadas de misturas A até D. Essas misturas possuem uma razão w/b (água/ligante) de 0,22 até 0,24. O ligante é composto por 75% de cimento CEM II/A-M (S-LL) 52,5R, 15% de sílica ativa e 10% de cinzas volantes. A sílica ativa foi utilizada para aumentar a viscosidade, a coesão e a tixotropia das amostras, como também para elevar a adesão entre a matriz e as fibras. Foi adicionado lama contendo 50% de material sólido e 50% de água. Baseando-se em trabalhos anteriores, foram escolhidas para este estudo microfibras de polietileno de alta massa volúmica (HDPE) com comprimento e diâmetro da fibra de 6mm e 0,012mm, respectivamente. Acreditaram os autores que, com base nestas fibras, seria possível aumentar a resistência à tração da mistura para lá do início da fissuração.

As misturas A e B continham 0,3% e 1,0% de fibras, respectivamente, por volume do compósito, enquanto as misturas C e D apresentam 1,5% de fibras. Como agregado, a areia fina com diâmetro inferior a 1,0 mm foi utilizada em todas as misturas. Para a determinação da capacidade de construção, foram realizados “slump-tests” após 20min da mistura dos componentes da argamassa (ver Quadro 4.5). De acordo com a norma DIN EN 1015-3:2007-05 (também em português: NP EN 1015-3:2006, “Determinação da consistência de argamassas pelo método da mesa de espalhamento”), após a retirada do cone, a placa contendo a argamassa é levantada e derrubada/largada 15 vezes durante 15s. Este processo de levantar e derrubar a placa é denominada de shocks pelos autores deste estudo. Tendo em conta estes resultados, os ensaios mecânicos foram realizados em provetes impressos tridimensionalmente contendo as misturas B e C apenas. Para efeitos de comparação, alguns provetes foram feitos manualmente. Blocos foram impressos, sem intervalos, com 1000mm de comprimento, 30mm de largura e 120mm de altura. Desses blocos foram retirados provetes retangulares com dimensões de 250x24x40mm e utilizados em ensaios uniaxiais de tração. Adicionalmente, foram moldados provetes cúbicos com aresta de 100mm, para a realização dos ensaios de compressão. Todos os provetes foram submersos em água durante 7 dias e depois armazenados numa câmara climática à temperatura constante de 20° e humidade relativa de 65%. Após 26 dias, todos os provetes foram retirados da câmara. Os ensaios (tração e compressão) foram realizados no 28° dia (Ogura, H. et al., 2018).

Quadro 4.5 - Resultados dos "slump-tests" (Adaptado de Ogura, H. et al., 2018).

Mistura	Diâmetro de expansão da argamassa		
	Antes dos shocks F_0 (mm)	Depois dos shocks F_1 (mm)	Expansão relativa $F_r = (F_1/F_0 - 1)$
A	119	142	0,19
B	120	135	0,13
C	119	133	0,12
D	129	153	0,19

Os provetes das misturas B e C puderam ser impressos com filamentos consistentes em 7 camadas, sem intervalo, e sem deformação visível das camadas inferiores. Os resultados dos ensaios mecânicos podem ser observados no Quadro 4.6. A tensão na primeira fissura é definida como sendo a tensão na qual a resposta tensão-deformação no ensaio de tração desvia claramente da linearidade como resultado do início da fissuração. Os autores acreditam que uma maior concentração de fibras na mistura C é a provável razão para a superior tensão na primeira fissura e de resistência à tração em comparação com a mistura B. O método de fabricação dos provetes não teve uma influência significativa nas propriedades elásticas dos compósitos ou na sua performance após a formação das primeiras fissuras. Os provetes produzidos manualmente apresentaram maiores vazios no seu interior quando comparados com os provetes impressos. Acredita-se ser uma consequência da compactação mecânica que ocorre durante o processo de extrusão (Ogura, H. et al., 2018). De qualquer modo, tendo em conta os resultados apresentados, verifica-se que os resultados obtidos para a tração são valores normais para a construção civil. Existem, contudo, duas lacunas nestes resultados: por um lado, teria sido muito importante terem avaliado o módulo de elasticidade no início da fissuração; e ainda mais importante, terem avaliado a resistência à compressão dos provetes impressos.

Quadro 4.6 - Resultados dos ensaios mecânicos (Adaptado de Ogura, H. et al., 2018).

Provetes	Tensão na primeira fissura (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Tensão na rotura (%)	Resistência à compressão (MPa)
B-impresso	$4,18 \pm 0,10$	$5,32 \pm 0,04$	$0,88 \pm 0,23$	-
B-manual	$4,09 \pm 0,15$	$4,53 \pm 0,10$	$0,58 \pm 0,41$	$105 \pm 0,12$
C-impresso	$4,25 \pm 0,03$	$5,66 \pm 0,02$	$3,21 \pm 0,05$	-
C-manual	$4,63 \pm 0,09$	$6,32 \pm 0,04$	$1,67 \pm 0,16$	$104 \pm 0,02$

Os autores concluíram que as argamassas constituídas por compósitos à base de cimento com endurecimento por deformação e que possuam uma concentração de fibras de 1% e de 1,5% são adequadas para a impressão 3D. Os provetes extraídos do bloco impresso inicialmente, apresentaram uma capacidade de resistência à tensão adequada e uma distribuição uniforme das múltiplas pequenas fissuras (Ogura, H. et al., 2018). Afirmam também que devem ser realizados

mais estudos, aprofundando as ideias e as soluções demonstradas, de forma a melhor entender as propriedades reológicas e mecânicas dos materiais sujeitos ao processo de impressão 3D.

4.9. Espuma de betão

Markin, V. et al. (2019) avaliaram o desempenho do “Foam Concrete” (FC – Espuma de Betão) na fabricação digital. Este betão consiste num material cimentício leve, produzido ao incorporar vazios de ar na argamassa. O FC pode ser desenvolvido para ter uma massa volúmica entre 200 e 1900kg/m³. Neste caso, os autores utilizaram cimento Portland tipo II (CEM II/A-M (S-LL) 52,5R), e cinzas volantes (classe H4) como elemento secundário do ligante. A dosagem de água (incluindo superplastificante, SP) foi de 77% da massa, e um agente espumante à base de proteínas foi utilizado para a produção da espuma.

A composição de cada argamassa pode ser observada no Quadro 4.7. Foram impressas paredes retas com um comprimento de 700mm, num processo de deposição de camadas sucessivas com um intervalo de 30s entre elas. Para estudar a capacidade de impressão da argamassa, imprimiram camadas até ao colapso da parede. Adicionalmente, foram impressas paredes com 3 camadas para serem usadas na preparação dos provetes para a realização dos ensaios mecânicos. Todas as paredes foram transferidas para uma câmara climática após 24h da sua impressão, e foram curadas à temperatura de 20° e com uma humidade relativa de 65%, durante 27 dias. Cubos foram extraídos com 40mm de aresta para os ensaios de compressão. A dimensão dos provetes para os testes de flexão variaram entre 30 e 33mm de largura, entre 50 e 56mm de altura, correspondendo às três camadas de impressão, e o comprimento dos provetes foi de 160mm. Os ensaios de flexão foram realizados à taxa de 0,5mm/min (Markin, V. et al., 2019).

Quadro 4.7 - Composição das argamassas (Adaptado de Markin, V. et al., 2019).

Mistura	Massa volúmica alvo (kg/m ³)	Razão (w/c)	FC (w/c)	Cimento (% do vol de FC)	Cinzas volantes (% do vol de FC)	Água (% do vol de FC)	SP (% de água do binder)	Espuma (% do vol de FC)
M-1	1100	0,37	0,33	0,18	0,12	0,23	0,25	0,46
M-2	1200	0,37	0,34	0,20	0,13	0,25	0,25	0,41
M-3	1580	0,37	0,36	0,27	0,18	0,34	0,25	0,21

Para o estudo da capacidade de construção das argamassas, foram realizados “slump-tests”, cujo resultados podem ser analisados no Quadro 4.8. Os autores afirmam que os resultados destes ensaios cumprem satisfatoriamente os requisitos para a impressão de betão. Nos ensaios de capacidade de impressão, as argamassas foram depositadas em camadas até ao colapso. A

mistura M-1 não foi testada, uma vez que foi depositada em camadas manualmente. As misturas M-2 e a M-3 atingiram 16 e 6 camadas, respectivamente. Como a mistura M-2 apresentou os melhores resultados nos ensaios anteriores, os ensaios mecânicos só foram realizados com os provetes impressos com esta argamassa e os seus resultados podem ser observados no Quadro 4.9. Enquanto o uso de nanoaditivos pode melhorar a performance mecânica da argamassa, deve-se ter sempre em mente que a resistência à compressão da espuma de betão está intrinsecamente ligada à sua massa volúmica (Markin, V. et al., 2019).

Quadro 4.8 - Resultados dos "slump-tests" (Adaptado de Markin, V. et al., 2019).

Mistura	Matrix			Espuma de betão		
	Diâmetro de expansão		Expansão relativa	Diâmetro de expansão		Expansão relativa
	Antes dos golpes (mm)	Depois dos golpes (mm)		Antes dos golpes (mm)	Depois dos golpes (mm)	
M-1	103	122	0,18	102	126	0,24
M-2	103	120	0,17	107	132	0,23
M-3	105	121	0,15	105	133	0,27

Quadro 4.9 - Resultados dos ensaios mecânicos na mistura M-2 (Adaptado de Markin, V. et al., 2019).

Composição	Cura (dias)	Resistência à flexão $f_{ctm,fl}$ (MPa)	Resistência à compressão f_{cm} (MPa)
M-2	7	1,94 ± 0,05	8,20 ± 1,01
	28	2,12 ± 0,30	10,40 ± 0,06

Estudos relativos à condutividade térmica foram conduzidos comparando os provetes da mistura M-2 com uma estrutura de betão tradicional impressa tridimensionalmente, designada de V-1. Os resultados apresentaram um valor de condutividade térmica do provete M-2 85% menor do que quando comparado com o betão de referência V-1, o qual, por sua vez, se compara com os resultados do betão tradicional (ver Quadro 4.10). Na verdade, está é a principal vantagem do FC.

Quadro 4.10 - Valores dos ensaios de condutividade térmica (Adaptado de Markin, V. et al., 2019).

Composição	Massa volúmica média (kg/m ³)	Valor médio de λ (W/mK)
M-2	980	0,24 ± 0,02
V-1	2100	1,68 ± 0,01
Betão tradicional	2240	1,70

Embora o estudo tenha sido realizado em laboratório, os autores acreditam na viabilidade desta solução à escala real, principalmente a capacidade de realizar isolamento térmico de paredes,

na própria obra, com a tecnologia 3D, nomeadamente quando existem necessidades especiais de isolamento (Markin, V. et al., 2019).

5. Técnicas de Impressão 3D

Este capítulo consiste na apresentação das técnicas de impressão 3D mais utilizadas atualmente e na exposição das obras realizadas em pequena ou grande escala com o auxílio desta nova tecnologia e como esta pode afetar de diversas maneiras áreas, até então, não relacionadas diretamente com a engenharia civil.

Lowke, D. et al. (2018) classificaram a impressão 3D como uma técnica automatizada em que o material, qualquer que este seja, é depositado em camadas. Na área da construção civil o processo de impressão consistia em três passos repetitivos: no 1º passo aplica-se uma camada de partículas secas; no 2º passo injeta-se um fluido, através de um bocal, para criação de adesão entre partículas, as necessárias; finalmente, removem-se as partículas que não foram sujeitas a adesão.

Dependendo dos materiais a serem utilizados neste processo, três técnicas diferentes de adesão poderiam ser aplicadas (ver Figura 5.1):

- Técnica Selective Binder (cement) Activation: A camada de partículas consiste numa mistura de um ligante (cimento) com agregados muito finos, tipicamente areia com diâmetro inferior a 1mm. O ligante é posteriormente ativado in-situ, pulverizando água ou uma solução aquosa nas partículas compactadas. Forma-se assim uma pasta de cimento matriz em volta das partículas dos agregados;
- Técnica Selective Paste Intrusion: As partículas de base consistem em partículas de agregados, tipicamente com um diâmetro médio inferior a 5mm, sem qualquer ligante. A pasta de ligante consiste em cimento, água e outras componentes que é aplicada à camada base de partículas através de bocais. A pasta de cimento deve preencher todos os vazios entre as partículas para produzir componentes com suficiente resistência;
- Técnica Binder Jetting: O ligante viscoso é aplicado na camada base de partículas de agregados. Trata-se de uma resina que reage com um componente de endurecimento na camada base.

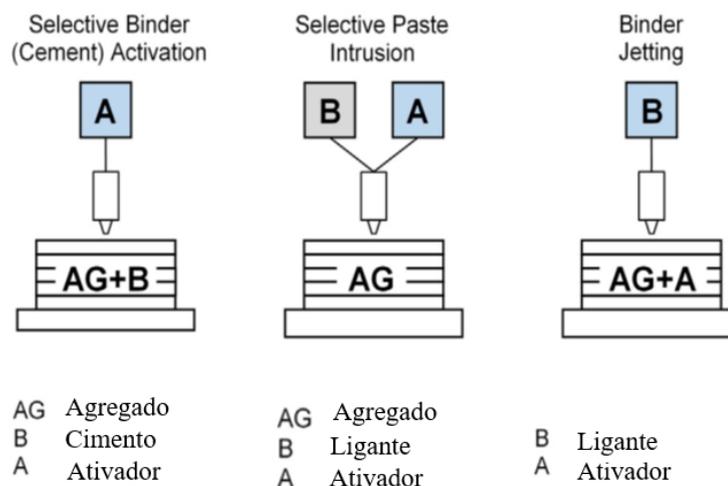


Figura 5.1 - Ilustração das três técnicas de deposição em impressão 3D (Ilustração: Lowke, D. et al., 2018).

Porém, as técnicas descritas anteriormente apresentam uma certa limitação em termos de dimensões. Embora sejam facilmente instaladas em ambiente laboratorial, no caso das habitações a instalação no local final da obra obrigou a resolver outras dificuldades. Assim, surgiu uma nova técnica patenteada pela empresa Contour Crafting que consiste num bocal de extrusão com modeladores para garantir a precisão da forma. Esta impressora é acoplada a uma grua ou pórtico, e o material, previamente misturado, é depositado em camadas. Todo o processo é controlado computacionalmente. Esta técnica constitui um novo marco na tecnologia de impressão 3D, sendo utilizada por quase todas as empresas que atuam nesta área.

5.1. D-Shape

O conceito D-Shape consiste numa metodologia de construção baseada numa impressora 3D. Recorrendo à técnica de Binder Jetting e utilizando também inúmeros conhecimentos da área digital, nomeadamente a robotização.

Como se materializa a peça 3D a construir? O processo consiste na construção camada a camada horizontal; com espessuras de cerca de 5mm. Cada camada inicia-se com o espalhamento do material granular, sobre a camada anterior, ou sobre a base, no caso da primeira camada. Em seguida existe a solidificação parcial de vários pontos dessa camada de areia. No final é necessário extrair todos os restantes pontos de areia não solidificados.

A impressora é constituída por uma estrutura metálica em treliça que envolve a peça a construir. Nesta estrutura existem duas partes fundamentais que funcionam por cima da peça a construir: uma lâmina que distribui uniformemente a areia da camada (a imprimir) e os bocais da impressora, que injetam o ligante (“Ink Binder”) que solidifica os pré-definidos pontos da areia

(ver Figura 5.2). O parelismo com as impressoras que conhecemos pode ser feito do seguinte modo: cada camada de areia corresponde à folha de papel, na qual serão impressos alguns pontos/áreas. Neste caso é a impressora que se move na impressão, e não a folha. Folha em cima de folha, no final é necessário retirar o papel não impresso.



Figura 5.2 - Impressora 3D modelo D-Shape na esquerda e a cabeça desta e seus bocais na direita (Foto: Lowke, D. et al., 2018).

A areia utilizada tem uma granulometria entre 0,1mm e 2mm, preferencialmente no intervalo 0,5-1,5mm. O ligante injetado pela impressora é constituído por uma mistura de resinas epóxi e poliuretanos não especificados (“cross linking polyurethane”). A sua viscosidade deve estar compreendida entre 3 e 10Poise⁸, preferencialmente no intervalo 6-8P. Esta viscosidade deve ser tal que permita que o ligante penetre totalmente na camada de areia e atinja o nível inferior. A este ligante pode adicionar-se fibras com diâmetros entre 0,1 até 4mm, teoricamente podendo chegar até 20mm (D-Shape, 2020).

A técnica D-Shape foi desenvolvida por Enrico Dini a partir de 2007. Na altura, a impressora 3D que utilizava a técnica de Binder Jetting para construção em larga escala, dispunha de uma área máxima de 6x6m² para produzir peças; a maior impressora na altura (ver Figura 5.2). Uma constante fonte de preocupação foi a necessidade de realizar o processo de impressão num recinto fechado, protegido das possíveis intempéries. Em 2008, uma casa foi construída em Buti na Itália. Durante um período de uma semana, foram aplicadas 400 camadas com espessuras de 5mm. Em 2016 esta mesma técnica foi utilizada para a construção de uma ponte pedonal em Madrid na Espanha, tendo-se neste caso utilizado o cimento Portland como ligante (ver Figura 5.3). No entanto, não são conhecidos mais desenvolvimentos nesta área. Mais do que as questões de arquitetura, ou financeiras, do ponto de vista da Engenharia Civil, seria

⁸ Poise P é unidade de medida da viscosidade dinâmica. 1P = 0,1Pa.s. A viscosidade da água a 25°C vale 0,0089P ao nível do mar.

interessante, conhecer as condições de segurança destas construções, quer em termos de estados limite últimos, quer de utilização. Relativamente a estes aspectos fundamentais, o seu autor Enrico Dini escreveu em 2018: “Deste modo, se a resistência do material permitir, é possível construir edifícios com qualquer formato.”



Figura 5.3 - Ponte pedonal em Madrid (a) e seus padrões (b-c), realizada pelo método D-Shape (Foto: Lowke, D. et al., 2018).

Atualmente, esta tecnologia tem diversas propostas na área aeroespacial e está sendo mais utilizada para a construção de recifes artificiais. A precisão que oferece nos formatos e a capacidade de criação de concavidades permitem a incorporação de características estéticas e técnicas nos módulos dos recifes. Aumentando, assim, a sua funcionalidade como costa artificial (ver Figura 5.4). O objetivo principal consiste na preservação do habitat local destruído pela intervenção humana. No entanto, também pode ser utilizado como barreiras anti-erosão na medida em que podem ser instaladas sobre areia ou sedimentos macios. Por isso, esta técnica ajuda à criação de encostas submersas mais íngremes ou revestimentos de paredes verticais (D-Shape, 2020).

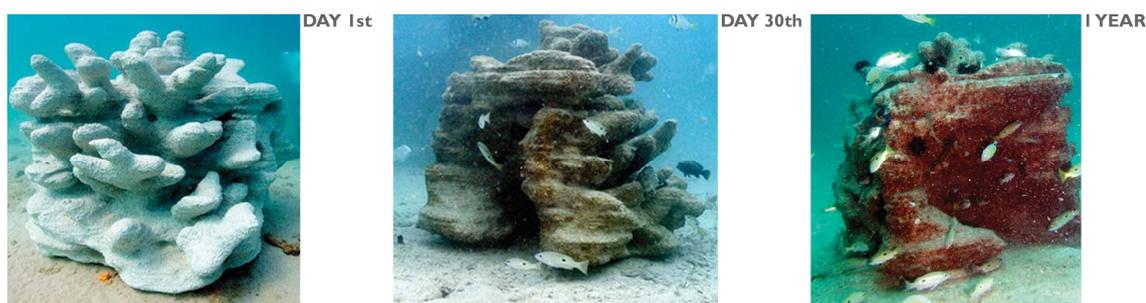


Figura 5.4 – Adaptação dos recifes artificiais ao longo do tempo (Foto: D-Shape, 2020).

5.2. Contour Crafting

Contour Crafting (CC) é uma tecnologia alternativa de impressão 3D que recorre a computadores para eventualmente controlar a formação das superfícies. Através do uso de espátulas, colocadas no bocal de extrusão, e controladas computacionalmente, permitem

dispensar a necessidade de cofragens que dão a forma às superfícies, eventualmente curvas. Quando comparado com outros métodos de fabricação em camadas, as vantagens do Contour Crafting, indicadas pelo fabricante do processo, consistem na superior qualidade da superfície a construir, na maior velocidade de construção e num maior leque de materiais passíveis de serem utilizados. A característica marcante do Contour Crafting consiste no uso de espátulas, em geral duas, não necessariamente planas, com o objetivo de moldar as duas superfícies laterais ao jato. O resultado pode ser superfícies excepcionalmente perfeitas (lisas e bem-posicionadas) (ver Figura 5.5 e Figura 5.6). Para além disso, a impressora da tecnologia Contour Crafting utiliza um método híbrido em que combina o processo de extrusão para formar as superfícies dos objetos com um processo de preenchimento do núcleo entre superfícies (Khoshnevis, B., 2004).

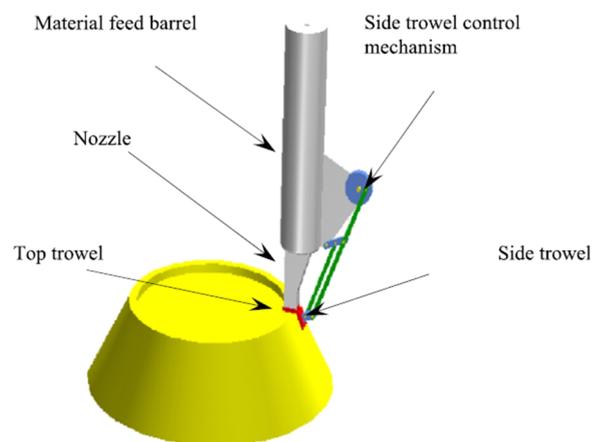


Figura 5.5 - Processo de Contour Crafting (Ilustração: Khoshnevis, B., 2004).

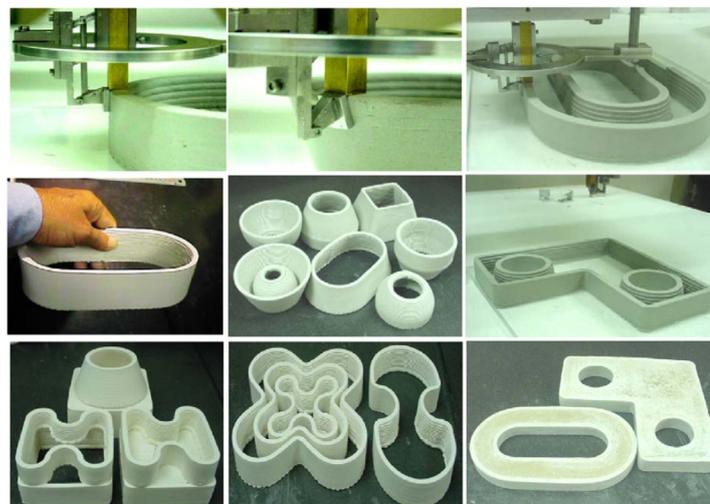


Figura 5.6 – Contour Crafting: exemplos de formas construídas (Foto: Khoshnevis, B., 2004).

No caso de construções de habitações, a aplicação do Contour Crafting consiste na colocação da impressora numa grua rolante, tal como é exemplificado na Figura 5.7, que conduz os bocais até qualquer ponto da construção. De acordo com os autores, uma única casa, ou um conjunto delas, todas iguais, ou cada uma com design próprio, podem ser construídas em simultâneo de forma automática (Khoshnevis, B., 2004).

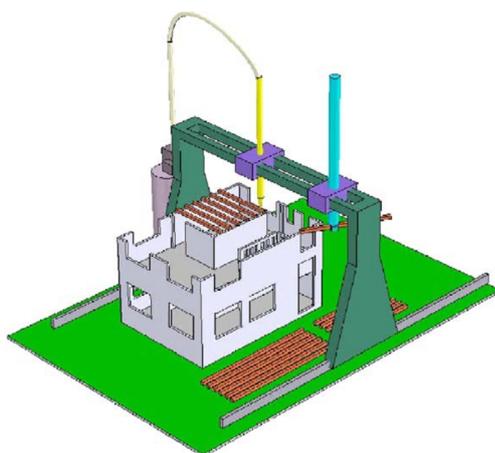


Figura 5.7 - Processo de construção in-situ utilizando Contour Crafting (Ilustração: Khoshnevis, B., 2004).

Devido à sua capacidade de utilizar diferentes materiais, o processo de Contour Crafting está a ser considerado para ser usado na construção de bases lunares, ou até mesmo em Marte, utilizando o próprio solo como material granular (Contour Crafting Corporation, 2017). Isto se deve ao grande potencial de utilização destes dois planetas como fazendas de energia solar, ou até mesmo para a ocupação humana, caso a Terra se torne inviável (Khoshnevis, B., 2004). De acordo com o indicado pelos autores, a Contour Crafting Corporation tem vindo a estudar aprofundadamente a construção de habitats, laboratórios e estruturas, considerando os diferentes ambientes (lunar ou marciano). Um protótipo já foi inclusive construído em laboratório (ver Figura 5.8) (Contour Crafting Corporation, 2017).



Figura 5.8 - Protótipo de um habitat lunar construído em laboratório (Foto: Contour Crafting Corporation, 2017).

Tendo em conta a sua alta velocidade e o baixo custo de construção, a tecnologia do Contour Crafting pretende ser utilizada na construção de projetos habitacionais de baixo-custo, principalmente em países subdesenvolvidos (Contour Crafting Corporation, 2017). Um exemplo disso é uma vila com 50 casas, impressas em 3D, utilizando a tecnologia do CC na cidade de Tabasco no México. Direcionada a famílias em condições de pobreza extrema e habitação precária, este projeto foi realizado em parceria com as empresas ICON, New Story e ÉCHALE. As famílias deverão pagar pelas casas uma hipoteca sem juros, 19€ por mês durante 7 anos, resultando num total de 1596€ por casa. Cada casa (ver Figura 5.9) tem aproximadamente 46,5m² e possuem dois quartos, uma sala, uma cozinha e uma casa de banho. O design interior podia ter sido alterado de acordo com os pedidos específicos de cada família. Por se encontrar em uma região de alta atividade sísmica, os autores referem que as suas fundações foram construídas tendo em conta os padrões legislativos e normativos do país, para que possam durar gerações. Contudo, não foi possível aceder a tais verificações. A impressora usada foi a Vulcan II, feita pela empresa ICON, que pode construir até cinco casas em simultâneo num período de 24h (ICON, 2018).



Figura 5.9 - Casas impressas em 3D, utilizando o Contour Crafting, em Tabasco no México (Foto: ICON, 2018).

Uma outra experiência, baseado no mesmo conceito de construção está sendo realizado na cidade de Austin, Texas, nos EUA. A empresa ICON está construindo seis pequenas casas para moradores de rua (ver Figura 5.10). No local, a impressora construiu três casas em simultâneo

(ver Figura 5.11), com paredes de altura até 2,6m. Todas as paredes foram completadas num período de 24h (ver Figura 5.12). É somente necessário o trabalho manual para a colocação posterior das portas, janelas e do telhado (Peters, A., 2020).



Figura 5.10 - Casas impressas em 3D utilizando a tecnologia do Contour Crafting em Austin nos EUA (Foto: ICON, 2018).



Figura 5.11 - Impressora 3D construindo as casas em Austin (Foto: ICON, 2018).



Figura 5.12 - Processo de construção com a impressora 3D em Austin (Foto: ICON, 2018).

5.3. Winsun 3D Printing

Winsun Decoration Design Engineering Co. é uma empresa chinesa sediada em Shangai. Recentemente passou a liderar o mercado de impressão 3D com a sua técnica que permite construir edifícios de até 6 andares. O processo de deposição das camadas é relativamente parecido com o do Contour Crafting, excepto na possibilidade de usar as pás modeladoras no bocal. Porém, de acordo com os autores, a reduzida dimensão do bocal é suficiente para garantir uma adequada exatidão na forma (ver Figura 5.13). Ao integrarem o processo construtivo com os elementos construtivos, os espaços para o isolamento, canalizações e cabos estão reservados e garantidos desde o início da impressão (Winsun D. D. E. Co., 2003).



Figura 5.13 - Bocal da Winsun 3D Printing (Foto: Winsun D. D. E. Co., 2003).

A técnica da Winsun 3D Printing consiste na pré-fabricação em laboratório das paredes e das fundações para posterior instalação. No local faz-se uso de uma das maiores impressoras 3D já construídas para a realização da fachada exterior e do design do interior seguindo o planeamento indicado na Figura 5.14. Na construção, são utilizados materiais inovadores criados pela própria empresa: placa de gesso reforçada com fibra de vidro, GRG; cimento reforçado com fibra de vidro, SRC; compósito de fibra de vidro, FRP; “pedra mágica” impressa tridimensionalmente. Esta “pedra mágica” é um material impresso recorrendo a cimento reforçado com fibra de vidro que aparenta ser uma pedra natural. É utilizado como painel decorativo, podendo ser aplicado em paredes externas e internas, como também, no piso ou no teto: trata-se de uma opção mais ecológica (sustentável) relativamente à extração do mineral da natureza (Winsun D. D. E. Co., 2003).

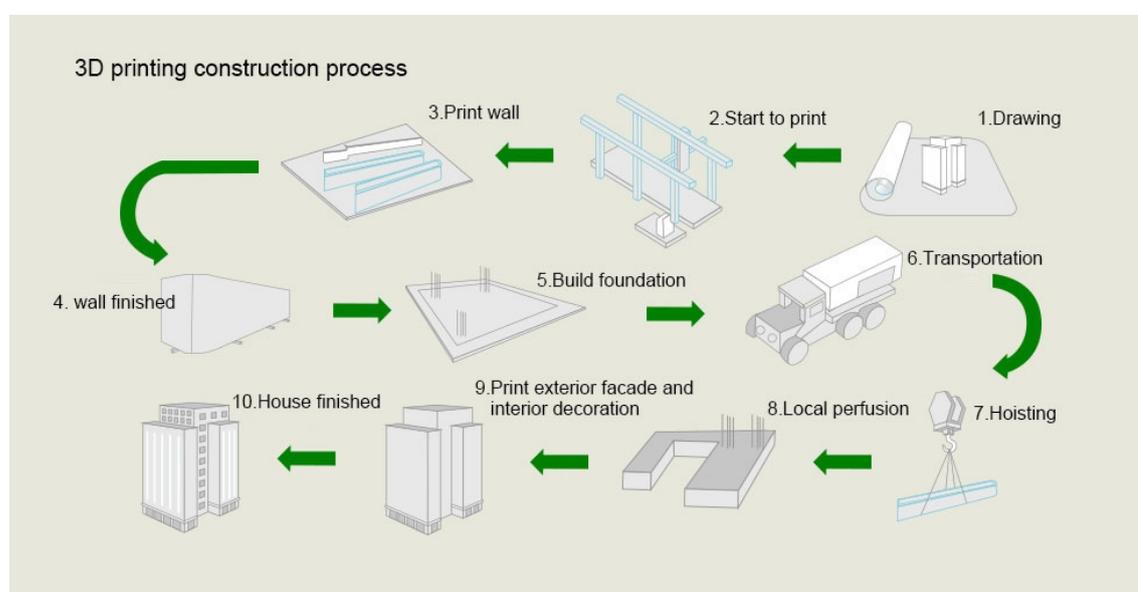


Figura 5.14 - Processo de construção utilizando o Winsun 3D Printing (Ilustração: Winsun D. D. E. Co., 2003).

Este método foi utilizado na construção de um edifício de 6 andares na Província de Jiangsu, na China, com uma estrutura de 5 pisos e 1100m² em cada piso, aproximadamente. Com uma máquina de 6,1m de altura, 10,1m de largura e 40,25m de comprimento, para impressão em laboratório dos diversos componentes estruturais, e utilizando materiais reciclados a partir de desperdícios de construções, como cimento, fibra de vidro e areia, construiu-se uma estrutura flexível e resistente aos sismos (ver Figura 5.15). As paredes interiores e exteriores foram impressas in-situ recorrendo à solução de cofragens impressas. Eram paredes ocas para a posterior instalação do reforço estrutural tradicional e outras componentes, tais como o isolamento, as canalizações e os cabos. Com esta técnica, de acordo com a empresa, foi possível economizar cerca de 60% do material que normalmente é necessário para uma construção deste tipo e utilizaram somente 30% do tempo necessário. No total, foi poupado 80% da mão-de-

obra, significando uma construção mais acessível e com menor risco de acidentes para os trabalhadores (Sevenson, B., 2015).



Figura 5.15 - Edifício impresso com a Winsun 3D Printing (Foto: Sevenson, B., 2015).

A impressão 3D pode não ser apenas utilizada na construção de habitações. Também pode permitir a possibilidade de oferecer uma perspectiva mais precisa e detalhada de uma grande obra da engenharia; o sonho dos arquitetos. Por exemplo, a tecnologia desenvolvida para a Winsun 3D Printing foi utilizada na construção do Phoenix International Media Center em Beijing, na China (ver Figura 5.16). Devido à complexidade da sua arquitetura, foi necessário recorrer a software especializado para a impressão 3D, nomeadamente para posicionar com precisão a geometria e a superfície externa. Nesta superfície foram utilizados 3800 painéis de vidro, cada um com dimensões e geometria diferentes (Giovannini, J., 2014).



Figura 5.16 - Phoenix International Media Center em Beijing, China (Foto: Fu Xing).

6. Sustentabilidade

Uma das definições mais populares de sustentabilidade foi dada pela Brundtland Commission (1987): “ Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de futuras gerações atenderem às suas próprias necessidades” (Chen, D. et al., 2015).

O impacto do uso de impressoras 3D, juntamente com novas abordagens na ciência do material betão, pode ser imenso no requisito da sustentabilidade. Devido ao uso de computadores e todo o processo ser automatizado e otimizado, a necessidade de material pode ser drasticamente reduzida, em até 70%. Na construção tradicional, o impacto ambiental, somente nos países desenvolvidos, está avaliado em cerca de 40% do consumo global de energia, 38% das emissões de gases poluentes, 12% de uso da água potável disponível e 40% da produção de lixo sólido. Adicionalmente, a produção do cimento colabora com 5 a 7% de todas as emissões de carbono. Assim, a redução do uso de materiais não só tem um grande impacto económico, como também um alto impacto ambiental (Lowke, D. et al., 2018).

Existem inúmeras vantagens para o desenvolvimento da tecnologia 3D, como a demonstrada acima, acerca da redução do impacto ambiental. No entanto, sustentabilidade não é somente sobre o meio ambiente. A construção 3D poderá reduzir significativamente o número de lesões e fatalidades no estaleiro. A impressora realizará a maior parte dos trabalhos de alto risco, para além de reduzir o número de trabalhadores na obra. Algumas impressoras somente necessitam de 3 operadores durante todo o processo de construção (Sakin, M. e Kiroglu, Y. G., 2018).

A Norma Internacional ISO 15686 (ISO 2000) define como vida útil de uma construção o período de tempo após a sua instalação em que os seus elementos possuem e mantêm os requisitos mínimos de performance. Porém, diversos parâmetros podem afetar esse período e esses requisitos, podendo ser intrínsecos à sua performance física, ou a fatores subjetivos, ou económicos. Um estudo realizado por Agustí-Juan, I. et al. (2019), mostra as consequências do tempo de vida útil na sustentabilidade de um edifício produzido digitalmente, e compara-o com o de um edifício construído de maneira tradicional. Para essa avaliação, comparou-se 1m² de um edifício impresso em 3D com 1m² de um edifício tradicional, ambos com a mesma funcionalidade e desempenho estrutural. Neste caso, uma laje impressa através do método de Binder Jetting, CSC Slab, com uma laje de betão armado convencional com um teto falso. As

funções acústicas e de acabamento que foram hibridizados⁹ na laje impressa são representadas pelo teto falso. O tempo de vida útil considerado no estudo foi de 60 anos para o CSC Slab e para a laje convencional, e de 30 anos para o teto falso. Após esse período consideraram-se três alternativas de descarte das lajes: aterro sanitário; reciclagem com 0% de uso de material reciclado na construção das lajes; e reciclagem com 100% de uso de material reciclado na construção das lajes.

Com base nos dados de fabricação, pode avaliar-se os impactos da produção do CSC Slab e de uma laje convencional. Observa-se que o CSC Slab tem um menor impacto no potencial de aquecimento global (GWP) (ver Figura 6.1), ou seja, na produção de CO₂, quando comparado com a laje convencional. Isto pode ser atribuído principalmente à otimização do processo, o que reduz consideravelmente o seu impacto ambiental quando comparado com um processo convencional. Adicionalmente, a hibridização do acabamento e das funções acústicas na própria estrutura evitam a necessidade de um teto falso adicional para fornecer as mesmas funções, fazendo com que a presente comparação demonstre que a multifuncionalidade de um elemento traz benefícios ambientais significativos durante a sua produção (Agustí-Juan, I. et al., 2019).

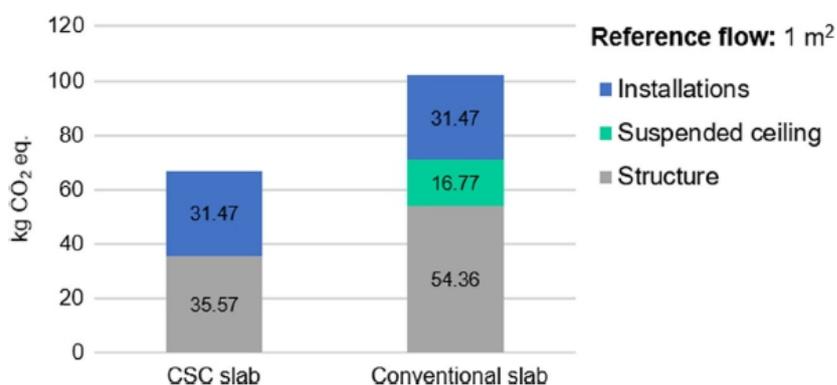


Figura 6.1 - GWP da produção da CSC Slab e da laje convencional (Gráfico: Agustí-Juan, I. et al., 2019).

Porém, ao estudar o impacto que o tempo de vida útil de cada elemento tem na sua sustentabilidade, o ponto de vista altera-se. Assumindo que o CSC Slab tem um tempo de vida útil de 60 anos, este é responsável pela produção de 67kg de CO₂, valor consideravelmente inferior ao da laje convencional, 182kg de CO₂. No entanto, a integração das instalações (redes) na própria estrutura podem reduzir esse intervalo de tempo até os 20 anos e como resultado, esse elemento passa a ser responsável por 18,8kg de CO₂ a mais que a laje tradicional (ver Figura 6.2). Logo, observa-se que a otimização estrutural e a hibridização das suas funções no

⁹ Hibridização é o processo de integrar diferentes elementos estruturais com diferentes funcionalidades num único elemento

CSC Slab não são o suficiente para compensar o potencial aumento do seu impacto ambiental devido ao seu design integrado (Agustí-Juan, I. et al., 2019).

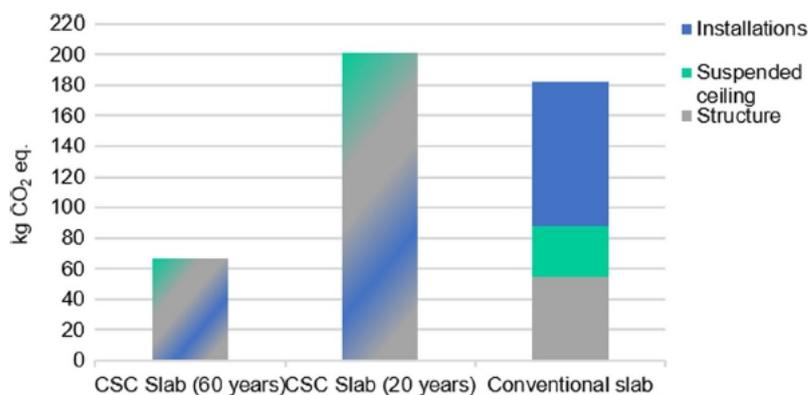


Figura 6.2 - GWP considerando o tempo de vida útil do CSC Slab e da laje convencional (Gráfico: Agustí-Juan, I. et al., 2019).

Analisando os processos de fim de vida do CSC Slab, conclui-se que a sua reciclagem pode aumentar consideravelmente os impactos ambientais quando comparado com o simples depósito em aterro sanitário, devido, principalmente, ao uso de sílica no processo de construção. Para este estudo, utilizaram-se duas abordagens de reciclagem: o cut-off, que considera os encargos da produção dos materiais, e também da construção, da demolição e da eliminação final no impacto total deste elemento; e a abordagem EoL, onde o impacto total inclui os benefícios do sistema de reciclagem. Entre cenários e abordagens de reciclagem, chegou-se à conclusão de que o uso de areia de sílica reciclada produz maiores impactos nos valores do GWP e do Método de Escassez Ecológica 2013 (UBP), que foca na avaliação de emissões de poluentes produzidos no processo de fim de vida de um material, do que quando utilizado sílica virgem (ver Figura 6.3) (Agustí-Juan, I. et al., 2019).

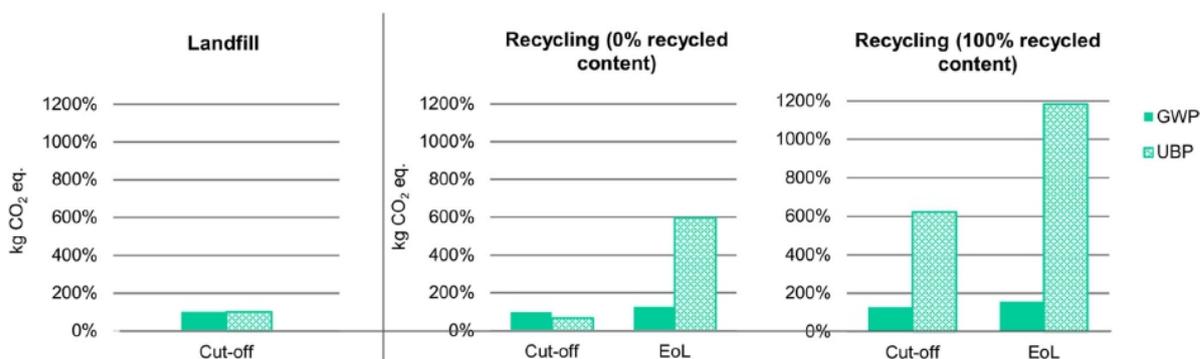


Figura 6.3 - Impactos dos processos de fim de vida do CSC Slab (Gráfico: Agustí-Juan, I. et al., 2019).

A avaliação deste caso pode demonstrar que a partir da possível multifuncionalidade através de técnicas de fabricação digital pode resultar um processo de construção caracterizado pela eficiência no uso de materiais, resultando em importantes benefícios ambientais para a produção. No entanto, observou-se que os impactos ambientais dos elementos de um edifício multifuncional aumentam consideravelmente se o seu tempo de vida útil/tempo de serviço for reduzido devido, por exemplo, à necessidade de reformas ou a substituições de elementos hibridizados. Portanto, elementos que se integram nesta categoria devem, segundo os autores, apresentar um tempo de vida útil de no mínimo 30 anos para que os benefícios ambientais se igualem ao de uma construção convencional (Agustí-Juan, I. et al., 2019).

Os resultados apontaram que a reciclagem de estruturas híbridas, como o CSC Slab, aumenta substancialmente as emissões ambientais, realçando a importância de decisões de design que evitem uma baixa performance ambiental de elementos de edifícios multifuncionais. Os impactos de fim de vida devem ser especialmente levados em consideração durante o design da estrutura. Por exemplo, recorrendo a estratégias de otimização dos materiais e da sua desmontagem. Simultaneamente, o uso de materiais híbridos na construção requer o desenvolvimento de materiais e sistemas alternativos, como os ligantes inorgânicos. A impressão 3D com geopolímeros evita a necessidade de uma reciclagem térmica (com impacto enorme) para a decomposição dos furanos/fenólicos, e consequente liberação dos seus poluentes tóxicos. Essa redução de contaminantes é especialmente relevante para o cumprimento das normas de qualidade do ar impostas (Agustí-Juan, I. et al., 2019).

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

A tecnologia de impressão 3D para a construção civil está ainda a ser desenvolvida, mas já oferece resultados reais em obras de pequeno porte, com custos mais reduzidos e qualidade equivalentes à de uma obra convencional. Atualmente, estas construções são mais utilizadas como opção para casas e abrigos destinados a pessoas de poucos recursos ou que se encontram desalojadas devido a alguma emergência.

Dos estudos pesquisados para esta dissertação, apenas 3 se mostraram de maior impacto para um uso em grande escala. Um deles, o da adição de nano argila ao betão permite atingir valores de resistência à compressão de 30-33MPa (Panda, B. et al., 2019). Salientam-se também os casos da aplicação da Teoria de Fuller Thompson e do Modelo de Marson-Percy, que apresentaram valores adequados de resistência à compressão (~50MPa) e características tixotrópicas e reológicas adequadas à impressão 3D (Weng, Y. et al., 2018^a). Por fim, refira-se o estudo do uso de compósitos à base de cimento com endurecimento por deformação que apresentou uma trabalhabilidade satisfatória para o processo de impressão 3D. No entanto, não foram realizados ensaios de compressão nos provetes impressos, debilitando as conclusões a serem feitas relativamente à utilização desta solução (Ogura, H. et al., 2018). Os restantes estudos, talvez por estarem numa fase muito embrionária, não apresentam valores das propriedades mecânicas, tixotrópicas e reológicas a considerar para a Construção Civil. Notaram-se, principalmente, algumas dificuldades ao nível do módulo de elasticidade. Em quase todos os casos em que foi apresentado, ou passível de ser calculado, os valores (<6MPa) são muito inferiores ao necessário.

Em relação às técnicas de impressão 3D, as de aplicação de um ligante numa camada base (de pó ou de material granular), Selective Binder Activation, Selective Paste Intrusion e Binder Jetting, não são muito utilizadas na construção civil, sendo uma opção somente na produção de peças de pequeno porte, em geral, num ambiente abrigado. Uma das dificuldades diz respeito à necessidade de que a camada base seja redistribuída a cada aplicação do ligante e que a base onde a impressora se apoia seja móvel, para que a distância entre o bocal de extrusão e a camada base seja sempre constante. Para além disso, no final do processo de impressão, o pó, ou o material granular, da camada base não impressa deve ser completamente separada da estrutura impressa e descartado. A técnica de impressão, D-Shape caiu em desuso exatamente por este motivo, passando a redirecionar o seu foco na impressão de objetos de pequeno porte.

A verdadeira revolução nessa área chegou com Khoshnevis, o criador da técnica Contour Crafting, que passou a ser a base para todas as outras empresas interessadas nesse ramo, já que não necessita de uma base móvel e o requisito da altura deixou de ser um problema da

impressora; mas os materiais continuaram a ser um problema. Ao transformar a impressora 3D em, basicamente, um bocal de extrusão ligado a uma bomba e a um pórtico ou guindaste, abriu-se um novo leque de possibilidades. A empresa Winsun Co. ganhou destaque ao imprimir o primeiro edifício de 6 andares, onde a altura foi resolvida através da impressão de sistemas de cofragens permanentes em betão, recorrendo a uma impressora 3D que utilizou da mesma técnica da Contour Crafting, e posterior colocação manual das armaduras tradicionais. Com base nesta técnica, já se construíram diversas habitações, como por exemplo, uma casa luxo de 1100m², um edifício governamental no Dubai e outros edifícios de menor porte (Winsun D. D. E. Co., 2003).

Também já foi demonstrada a sustentabilidade de construções impressas tridimensionalmente, além da economia inicial em material e em tempo. A longo prazo, demonstrou-se que uma obra feita com base nesta tecnologia, se possuir um tempo de vida útil suficientemente longo, e levando em consideração os materiais a serem utilizados, pode até superar uma construção convencional em termos de sustentabilidade e apresentar quantidades de gases poluentes no seu processo de reciclagem significativamente inferiores.

No curto prazo, seria interessante estudar com mais profundidade as verdadeiras economias em materiais, em aluguer de máquinas e em mão-de-obra de uma construção impressa tridimensionalmente em relação à construção convencional. E, principalmente, para que a impressão 3D seja considerada uma opção para a população em geral, a sua tecnologia deve ser aperfeiçoada de modo a ultrapassar o requisito da altura de maneira mais prática do que a atual. Mas, fundamentalmente, também deve ocorrer a sua integração nas normas regulamentares aplicáveis à construção em geral de modo a oferecer segurança tanto aos construtores como aos compradores, e deixar de ser vista como uma tecnologia experimental.

Atualmente, já existem estudos para a impressão 3D da armadura, sendo estes realizados maioritariamente pela Universidade Técnica de Dresden na Alemanha, na qual as barras de aço impressas tridimensionalmente apresentaram valores de tensão de cedência e de resistência à tração até 20% inferiores, quando comparadas com o aço para reforço estrutural convencional, tendo como objetivo principal a impressão das armaduras em simultâneo com a impressão do betão/argamassa (De Schutter, G. et al., 2018).

Com esta possibilidade, pode sonhar-se com uma quase infinidade de alternativas. Por exemplo, é possível reduzir (ainda mais) os desperdícios na construção dos elementos estruturais; imagine-se por exemplo os desperdícios de armaduras. Mas, muitas outras alternativas podem ser imaginadas: por exemplo, no caso de vigas de secção transversal constante, necessária por imposições construtivas, é possível criar vigas de secção variáveis, cumprindo somente os requisitos mínimos regulamentares. Também neste caso, se obtém uma otimização do uso do

material. Outro exemplo, pode ser imaginado ao nível dos reforços estruturais, que num processo de impressão 3D também podem apresentar diâmetros variáveis, secções com diferentes formatos, com variações de direção, com variações das tensões resistentes, etc.

Referências Bibliográficas

Agustí-Juan, I., Jipa, A., Habert, G. (2019). “Environmental assessment of multi-functional building elements constructed with digital fabrication techniques”. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 24, pp. 1027-1039.

Agustí-Juan, I., Müller, F., Hack, N., Wangler, T., Habert, G. (2017). “Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 154, pp. 330-340.

Arunothayan, R., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S. H., Sanjayan, J. (2020). “Development of a 3D-Printable Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete for Digital Construction”. *Construction and Building Materials*, Vol. 257.

Asprone, D., Menna, C., Bos, F. P., Salet, T. A. M., Mata-Falcón, J., Kaufmann, W. (2018). “Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 111-121.

Bock, T. (2015). “The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics”. *Automation in Construction*, Vol. 59, pp. 113-121.

Bos, F. P., Bosco, E., Salet, T. A. M. (2019). “Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers”. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 14, Issue 2, pp. 160-174.

Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., Salet, T. (2016). “Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing”. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11, Issue 3, pp. 209-225.

BS EN 196-1:2016, “Tracked Changes. Methods of testing cement. Determination of strength.” BSI Standards Publication.

Buchli, J., Giftthaler, M., Kumar, N., Lussi, M., Sandy, T., Dörfler, K., Hack, N. (2018). “Digital in situ fabrication – Challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction, and beyond”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 66-75.

Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., Dirrenberger, J. (2018). “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 37-49.

Carneau, P., Mesnil, R., Roussel, N., Baverel, O. (2020). “Additive manufacturing of cantilever – from masonry to concrete 3D printing”. *Automation in Construction*, Vol. 116, pp. 103184.

Carolina. (2021). “Impressão offset e digital: conheça as diferenças”. <https://blog.360imprimir.com.br/impressao-offset-e-digital-conheca-as-diferencas/> . (Acedido em 12/05/2021).

Cerdas, F., Juraschek, M., Thiede, S., Herrmann, C. (2017). “Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System”. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21, Issue 1, pp. 80-93.

Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., Pambaguian, L. (2014). “Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology”. *Acta Astronautica*, Vol. 93, pp. 430-450.

Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J. G., Thiede, S. (2015). “Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 107, pp. 615-625.

Coblentz, R. M. (2019). “3D Printed Affordable Housing in Albuquerque”. Tese de Mestrado em Arquitetura na University of Cincinnati.

Contour Crafting Corporation (2017). <http://contourcrafting.com/> (Acedido em 11/05/2021). Los Angeles – EUA.

De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., Agustí-Juan, I. (2018). “Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 25-36.

De Soto, B. G., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G., Adey, B. T. (2018). “Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall”. *Automation in Construction*, Vol. 92, pp. 297-311.

Digital Grotesque. (2021). <http://digital-grotesque.com/> . (Acedido em 22/05/2021).

Dressler, I., Freund, N., Lowke, D. (2020). “The Effect of Accelerator Dosage on Fresh Concrete Properties and on Interlayer Strength in Shotcrete 3D Printing”. *Materials*, Vol.13, pp. 374-393.

D-Shape (2020). <https://d-shape.com/our-technology/> (<https://d-shape.com/>) (Acedido em 11/05/2021). Buti – Itália.

Frey, C. B. e Osborne, M. A. (2017). “The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?”. *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 114, pp. 254-280.

Gibbons, C. J., Williams, R., Purnell, P., Farahi, E. (2010). “3D Printing of cement composites”. *Advances in Applied Ceramics*, Vol. 109, Issue 5, pp. 287-290.

Giovannini, J. (2014). “Phoenix International Media Center, Designed by BIAD”. https://www.architectmagazine.com/design/buildings/phoenix-international-media-center-designed-by-biad_o (Acedido em 11/05/2021).

Gosselin, C., Duballet, R., Roux, Ph., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., Morel, Ph. (2016). “Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders”. *Materials and Design*, Vol. 100, pp. 102-109.

Graser, K., Wang, Y., Hoffman, M., Bonanomi, M. M., Kohler, M., Hall, D. M. (2019). “Social Network Analysis of DFAB House: a Demonstrator of Digital Fabrication in Construction”. 17th Annual Engineering Project Organization Conference.

Hack, N., Wangler, T., Mata-Falcón, J., Dörfler, K., Kumar, N., Walzer, A. N., Graser, K., Reiter, L., Richner, H., Buchli, J., Kaufmann, W., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M. (2017). “Mesh mould: An on site, robotically fabricated, functional formwork”. Conference Paper, n° 19, National Centre for Competence in Research in Digital Fabrication in Architecture from the Swiss National Science Foundation.

Harford, T. (2021). “Por que a invenção da imprensa por Gutenberg o levou à ruína”. <https://www.bbc.com/portuguese/geral-54800478> . (Acedido em 12/05/2021).

ICON (2018). <https://www.iconbuild.com/> (Acedido em 11/05/2021). Austin – EUA.

Khoshnevis, B. (2004). “Automated construction by contour crafting — related robotics and information technologies”. *Automation in Construction*, Vol. 13, pp. 5-19.

Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb A. G. F., Thorpe, T. (2012). “Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete”. *Materials and Structures*, Vol. 45, pp. 1221-1232.

-
- Leandro. (2018). “Evolução das impressoras: o que mudou?”. <https://originaltoner.com.br/evolucao-das-impressoras/>. (Acedido em 12/05/2021).
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., Thorpe, T. (2012). “Developments in construction-scale additive manufacturing processes”. *Automation in Construction*, Vol. 21, pp. 262-268.
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., Dillenburger, B. (2018). “Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 50-65.
- Lu, B., Qian, Y., Li, M., Weng, Y., Leong, K. F., Tan, M. J., Qian, S. (2019). “Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent”. *Construction and Building Materials*, Vol. 211, pp. 1073-1084.
- Maçã, C. (2021). “História da Impressão Gráfica: Da Origem aos Dias de Hoje”. <https://blog.360imprimir.com.br/historia-da-impressao-grafica/>. (Acedido em 12/05/2021).
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N. E., Hamzeh, F. (2015). “3D Concrete Printing: Machine and Mix Design”. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol. 6, Issue 6, pp. 14-22.
- Marchon, D., Kawashima, S., Bessaies-Bey, H., Mantellato, S., Ng, S. (2018). “Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 96-110.
- Markin, V., Nerella, V. N., Schröfl, C., Guseynova, G., Mechtcherine, V. (2019). “Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication”. *Materials*, Vol. 12, pp. 2433-2453.
- Mechtcherine, V., Grafe, J., Nerella, V. N., Spaniol, E., Hertel, M., Füssel, U. (2018). “3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour”. *Construction and Building Materials*, Vol. 179, pp. 125-137.
- Nerella, V. N., Hempel, S., Mechtcherine, V. (2019). “Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing”. *Construction and Building Materials*, Vol. 205, pp. 586-601.
-

Nerella, V. N., Näther, M., Iqbal, A., Butler, M., Mechtcherine, V. (2019). “Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction”. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 95, pp. 260-270.

NP EN 1990 2009. “Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas”. Instituto Português de Qualidade.

NP EN 1991-1-1 2009. “Eurocódigo 1 – Acções em estruturas. Parte 1-1: Acções gerais. Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios”. Instituto Português de Qualidade.

NP EN 1992-1-1 2010. “Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”. Instituto Português de Qualidade.

Ogura, H., Nerella, V. N., Mechtcherine, V. (2018). “Developing and Testing of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) in the Context of 3D-Printing”. *Materials*, Vol. 11, pp. 1375-1393.

Olsson, N. O. E., Shafqat, A., Arica, E., Økland, A. (2018). “3D-Printing Technology in Construction: Results from a Survey”. *Emerald Reach Proceedings Series*, Vol. 2. pp. 349-356.

Pacievitch, Y. (2010). “Impressora”. <https://www.infoescola.com/informatica/impressora/> . (Acedido em 12/05/2021).

Padilha, V. Z. (2020). “Avaliação das propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D”. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina – Brasil, 1 vol..

Panda, B., Paul, C. S., Tan, M. J. (2017). “Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material”. *Materials Letters*, Vol. 209, pp. 146-149.

Panda, B., Ruan, S., Unluer, C., Tan, M. J. (2019). “Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay”. *Composites Part B*, Vol. 165, pp. 75-83.

Panda, B., Unluer, C., Tan, M. J. (2018). “Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing”. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 94, pp. 307-314.

Pegna, J. (1995). “Application of Cementitious Bulk Materials to Site Processed Solid Freeform Construction”. *1995 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 39-45.

Pegna, J. (1997). “Exploratory investigation of solid freeform construction”. *Automation in Construction*, Vol. 5, pp. 427-437.

Peters, A. (2020). “This village for the homeless just got a new addition: 3D-printed houses”. <https://www.fastcompany.com/90469488/this-village-for-the-homeless-just-got-a-new-addition-3d-printed-houses> . (Acedido em 11/05/2021).

Rael San Fratello. (2021). <https://www.rael-sanfratello.com/> . (Acedido em 22/05/2021).

Rodrigues, R. (2014). “O que é o Contour Crafting?”. <https://engiobra.com/o-que-e-o-contour-crafting/> . (Acedido em 11/05/2021).

Sakin, M. e Kiroglu, Y. C. (2017). “3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM”. *Energy Procedia*, Vol. 134, pp. 702-711.

Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., Marchment, T. (2018). “Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 172, pp. 468-475.

Sevenson, B. (2015). “Shangai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home”. <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/> . (Acedido em 11/05/2021).

Shakir, Q. M. (2019). “3D-printing of Houses”. A presentation. University of Kufa, Faculty of Engineering, Civil Department.

Shakor, P., Sanjayan, J., Nazari, A., Nejadi, S. (2017). “Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing”. *Construction and Building Materials*, Vol. 138, pp. 398-409.

Subrin, K., Bressac, T., Garnier, S., Ambiehl, A., Paquet, E., Furet, B. (2018). “Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing”. *IFAC – International Federation of Automatic Control*, Vol. 51, Issue 11, pp. 716-721.

Van Damme, H. (2018). “Concrete material science: Past, present, and future innovations”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 5-24.

Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., Flatt, R. (2016). “Digital Concrete: Opportunities and Challenges”. *RILEM Technical Letter*, Vol. 1, pp. 67-75.

Weger, D., Lowke, D., Gehlen, C. (2016). “3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste”. Conference Paper. Centre for Building Materials, Technical University of Munich, Germany.

Weger, D., Lowke, D., Gehlen, C., Talke, D., Henke, K. (2018). “Additive Manufacturing of Concrete Elements Using Selective Cement Paste Intrusion – Effect of Layer Orientation on Strength and Durability”. 1st International Conference on Concrete and Digital Fabrication/Digital Concrete 2018 – Zurich, Switzerland.

Weng, Y., Li, M., Tan, M. J., Qian, S. (2018a). “Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model”. Construction and Building Materials, Vol. 163, pp. 600-610.

Weng, Y., Lu, B., Li, M., Liu, Z., Tan, M. J., Qian, S. (2018b). “Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing”. Construction and Building Materials, Vol. 189, pp. 676-685.

Winsun Decoration Design Engineering Co. (2003). <http://www.winsun3d.com/En/About/> (Acedido em 11/05/2021). Shangai – China.

Xia, M. e Sanjayan, J. (2016). “Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications”. Materials and Design, Vol. 110, pp. 382-390.

Yang, H., Zhu, K., Zhang, M. (2019). “Analysis and Building of Trading Platform of Construction 3D Printing Technology and Products”. Hindawi – Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2019, Article ID 9507192.

Yoo, J., Cima, M. J., Khanuja, S., Sachs, E. M. “Structural ceramic components by 3D printing”. Pesquisa científica sob o contrato N00014-92-J-1902, Departments of Materials Science and Engineering and Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Zhang, X., Li, M., Lim, J. H., Weng, Y., Tay, Y. W. D., Pham, H., Pham, QC. (2018). “Large-scale 3D printing by a team of mobile robots”. Automation in Construction, Vol. 95, pp. 98-106.