

UNIVERSIDADE CESUMAR – UNICESUMAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS LIMPAS

LILIAN KEYLLA BERTO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA PARA USO PELA
MANUFATURA ADITIVA**

MARINGÁ
2021

LILIAN KEYLLA BERTO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA PARA USO PELA
MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas da Universidade Cesumar - UniCesumar, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM TECNOLOGIAS LIMPAS.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luciana C. S. H. Rezende
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Natália U. Yamaguchi

MARINGÁ
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B545d Berto, Lilian Keylla.

Desenvolvimento de argamassa para uso pela manufatura aditiva /
Lilian Keylla Berto. – Maringá-PR: UNICESUMAR, 2021.

59 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Luciana C. S. H. Rezende.

Coorientadora: Profa. Dra. Natália Ueda Yamaguchi.

Dissertação (mestrado) – Universidade Cesumar - UNICESUMAR,
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Maringá, 2021.

1. Construção civil. 2. Impressão 3D. 3. Produção mais limpa. 4.
Sustentabilidade. 5. Tecnologias limpas. I. Título.

CDD – 691

Roseni Soares – Bibliotecária – CRB 9/1796
Biblioteca Central UniCesumar

Ficha catalográfica elaborada de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LILIAN KEYLLA BERTO

Desenvolvimento de argamassa para uso pela manufatura aditiva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas da Universidade Cesumar - UniCesumar, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Limpas pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA



Prof^a. Dr^a. Luciana Cristina Soto Herek Rezende
Universidade Cesumar (Presidente)

Prof^a. Dr^a Edneia Aparecida de Souza Paccola
Universidade Cesumar



Prof^a. Dr^a. Berenice Martins Toralles Carbonari
Universidade Estadual de Londrina

“Porque todas as coisas vêm Dele, por meio Dele e vão para Ele.
A Ele pertence a glória para sempre.
Amém”

Trecho de Romanos 11:36

À minha mãe e ao meu pai que acompanharam toda a minha trajetória.

À minha irmã pelo estímulo e companheirismo, principalmente nos momentos de incerteza.

À Marla Corso, ao Maicon Leles e à Dr^a. Flávia Reitz pela parceria nesta pesquisa.

À minha orientadora, Dr^a Luciana Rezende, pelo incentivo e pelos ensinamentos que me deram asas e a possibilidade de voarmos longe!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida.

Ao Centro Universitário de Maringá, por ter-me possibilitado desenvolver este trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação de Tecnologias Limpas pelos conhecimentos que me deram uma visão ampla e interdisciplinar.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas/UniCesumar pelos valiosos ensinamentos, em especial, a Coordenadora do programa Drª. Márcia Andreazzi pela dedicação aos alunos e pela valorização do programa.

À minha orientadora Drª. Luciana Rezende por acreditar no meu potencial e por toda a paciência e dedicação em sua carreira acadêmica. Ainda, por ter sido um grande exemplo de admiração, fortaleza e resiliência.

À minha coorientadora Drª Natália Yamaguchi, à Drª Edneia Aparecida de Souza Paccolla, ao Dr. José Gonçalves e à Drª. Flávia Reitz pela colaboração a este trabalho.

Aos colegas de curso pela amizade, apoio e demonstração de companheirismo. Em especial, ao Maicon pelo projeto e execução da impressora 3D, à Marla Corso pelo apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Aos técnicos dos laboratórios, Bruna, Pablo e Maicon, que me deram todo o suporte necessário.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	01
2	OBJETIVOS.....	03
2.1	Objetivo geral	03
2.2	Objetivos específicos	03
3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	04
4	REVISÃO DE LITERATURA	05
4.1	Planejamento urbano, sustentabilidade e tecnologias mais limpas.....	05
4.2	Manufatura aditiva, construção civil e meio ambiente	08
4.2.1	LINHA DO TEMPO DA MANUFATURA ADITIVA	11
4.3	Desafios e potencialidades da manufatura aditiva alinhados a sustentabilidade	13
4.3.1	NOVOS REQUISITOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA IMPRESSÃO 3D	17
4.4	Composição e desempenho mecânico dos materiais cimentícios para impressão 3D .	19
5	REFERÊNCIAS.....	23
6	ARTIGO 1	30
6.1	Normas do Artigo 1.....	53
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da estrutura desta dissertação.....	04
Figura 2 – Fatores estimulantes para o desenvolvimento de materiais cimentícios.....	16

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais incorporações e resultados mecânicos de compósitos de matriz cimentícia para manufatura aditiva	23
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Benefícios na utilização da manufatura aditiva em construções em relação ao tripé da sustentabilidade.....	10
Tabela 2 – Avanços na manufatura aditiva aplicada no setor da construção civil	15
Tabela 3 – Proporção de areia em relação ao cimento em materiais cimentícios para impressão 3D	20
Tabela 4 – Proporção de água em materiais cimentícios para impressão 3D.....	20
Tabela 5 – Porcentagem de aditivo superplastificante sobre o peso do cimento encontrados em materiais cimentícios para impressão 3D	21

LISTA DE ABREVIATURAS

- 3D** - Tridimensional
BIM - Building Information Model
CAD - Computer-Aided Design
CAM - Computer-Aided Manufacturing
DIW - Escrita direta à tinta
FDM - Modelagem por Deposição Fundida
LEED - Liderança em Energia e *Design* Ambiental
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SLA - Estereolitografia
SLS - Sinterização Seletiva a Laser
STL - Standard Triangle Language

RESUMO

A manufatura aditiva, conhecida como impressão 3D, vem se destacando em diversas áreas, entre elas, a construção civil. Essa tecnologia possui vantagens de produção, tais como a redução de tempo, custos e resíduos, resultando em uma produção mais limpa, evidenciada pela abordagem de conceitos inovadores aliados ao planejamento urbano. Mostra-se recente e pouco explorada, sendo que um dos seus maiores desafios no setor da construção é a capacidade de extrusão e de construção de camadas de matriz cimentícia na impressão de peças, estruturas e até mesmo a edificação por completo. Dessa maneira, a revisão de literatura apresentou conceitos inovadores empregados ao planejamento urbano, bem como, as contribuições da manufatura aditiva para o meio ambiente atreladas ao planejamento urbano. Assim, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e avaliação das propriedades em estado fresco e endurecido de uma argamassa passível de utilização na manufatura aditiva. O ensaio de extrudabilidade analisou a capacidade extrusão e de impressão na horizontal em 4 amostras com traços distintos e a construtibilidade teve o intuito de investigar a capacidade de impressão na vertical nas amostras que não apresentaram falhas no teste anterior. Dos resultados referentes a extrusão e construção de camadas na horizontal e vertical, definiu-se a mistura que apresentou o traço considerado promissor a ser aplicado no protótipo de impressão 3D de bancada e, para esta amostra foram realizados ensaios físicos preliminares. Os resultados referentes a consistência da amostra compatível sofreram queda conforme aumentava-se o tempo de mistura, isto possivelmente, ao fato de a mistura ter sofrido retenção de água (86,46%), ao longo do tempo, diminuindo a trabalhabilidade da amostra. A tensão de escoamento pelo aparelho de Vicat apresentou aumento nos minutos finais do teste, indicando que a amostra tem capacidade de resistir à deposição de camadas superiores. Portanto, o compósito cimentício desenvolvido e avaliado é considerado promissor para ser aplicado na manufatura aditiva.

Palavras-chave: Construção civil. Impressão 3D. Produção mais limpa. Sustentabilidade. Tecnologias limpas.

ABSTRACT

Additive manufacturing known as 3D printing has been standing out in several areas including construction. This technology has production advantages such as reducing time, costs and waste resulting in cleaner production evidenced by the approach of innovative concepts allied to urban planning. It is recent and little explored and one of its biggest challenges in the construction sector is the printability of parts, structures and even the entire building with the cement matrix. Thus, the literature review presented innovative concepts used to urban planning well as the contributions of additive manufacturing to the environment tied to urban planning. Thus, this work aimed to develop and evaluate properties in a fresh and hardened state of a grout that can be used in additive manufacturing. The extrudability test analyzed the extrusion and horizontal printing capacity in 4 samples with distinct traces and the buildability was intended to investigate the vertical printing capacity in samples that did not show flaws in the previous test. From the results regarding the extrusion and build of horizontal and vertical layers, the mixture that presented the trait considered promising to be applied in the bench 3D printing prototype was defined and, for this sample, preliminary physical tests were performed. The results regarding the slump flow of the compatible sample decreased as the mixing time increased, this is possibly due to the fact that the mixture suffered water retention (86.46%) over time, decreasing the workability of the sample. The yield stress by the Vicat device increased in the final minutes of the test, indicating that the sample has the ability to resist the deposition of upper layers. Therefore, the cementitious composite developed and evaluated is considered promising to be applied in additive manufacturing.

Keywords: Construction. 3D printing. Cleaner production. Sustainability. Clean technologies.

1 INTRODUÇÃO

No contexto mundial, é notório que a inovação tem ganhado espaço e torna-se uma resposta para o fortalecimento das metodologias tradicionais. Desta forma, a inserção de métodos de fabricação provoca mudanças que contribuem para reduzir impactos ambientais negativos, e por consequência, fomenta a sustentabilidade (KARJI et al., 2019).

Uma das inovações que tem ganhado destaque em diversas áreas é a manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D. Ela está inserida na biomedicina, na aeronáutica e nas engenharias de forma geral (GUO et al., 2019), inclusive, na engenharia civil (LU et al., 2019).

Esta tecnologia é utilizada na construção de objetos tridimensionais por meio de diferentes técnicas, como a estereolitografia (SLA), modelagem por deposição fundida (FDM), escrita direta à tinta (DIW), sinterização seletiva a *laser* (SLS) (GUO et al., 2019), *Contour Crafting* (SAKIN; KIROGLU, 2017).

A *Contour Crafting*, criada pelo Dr. Behrokh Khoshnevis (SALET et al., 2018), descreve o método de manufatura aditiva voltado para utilização de materiais de construção na execução de edifícios (KHOSHNEVIS 1996, 2010). O emprego da *Contour Crafting* se justifica pela redução de resíduos e tempo (LU et al., 2019; SAKIN; KIROGLU, 2017; HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016), ainda, possui processos mais controlados, seguros e modernos (PHUYAL; BISTA, D.; BISTA, R., et al., 2020), podendo contribuir para maior eficiência e liberdade das formas geométricas (LU et al., 2019).

No entanto, um dos maiores desafios é o desenvolvimento de materiais cimentícios com propriedades no estado fresco e propriedades mecânicas apropriadas, para serem impressas em três dimensões com a aplicação da técnica *Contour Crafting* (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016) e nos métodos de construir com materiais cimentícios adequados denominados *3D printing concrete* e *3D printing mortar* (YUAN et al., 2019).

Por outro lado, o desenvolvimento dos materiais cimentícios para a aplicação destes métodos teóricos e experimentais com finalidade satisfazerem desempenhos e aplicações (HAMIDI; ASLANI, 2019) podem torná-los eficientes, o que pode contribuir com a minimização das problemáticas ambientais (HAMIDI; ASLANI, 2019), e por consequência para a sustentabilidade (ARANGO et al., 2019).

Assim, o emprego desta tecnologia pode fortalecer importantes causas relacionadas ao meio ambiente, como a Agenda 2030, que possui plano de ação para a prosperidade do

planeta, por meio de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), para estimularem ações na esfera internacional (ONU, 2016).

Destacam-se no setor da construção civil objetivos voltados para a indústria: a inovação e a infraestrutura, dos quais são evidenciadas pela adoção de tecnologias e processos industriais limpos. É de grande importância os objetivos relacionados à abordagem de cidades e comunidades sustentáveis (MARANGHI et al., 2020). E não menos importante, o consumo e produção responsável, em que busca a redução da geração de resíduos (ONU, 2016).

Em atendimento ao programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, na linha de pesquisa em Ecoeficiência Urbana e Resíduos, foi realizada esta pesquisa com a adoção de uma tecnologia limpa, por meio do desenvolvimento de uma argamassa com propriedades no estado fresco e propriedades mecânicas passíveis de serem utilizadas para o emprego da manufatura aditiva no setor da construção civil, visando a sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma argamassa passível de ser utilizada na manufatura aditiva, visando uma produção mais limpa.

2.2 Objetivos específicos

- Definir o traço da argamassa por meio dos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade;
- Avaliar o melhor traço obtido com relação a ensaios físicos no estado fresco; e
- Avaliar o melhor traço obtido com relação a ensaios mecânicos no estado endurecido.

3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho apresentou na introdução a manufatura aditiva e suas técnicas com destaque na *Contour Crafting*. Ainda demonstrou o problema de pesquisa baseado no desenvolvimento de matriz cimentícia com capacidade de impressão alinhado à justificativa de adoção de uma tecnologia limpa. Em seguida, apresentou os objetivos desta pesquisa em desenvolver uma argamassa passível de ser utilizada na manufatura aditiva.

A seguir, a revisão de literatura destacou conceitos inovadores acerca do planejamento urbano, sustentabilidade e tecnologias mais limpas. Também, ressaltou a manufatura aditiva aplicada a construção civil e suas vantagens econômicas, sociais e ambientais. Na sequência, apresentou a linha do tempo da manufatura aditiva e os desafios e potencialidades da manufatura aditiva alinhados a sustentabilidade. Por fim, foram descritos os novos requisitos de materiais cimentícios para impressão 3D com a apresentação da composição e desempenho mecânico desses materiais cimentícios para impressão 3D.

Após a revisão de literatura, deu-se sequência ao artigo com a apresentação da metodologia, resultados e discussões, conclusão e as referências deste trabalho. Finalizou com a demonstração das normas referente ao artigo e suas considerações finais. A Figura 1, mostra o fluxograma simplificado da estrutura desta dissertação.

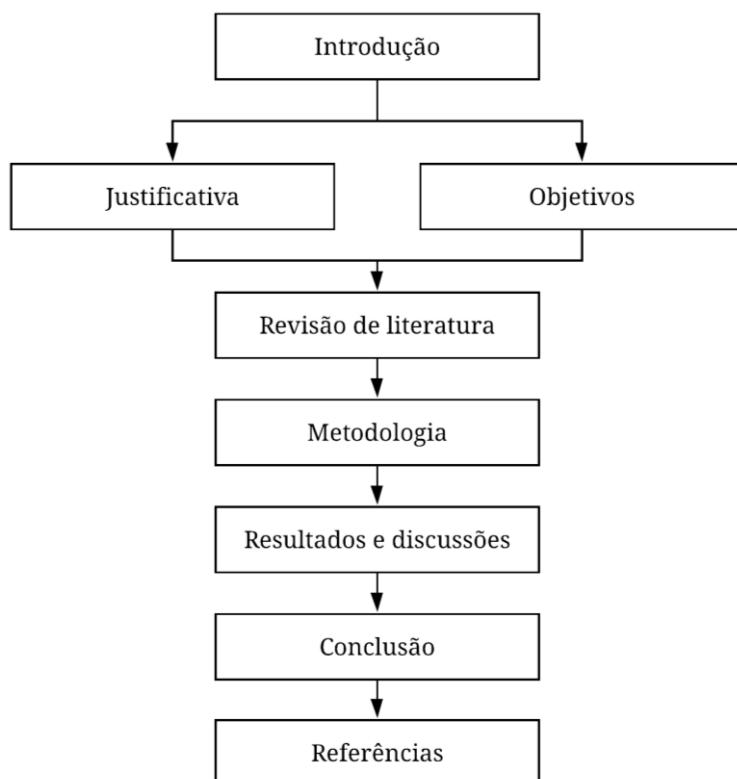


Figura 1 – Fluxograma da estrutura desta dissertação.

Fonte: Autora (2021).

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Planejamento urbano, sustentabilidade e tecnologias mais limpas

O fenômeno da urbanização e o processo de expansão urbana causam como efeitos a vulnerabilidade socioambiental e os riscos socioambientais. Em contrapartida, a resiliência socioecológica urbana surge como uma condição de capacidade adaptativa de recuperar ou adquirir um equilíbrio no sistema urbano (CABRAL; CÂNDIDO, 2019).

A resiliência urbana tem sido adotada no planejamento urbano e é considerada um ajuste na política urbana e refere-se à capacidade de ser adaptar frente às mudanças. É visível o crescimento das iniciativas nacionais e internacionais, no entanto, requer longo prazo e diversas perspectivas para a implementação destas iniciativas, tais como, a interligação entre resiliência e a sustentabilidade que busca melhores caminhos para as transições urbanas (BUSH; DOYON, 2019).

Em uma análise global, a Agenda 2030 é um dos documentos mais atuais e de iniciativa global que integra a sustentabilidade às cidades com foco nas pessoas mais vulneráveis, no meio ambiente e na prosperidade. Esta agenda apresenta os princípios e propósitos da Carta das Nações Unidas e possui um plano de ações composto por dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas (LASLETT; URMEE, 2020).

A agenda 2030, que tem chamado a atenção de pesquisadores e agentes políticos para o atendimento dos ODS, mostra-se uma das formas encontradas para mitigar os impactos ambientais negativos (OMER; NOGUCHI, 2019). Como exemplo, no contexto urbano, o fortalecimento do planejamento urbano com infraestrutura verde busca conceituar os espaços naturais conectados a ambientes urbanos, com foco em fomentar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Este contexto referido, mostra-se uma alternativa que vem em contrapartida com a redução de espaços naturais e o crescimento de áreas não planejadas nos centros urbanos (GARCIA et al., 2020).

Em outra análise, o crescimento populacional e a concentração de pessoas nos grandes centros, representa um forte mecanismo para inovação cultural e social que atribui para sociedade novos comportamentos, economias e tecnologias (MARANGHI et al., 2020).

Nesse sentido, surgiram diversos conceitos que abordam novos aspectos para as cidades e suas construções, como cidades inteligentes (CHAMOSO et al., 2020; LASLETT; URMEE, 2020; LAZZARETTI et al., 2019), cidades sustentáveis (JALAEI et al., 2020), infraestrutura verde (MAROPO et al., 2019), construções sustentáveis (OLIVEIRA; FARIA, 2019), indústria 4.0, impressão 3D (DALLASEGA et al., 2018), *Building Information Model*

(BIM), manufatura aditiva (SAKIN; KIROGLU, 2017; HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016) e *Smart Manufacturing System* (PHUYAL et al., 2020).

Cada vez mais os gestores das cidades têm buscado estratégias sustentáveis, a fim de melhorarem a eficiência energética em edifícios, bem como de oferecerem inclusão social, proteção ambiental e viabilidade financeira (PARDO-BOSCH et al., 2019). Outra contribuição das novas estratégias é a inserção das tecnologias em conjunto com os novos métodos na indústria da construção, que podem contribuir para que as políticas públicas e organizações consigam alcançar os ODS (SAIEG et al., 2018). Logo, estas tecnologias podem ser consideradas tecnologias limpas.

Diante de todo o avanço tecnológico, é notório que as tecnologias limpas se tornam tão importantes no contexto das cidades, inclusive para o monitoramento da qualidade ambiental, social e econômica (LASLETT; URMEE, 2020), conhecidos como tripé da sustentabilidade. Os profissionais das áreas de arquitetura e de engenharia têm mostrado interesse em obras, projetos e processos mais eficientes para o setor da construção civil (ARANGO et al., 2019), promovendo assim, construções mais sustentáveis com o intuito de alcançarem o conceito de cidades sustentáveis (JALAEI et al., 2020).

O conceito de cidades sustentáveis se diferencia dos demais, pois não pode ser aplicado linearmente e está baseado no tripé da sustentabilidade. Ou seja, para alcançá-lo as cidades devem ser sustentáveis em todas as áreas. Nesse sentido, as cidades sustentáveis se apoiam em três pilares com base no foco a Agenda 2030, englobando pessoas, lucro e planeta (LASLETT; URMEE, 2020). Dentre os ODS da Agenda 2030, merece destaque no contexto urbano é o de número 11, que se refere às cidades e comunidades sustentáveis (LASLETT; URMEE, 2020; MARANGHI et al., 2020).

Em outro aspecto, o cumprimento aos objetivos de desenvolvimento sustentável resultará em esforços positivos com relação aos aspectos de bem-estar, eficiência energética e hídrica; também poderá promover o consumo responsável e a produção mais limpa. Além disso, o atendimento dos ODS pode mitigar os problemas relacionados a mudanças climáticas, o que traz a infraestrutura resiliente e as cidades sustentáveis (OMER; NOGUCHI, 2019).

Dentre as termologias atuais, destaca-se também o conceito cidade inteligente, que é baseado em qualidade de vida com a inserção de tecnologias de informação e comunicação (LASLETT; URMEE, 2020; LAZZARETTI et al., 2019), de modo a promover interações entre as cidades e a gestão pública (LAZZARETTI et al., 2019). Dessa forma, as cidades inteligentes promovem um estilo de vida mais sustentável. Além disso, a infraestrutura,

inovação e tecnologia são os componentes que tornam as cidades inteligentes eficientes e autossuficientes (CHAMOSO et al., 2020).

Atualmente, a sustentabilidade urbana tem se tornado cada vez mais relevante, pois é considerada uma ótima reação para os problemas urbanos de crescimento populacional (LASLETT; URMEE, 2020), impacto ambiental negativo e a perda da biodiversidade (OPOKU, 2019).

Além disso, a sustentabilidade urbana se mostra evidente nas iniciativas ambientais globais para proporcionar uma melhor interação entre os componentes que envolvem a humanidade e a natureza (OPOKU, 2019), bem como estratégias para alcançar a economia verde e o desenvolvimento sustentável (LASLETT; URMEE, 2020). No entanto, o seu alcance é um dos maiores desafios (MARANGHI et al., 2020).

Nos estudos de Laslett e Urmee (2020), por meio do método matemático, foi possível verificar que a sustentabilidade é um forte princípio de desempenho a ser alcançado e avaliado em *ranking* das cidades e, desta maneira, mostrou que a sustentabilidade está cada vez mais visível e evidenciada no contexto urbano.

Dentro deste contexto urbano, a construção civil busca atender as novas tendências e se mostra em constante processo de evolução. As pesquisas têm evidenciado esse fato, inclusive, neste setor as empresas se mostram mais suscetíveis para adotar modelos mais sustentáveis de gestão e produção (CARVALHO et al., 2020). Por exemplo, o conceito de infraestrutura verde que surge em oposição à infraestrutura convencional, com o uso de métodos e tecnologias mais sustentáveis com finalidade de recuperar áreas verdes degradadas, eficiência e economia (MAROPO et al., 2019).

Nota-se que desde a concepção dos novos projetos e construções, a sustentabilidade é um dos fatores determinantes, e é ainda mais evidenciada no processo de certificações de construções sustentáveis, como a LEED (Liderança em Energia e *Design* Ambiental) (OLIVEIRA; FARIA, 2019).

A LEED é uma dentre as certificações mais usuais e conhecidas (JALAEI et al., 2020; SHEALY, 2016), que avalia níveis de pontuação em construções classificadas como verdes por categorias que inclui espaço sustentável, localização e transporte, eficiência da água, energia e atmosfera, materiais e recursos, qualidade do ambiente construído, inovação, prioridade regional e processo integrativo (JALAEI et al., 2020).

Os níveis de pontuação se dividem em prata de 40 a 49 pontos, em ouro de 60 a 79 pontos e em platina com 80 pontos ou acima deste valor mencionado (GREER et al., 2019). Assim, os edifícios sustentáveis possuem uma alta pontuação da certificação LEED em

comparação com os edifícios tradicionais devido aos benefícios ambientais, econômicos e sociais (SHEALY, 2016).

Outrossim, a implementação e os investimentos de ferramentas, tecnologias limpas e treinamento profissional, alinhado à gestão urbana, aos incentivos governamentais e setores privados podem promover o desenvolvimento sustentável (SAIEG et al., 2018).

Nos últimos anos, a transformação digital e as tecnologias inteligentes se transformaram em pilares para as indústrias das futuras gerações, como a recente indústria 4.0 e a sociedade 5.0 têm impulsionado os avanços dos sistemas de manufatura aditiva, como, por exemplo, o conceito *Smart Manufacturing System*, utilizado para se referir aos sistemas inteligentes da manufatura aditiva, mostra-se ser uma tendência colaborativa e criativa para diversos setores, o que tem potencializado a área de engenharia e arquitetura (PHUYAL et al., 2020).

É perceptível que os projetos que integram novos métodos, como o BIM - definido por Sakin e Kiroglu (2017), como o gerenciamento e a compatibilização de projetos sustentados por tecnologias digitais que avaliam todo o ciclo de vida de uma construção. Referido método está se fortalecendo com a manufatura aditiva (PHUYAL et al., 2020) em conjunto com as tecnologias de suporte, como a pré-fabricação, realidade virtual e técnicas de impressão 3D, que por consequência, podem melhorar a qualidade dos gerenciamentos nas organizações e diminuir retrabalhos, alterações no projeto, tempo e custos econômicos (DING et al., 2019).

Nos estudos de Jalaei e colaboradores (2020), o BIM foi integrado para avaliar a pontuação para alcançar um desempenho de construção com base na certificação LEED. Dessa maneira, os projetos que possuírem a plataforma BIM integrada a novos métodos, como a manufatura aditiva no setor da construção civil, terão maior tendência para alcançar a eficiência energética, a otimização no *design*, a redução de custos (SAKIN; KIROGLU, 2017), por consequência, sucesso no planejamento e processo de execução complexo (MECHTCHERINE et al., 2019).

4.2 Manufatura aditiva, construção civil e meio ambiente

A manufatura aditiva aplicada no setor da construção civil é capaz de imprimir estruturas de materiais cimentícios, e para isso, exige controle e automação nos processos de execução. Geralmente, essas condições são alcançadas pelo gerenciamento sofisticado, baseados no BIM, que por sua vez integra o complexo planejamento e processo de execução, com todas as informações geométricas e específicas dos projetos (MECHTCHERINE et al., 2019), desta forma, os projetos se tornam detalhados e compatibilizados.

Atualmente, a evolução da manufatura aditiva originou o conceito *Smart Manufacturing System*, que consiste em um sistema de fabricação inteligente por meio de um gerenciamento com foco em controle, monitoramento, digitalização e eficiência. Com isso, esse conceito utiliza os princípios das cidades inteligentes, como o uso de tecnologias de informação e comunicação incorporadas ao modelo da indústria 4.0 (PHUYAL et al., 2020).

A transformação digital aplicada à manufatura aditiva na era da Indústria 4.0 ainda é considerada lenta e seu potencial ainda não foi totalmente explorado no gerenciamento da cadeia de suprimentos, no entanto, traz mudanças ao setor da construção. A realidade virtual e a interação humano-computador também são vistas como os principais componentes da indústria 4.0 que permitem ambientes de construção digitalizados (DALLASEGA et al., 2018).

Já os componentes a serem explorados pela manufatura aditiva pelo conceito *Smart Manufacturing System* são o gerenciamento do ciclo de vida do produto, o gerenciamento da cadeia de suprimentos, o *design* para fabricação e a montagem, incluindo o sistema de manufatura flexível e reconfigurável, o ciclo de inovação rápida, dentre outros (PHUYAL et al., 2020).

A mudança do ciclo de vida de produtos com a aplicação de processos construtivos mais limpos pode alcançar benefícios diretamente aliados à sustentabilidade (SHEALY, 2016), e, por consequência, o desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável no setor da construção civil é importante para a redução dos impactos ambientais e tem mostrado avanços com métodos e técnicas mais sustentáveis (KARJI et al., 2019).

Alguns métodos de construção foram evoluídos com a incorporação de conceitos que buscam a eficiência de gestão, tais como *Building Information Model* (BIM), construção enxuta (SAIEG et al., 2018) e manufatura aditiva (SAKIN; KIROGLU, 2017; HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016), o que proporciona uma redução de resíduos e o aumento no controle de processos e segurança dos trabalhadores (SAIEG et al., 2018), que por consequência, fomenta o desenvolvimento sustentável.

Souza et al. (2020) observaram que os estudos relatam que a impressão 3D em edifícios é uma tecnologia que torna o processo construtivo mais limpo e pode ser classificado como ecologicamente correto, no entanto, há divergências e discussão sobre essa visão (WANGLER et al., 2016; LABONNOTE et al., 2016; De SCHUTTER et al., 2018).

Os métodos utilizados na manufatura aditiva podem contribuir para maior eficiência, redução de resíduos e maior liberdade para formas geométricas (LU et al., 2019). Souza et al. (2020) notaram que esta última característica referida é a mais atraente para algumas

pesquisas devido a capacidade de reproduzir complexas estruturas 3D com o uso de formas geométricas livres. Por essa e outras vantagens, a manufatura aditiva aplicada para a construção de edificações é uma tecnologia promissora e sustentável.

Nas últimas décadas a manufatura aditiva se destaca na área da construção civil (LU et al., 2019), pois se mostra alinhada ao tripé da sustentabilidade, devido as vantagens sociais, econômicas e ambientais (Tabela 1), relacionadas à possibilidade da impressão de elementos no próprio local (SAKIN; KIROGLU, 2017), a sua capacidade de programação de máquinas para a realização de tarefas que pode reduzir os acidentes de trabalho (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016) e sua contribuição para a redução dos impactos ambientais (SAKIN; KIROGLU, 2017).

Tabela 1 - Benefícios na utilização da manufatura aditiva em construções em relação ao tripé da sustentabilidade

Aspectos em relação ao tripé da sustentabilidade	Benefícios em comparação com os métodos tradicionais	Referência
Aspectos ambientais	Redução da geração de resíduos da construção civil Redução da poluição no meio ambiente Promove a reciclagem com a incorporação de resíduos Reduz desperdícios	El-Sayegh et al. (2020) Lu et al. (2019) Sakin e Kiroglu (2017) Hager, Golonka e Putanowicz (2016)
Aspectos sociais	Redução na geração de poluentes atmosféricos Processos mais controlados e mais seguros Evita riscos à saúde	Hager, Golonka e Putanowicz (2016) Phuyal et al. (2020)
Aspectos econômicos	Redução de custos de transporte, armazenagens de insumo, matérias-primas e energia Otimização do tempo Maior precisão Aumento na produtividade	Sakin e Kiroglu (2017) Phuyal et al. (2020)

Fonte: Autora (2020).

Além disso, a matriz cimentícia pode conter materiais que possam ser reciclados, tais como os resíduos de blocos cerâmicos e de fibras de celulose (EL-SAYEGH et al., 2020). Ainda, esses benefícios são explanados e aprimorados por meio de técnicas específicas. A mais reconhecida e utilizada recentemente no setor da construção civil é a técnica de manufatura aditiva denominada *Contour Crafting* (SAKIN; KIROGLU, 2017).- criada pelo Dr. Behrokh Khoshnevis (SALET et al., 2018) que descreveu o método de manufatura aditiva voltado para utilização de materiais de construção para execução de edifícios (KHOSHNEVIS 1996, 2010).

O sistema de construção desta técnica é por meio da deposição do material, geralmente, formado por uma matriz cimentícia ou material compósito, realizada camada por camada e com a aplicação da automatização do processo de construção que pode ser utilizada para a construção *in situ*, ou seja, realizada no próprio local (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016).

É notório que a técnica *Contour Crafting* possui diversas vantagens, como a segurança, a redução de custo e de tempo. Além disso, essa tecnologia permite criar grandes elementos com maior flexibilidade e precisão, tendo como exemplos, o castelo *Andy Rudenko's garden* – em Minnesota, Estados Unidos - primeira estrutura de construção *in situ* (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016) e a residência *Apis Cor House* - localizada na capital da Rússia - executada em 24 horas utilizando esta técnica (SAKIN; KIROGLU, 2017).

4.2.1 LINHA DO TEMPO DA MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, conhecida por impressão 3D, é uma tecnologia utilizada para construir objetos tridimensionais (LU et al., 2019). Nos últimos anos, a manufatura aditiva ou impressão 3D vem apresentando um rápido crescimento no contexto mundial e tem mostrado destaque em diversas áreas, dentre elas estão a biomedicina, a engenharia mecânica, a aeronáutica, a eletrônica (GUO et al., 2019) medicina veterinária (WILHITE; WÖLFEL, 2019), engenharia civil (LU et al., 2019), dentre outras.

A redução de custos, desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas são os que tornam a manufatura aditiva cada vez mais acessível e aplicada em diversas áreas no contexto urbano (WILHITE; WÖLFEL, 2019). Há diversas técnicas para a aplicação da manufatura aditiva, por exemplo, estereolitografia (SLA), modelagem por deposição fundida (FDM), escrita direta à tinta (DIW), sinterização seletiva a *laser* (SLS) (GUO et al., 2019), *Contour Crafting* (SAKIN; KIROGLU, 2017).

Em geral, o processo básico para a impressão 3D consiste no desenvolvimento da modelagem, por meio de um software CAD e/ou CAM, que transporta para um arquivo STL, logo após, para um programa específico para transformar em arquivo de código G, e, por fim, é realizada a configuração de parâmetros para efetivação da impressão (GUO; LV; BAI, 2019).

Este novo pensamento de fabricação de produtos surgiu com os novos métodos e patentes, que, primeiramente, foi visto como prototipagem rápida (SCHMIDT et al., 2017). Ciraud (1973) registrou patente de seu método e dispositivo capaz de transformar o pó metálico em um corpo sólido por meio de feixes de raio *laser*. Outro registro de patente foi de Swainson (1977) que desenvolveu o método e o aparelho que recria a geometria do objeto em uma figura tridimensional de forma aditiva por meio de feixes cruzados de radiação.

Uma das patentes mais semelhantes com os processos de modelagem de sinterização a *laser* atual foi a registrada pelo Housholder (1981), na qual o objeto se forma com o emprego

de partículas fusíveis de *laser* que são aplicadas seletivamente camadas por camada no material.

No mesmo ano, Kodama (1981) desenvolveu sua técnica de manufatura aditiva que transforma um líquido polimérico em sólido por meio da aplicação em camadas com raios ultravioletas. Anos depois, essa técnica foi aprimorada e denominada como estereolitografia pelo registro da patente de Hull (1986).

No final da década de 80, Deckard (1989) registrou patente de seu método denominado por sinterização seletiva a *laser*, semelhante ao método de Hull (1986), contudo, foi investigado em material em pó.

A partir de então, o desenvolvimento da manufatura aditiva foi impulsionado pela alta produtividade da indústria 4.0 (PHUYAL et al., 2020) e pelo surgimento de softwares CAD (computer-aided designs) e CAM (computer-aided manufacturing), os quais incentivaram a modelagem tridimensional (3D) de peças mecânicas de forma mais eficiente e rápida (RAJAGURU et al., 2020).

Um grande destaque da manufatura aditiva foi com o registro da patente de Crump (1992), que definiu o método e o aparelho da técnica de deposição de filamento fundido. Na referida patente foi sugerido o emprego dos softwares CAD e CAM para a produção de objetos tridimensionais por meio de materiais, como os termoplásticos. Nesta técnica o material é depositado por camadas em uma temperatura pré-determinada ao longo dos eixos denominados ‘X’, ‘Y’ e ‘Z’ e é solidificado em uma base com outra taxa controlada de temperatura.

Khoshnevis (1996) registrou a patente do aparelho e método de manufatura aditiva voltados para a utilização de materiais de construção. Posteriormente, Khoshnevis (2010) registrou outra patente, “Deployable contour crafting”, que descreve sobre o sistema de portíco acoplado em um veículo para a execução da construção de um edifício. Por meio destes registros de patentes, o Dr. Behrokh Khoshnevis ficou conhecido por ser o criador da técnica de manufatura aditiva denominada *Contour Crafting* (SALET et al., 2018). Referida técnica, para Hager, Golonka e Putanowicz (2016) é considerada um novo capítulo para a construção civil.

Em uma análise comparativa entre as diferentes técnicas de impressão 3D citadas acima, volta-se para aspectos fundamentais, tais como, materiais utilizados, precisão, acabamento, resistência mecânica. Por exemplo, na técnica *Contour Crafting* é necessário o desenvolvimento da uma matriz cimentícia que tenha capacidade de impressão para a execução de uma edificação, peças arquitetônicas e estruturais, além das propriedades

reológicas e mecânicas apropriadas para serem utilizadas (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016).

4.3 Desafios e potencialidades da manufatura aditiva alinhados a sustentabilidade

O conceito manufatura aditiva aplicada na construção tem impulsionado as áreas de engenharia mecânica, engenharia civil, arquitetura e outras, a trabalharem de forma interdisciplinar para atenderem as novas demandas e desafios. Dessa forma, os processos inteligentes e de controle e automação se mostram essenciais para superar os novos desafios que surgem desde a concepção do *design* até a impressão em escala real (MECHTCHERINE et al., 2019).

Além de enfrentar esses desafios, a manufatura aditiva se mostra promissora para superar barreiras ambientais e sociais e contribuir para o planejamento urbano sustentável, visto que os conceitos aplicados no setor urbano que integram a construção da resiliência urbana, baseados na sustentabilidade são soluções para enfrentar os impactos ambientais, as mudanças climáticas, além de trazer desenvolvimento econômico e social (BUSH; DOYON, 2019).

No contexto atual, a sustentabilidade aplicada para as construções de edificações se tornou um ponto chave para o desenvolvimento das cidades sustentáveis (JALAEI et al., 2020). Dessa forma, tornou-se notório as grandes contribuições da manufatura aditiva para o meio ambiente atrelado ao planejamento urbano. Também, há de se considerar que um dos objetivos da manufatura aditiva se mostra alinhado ao planejamento urbano, pois ambos têm a capacidade de remodelar espaços com o gerenciamento e o desenvolvimento da infraestrutura e serviços (BUSH; DOYON, 2019).

A manufatura aditiva aplicada no setor urbano se destaca por apresentar um alto potencial construtivo, inclusive em larga escala, com previsões de atender demandas atuais dos projetos arquitetônicos e estruturais (MECHTCHERINE et al., 2019) e futuras, a saber, nos Emirados Árabes Unidos, há previsões de impressão de casas até o ano de 2030 (RAJAN et al., 2018).

Em razão disso, a construção civil está em constante processo de evolução, a título de exemplo, na Europa, no ano de 2014, houve um novo capítulo na tecnologia da construção civil, com o emprego da manufatura aditiva no primeiro projeto de casa, conhecido como *Canal House*, situada em Amsterdã, executada pela impressão 3D; em seguida, na China, o primeiro prédio de cinco andares, foi também realizado com a mesma tecnologia (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016).

Cabe ressaltar que essa tecnologia já foi aplicada na implantação de casas, prédios comerciais e habitacionais (EL-SAYEGH et al., 2020), estruturas complexas como um castelo (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016) e pontes (Buchanan e Gardner, 2019; SALET et al., 2018), inclusive para a implantação de habitação social, investigada nos estudos de Poullain et al. (2018) e Furet et al. (2019), detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Avanços na manufatura aditiva aplicada no setor da construção civil

Ano	Avanços	Referência
2008	<ul style="list-style-type: none"> Criação da primeira impressora 3D em escala real pela empresa <i>WinSun</i> na China. 	El-Sayegh et al. (2020)
2013	<ul style="list-style-type: none"> Impressão de lotes de peças para a realização de dez casas, pela empresa <i>WinSun</i> na China. Estas peças referidas foram pré-fabricadas por meio de uma impressora com dimensão de 6 x 10 x 40 m (altura x largura x comprimento). 	El-Sayegh et al. (2020) Ghaffar et al. (2018) Hager, Golonka e Putanowicz (2016)
2014	<ul style="list-style-type: none"> Execução de dez casas em 24 horas, após o transporte das peças impressas em 2013 pela empresa chinesa. Construção do castelo <i>Andy Rudenko's garden</i> – em Minnesota, Estados Unidos – considerada a primeira estrutura de construção <i>in situ</i> pela impressão 3D. 	Ghaffar et al. (2018) Hager, Golonka e Putanowicz (2016)
2015	<ul style="list-style-type: none"> Construção com a aplicação da manufatura aditiva de uma mansão de 1100 m² e do primeiro prédio com dimensão de 6,6 x 40 x 10 m (altura x comprimento x largura) pela empresa <i>WinSun</i>. Projeção da <i>Urban Cabin</i> - traduzido para o português, cabine urbana -, pela <i>DUS Architects</i> em Amsterdã, Holanda. Executada em 24 horas por meio da técnica FDM (Fused Deposition Modeling) com material polimérico, segundo Rajan et al. (2018), bioplástico sustentável e reciclável com área útil de 8 m². Impressão de um hotel com dimensões 12,5 x 10,5 x 4 m (altura x comprimento x largura), realizado por Andrey Rudenko. Essa obra impressa teve duração interrupta de 100 horas com a utilização de uma matriz cimentícia com bom desempenho e ligação entre camadas. 	El-Sayegh et al. (2020) Buchanan e Gardner (2019) Ghaffar et al. (2018) Rajan et al. (2018) Hager, Golonka e Putanowicz (2016)
2016	<ul style="list-style-type: none"> Execução do primeiro escritório impresso de 250 m² em Dubai, conhecido como “Office of the Future”, traduzindo para o português, como o escritório do futuro. A empresa chinesa <i>WinSun</i> fabricou as peças por meio de uma impressora 3D para este empreendimento e realizou a execução em 17 dias. Construção da primeira ponte realizada com a impressão 3D, localizada no parque urbano <i>Castilla-La Mancha</i>, na Espanha. A impressão total compõe oito peças foi realizada pelo <i>Institute of Advanced Architecture</i>, em Catalunha, Barcelona. A obra da ponte com dimensão de 12 metros de comprimento e 1,75 m de largura teve duração de dois meses. 	El-Sayegh et al. (2020) Buchanan e Gardner (2019) Ghaffar et al. (2018) Rajan et al. (2018) Sakin e Kiroglu (2017)
2017	<ul style="list-style-type: none"> Em Nantes, na França foi realizada a construção da <i>Yhnova™</i>, uma habitação social de 95m², com aplicação de manufatura aditiva para a impressão de paredes de concreto com preenchimento externo e interno de espuma de polímero, com duração de 54 horas de trabalho. Finalização da execução de uma ponte de concreto pretendido com peças impressas em laboratório para a obra de renovação de uma ciclovia na vila Germert, na Holanda, com dimensão de 8 m x 3,5 m de comprimento e largura, respectivamente, e vão livre de 6,5 m. O processo de impressão teve duração de 48 horas, utilizando dois sistemas de impressão com troca a cada duas horas, devido ao tempo de endurecimento do concreto ser de 2 a 3 horas, o que permitiu evitar falhas de impressão. Impressão de um prédio pela empresa <i>3D Printhuset</i> em Copenhague. Esse empreendimento se destacou pelo <i>design</i> que enfatiza liberdade geométrica e redução de linhas retas. Lançamento da residência <i>Apis Cor House</i> de 38 m² - localizada na capital da Rússia – executada no próprio local em 24 horas. Realização de obras impressas, a saber, uma casa de 80 m² na Arábia Saudita, uma ponte na Holanda e um laboratório pela empresa holandesa <i>CyBe</i> que utilizou a técnica <i>Contour Crafting</i>. 	El-Sayegh et al. (2020) Buchanan e Gardner (2019) Furet et al. (2019) Ghaffar et al. (2018) Poullain et al. (2018) Salet et al. (2018) Sakin e Kiroglu (2017)
2019	<ul style="list-style-type: none"> Construção da maior ponte, até o momento atual, impressa em concreto em Xangai, na China, desenvolvida pela Universidade de Arquitetura de Tsinghua, com o comprimento de 86 ft (pés) com duração de impressão de 450 horas. A análise de econômica mostrou uma redução de custos de aproximadamente um terço. 	El-Sayegh et al. (2020)

Fonte: Autora (2020).

À medida na qual as pesquisas vêm aprimorando seus equipamentos, métodos construtivos e materiais, os pontos de fraqueza se dissolvem (LASLETT; URMEE, 2020) e o planejamento das cidades apresentam evolução (GARCIA et al., 2020). Desta forma, o setor da construção tem adotado cada vez mais os métodos mais eficientes e com menor impacto ambiental, e, por consequência, contribuirão para a sustentabilidade (ARANGO et al., 2019), em especial ao objetivo do desenvolvimento sustentável que tem como foco as cidades e as comunidades sustentáveis (MARANGHI et al., 2020).

Daí o crescimento das investigações científicas, com a finalidade de aprimorar a manufatura aditiva aplicada no setor urbano, conhecida como a técnica *Contour Crafting*, em conjunto com os métodos de construir com materiais cimentícios adequados denominado *3D printing concrete* e *3D printing mortar* (YUAN et al., 2019). A Figura 2 apresenta os desafios alinhados aos fatores estimulantes para o desenvolvimento de materiais cimentícios inovadores.

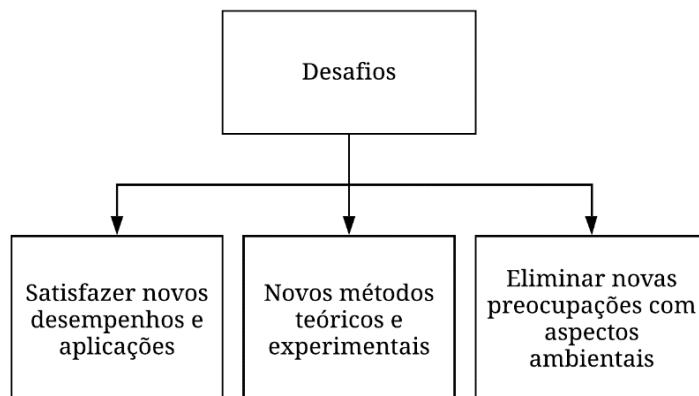


Figura 2 – Fatores estimulantes para o desenvolvimento de materiais cimentícios inovadores.

Fonte: Adaptado de Hamidi e Aslani (2019).

Por esta razão, é imprescindível o desenvolvimento dos novos materiais cimentícios que tragam a aplicação desses novos métodos teóricos e experimentais, além de satisfazerem os novos desempenhos e aplicações em conjunto com a minimização, ou até mesmo, a eliminação das novas preocupações com o aspecto ambiental (HAMIDI; ASLANI, 2019), a fim de tornar esse método cada vez mais eficaz com finalidade de contribuir para a sustentabilidade (ARANGO et al., 2019).

Torna-se então, de importância relevante os estudos que desenvolvam matrizes cimentícias para a manufatura aditiva com foco na sustentabilidade. Os materiais cimentícios para impressão 3D se diferem da argamassa convencional, com relação à capacidade de impressão, o que traz novos requisitos e propriedades em termos de reologia, capacidade de impressão e desempenho mecânico (LU et al., 2019).

Com isso, as incorporações de materiais de reforço ou os que alterem as propriedades são investigados (CHOUGAN et al., 2019), como, por exemplo, as fibras naturais de basalto alinhadas na direção de esforços (MA et al., 2019), cinzas volantes, microssílica e acetato de polivinilo, este último conhecido pela sigla PVA, (SOLTAN; LI, 2018) em matriz cimentícia. Desta forma, a matriz cimentícia é transformada em um material compósito para o processo de impressão pela manufatura aditiva, visando sustentabilidade e otimização nos resultados de desempenho mecânico e propriedades reológicas.

As incorporações de outros materiais na matriz cimentícias podem resultar em otimização nas propriedades mecânicas, funcionando como reforços estruturais em áreas críticas (SOLTAN; LI, 2018) e são exemplos dos avanços deste método construtivo mais sustentável (KARJI et al., 2019), pois a manufatura aditiva apresenta características de uma produção mais limpa e responsável, e, por consequência, pode mitigar os problemas relacionados às mudanças climáticas e promover as infraestruturas resilientes e as cidades sustentáveis (OMER; NOGUCHI, 2019).

4.3.1 NOVOS REQUISITOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA IMPRESSÃO 3D

Em geral, o que difere as matrizes cimentícias convencionais: pastas, argamassas ou concretos (CHOUGAN et al., 2019) constituídas à base de cimento para impressão 3D são os novos requisitos no que tange a capacidade de serem extrudáveis, bombeáveis e de suportarem camadas (LU et al., 2019; WENG et al., 2019).

Esses novos requisitos a serem atingidos surgem por meio de propriedades específicas para os materiais cimentícios com o uso na manufatura aditiva, citado por Yuan et al. (2019), como *printability*. Esse termo refere-se à capacidade de impressão, ou seja, é estudada a eficácia do transporte do material pelo equipamento de extrusão após a preparação da mistura até o assentamento em camadas.

Desta maneira, esta capacidade de impressão inclui os estudos referente a trabalhabilidade (*flowability*), extrudabilidade (*extrudability*), construtibilidade (*buildability*), tempo em aberto (*open time*) e a ligação entre camadas (YUAN et al., 2019).

Por esta razão, o atendimento desses novos requisitos dos materiais cimentícios é um dos maiores desafios até então, pois a extrudabilidade e construtibilidade são essenciais para os materiais cimentícios utilizados para impressão 3D, contudo, se mostram um pouco conflitantes devido a finalidade de cada propriedade (WENG et al., 2019).

A consistência e a extrudabilidade são relacionadas entre si (YUAN et al., 2019). Já que na extrudabilidade, o material deve apresentar uma alta taxa de fluidez inicial, devido à capacidade de impressão e/ou bombeamento sem que haja alguma obstrução (WENG et al., 2019).

No entanto, a construtibilidade é uma propriedade oposta a consistência e extrudabilidade (YUAN et al., 2019), devido que sua finalidade, é a exigência de uma alta taxa de endurecimento inicial, em virtude da necessidade do material ser depositado em camadas na vertical de forma estável (WENG et al., 2019).

A consistência é uma propriedade que mostra destaque nas investigações recentes. De acordo com as normas ASTM C1437/2015 e ASTM C230/C230M/2014 a consistência é uma propriedade do estado fresco, e para Soltan e Li (2018) é fundamental para a capacidade de impressão de materiais cimentícios, mensurada pela fluidez na argamassa por meio do ensaio de índice de consistência.

É observável nos estudos de Ma et al. (2020) e Long et al. (2019) que o índice de consistência possui variação conforme cada amostra e seus resultados após a preparação das misturas decrescem com o passar do tempo. Yuan et al. (2019) adicionam o aditivo superplastificante até o índice de consistência chegar em $230 \pm 5\text{mm}$, ou seja, utilizaram o teste como um ajuste de parâmetro de impressão.

Outro fator apontado no trabalho de Soltan e Li (2018), é a influência da temperatura na trabalhabilidade do material. Mostraram que em uma mesma amostragem o aumento da temperatura reduz a trabalhabilidade e acelera a perda da fluidez em relação ao tempo. E o efeito ocorre ao inverso quando se reduz a temperatura a amostragem é mais fluida e a perda da trabalhabilidade é mais lenta.

Além dessas propriedades citadas, Hager, Golonka e Putanowicz (2016) apontam que as propriedades reológicas e mecânicas devem ser apropriadas para a fabricação de uma matriz cimentícia com capacidade de impressão para a execução de uma edificação, peças arquitetônicas e estruturais.

Para Long et al. (2019), a reologia se remete a evolução das propriedades de viscosidade plástica, tixotropia e a análise da tensão de escoamento desejáveis para alcançar a capacidade de impressão, construtibilidade e resistência a segregação. Na visão de Mazhoud et al. (2019), os requisitos reológicos são ditados durante a impressão no estágio de bombeamento, extrusão e deposição do material e, por fim, estabilidade estrutural.

Em relação a capacidade mecânica, o teste de tração e de compressão são importantes para avaliar o desempenho mecânico das amostras impressas (SOLTAN; LI, 2018). Sabe-se

que os materiais à base de cimento, em geral, possuem limitações mecânicas exibindo comportamento frágil e baixa resistência à tração (CHOUGAN et al., 2019). Ainda, com o sistema de construção tridimensional o material precisa ser autoportante para ser assentado camada por camada (HAGER; GOLONKA; PUTANOWICZ, 2016).

Esta limitação estrutural está sendo avaliada desde as primeiras idades. Como exemplo, Ding et al. (2020) e Weng et al. (2019) investigaram a evolução do desempenho mecânico aos 30 e 90 minutos após a preparação da mistura. Outro ponto mecânico observado pelas investigações de Ma et al. (2019) e de Xiao et al. (2020), é a anisotropia mecânica nos materiais cimentícios impressos, ou seja, cada direção do material impresso possui um resultado mecânico distinto.

Por outro lado, essa anisotropia mecânica pode causar um ganho na resistência mecânica na direção desejada. Nos estudos Ma et al. (2019), o alinhamento de fibras também causou um efeito inibidor em deformações e trincas resultando em um aumento da resistência à tração na direção das fibras alinhadas a propagação de microfissuras para formar macro-rachaduras foi mais lenta, levando a uma maior capacidade de absorção de energia e a resistência à compressão no compósito cimentício.

Também fazem parte dos novos requisitos os parâmetros da manufatura aditiva, que são discutidos em pesquisas recentes e podem ser investigados para matrizes cimentícias utilizadas para impressão 3D, como o sistema completo de impressão sem descontinuidade significativa, no qual inclui a velocidade de impressão e sistema de bombeamento (WENG et al., 2019). Além disso, o tamanho do bocal, bem como, a qualidade de impressão e variáveis em relação à altura e largura das camadas (XIAO et al., 2020; LONG et al., 2019).

Por todos esses novos requisitos mencionados, a dosagem ideal dos materiais cimentícios influencia diretamente o seu comportamento (KRUGER; ZERANKA; ZIJL, 2019). Logo, é interessante analisar as composições dos materiais cimentícios com a finalidade para impressão 3D.

4.4 Composição e desempenho mecânico dos materiais cimentícios para impressão 3D

É evidente que a proporção e a quantidade de matérias-primas que formam os materiais cimentícios para impressão 3D está diretamente ligado ao seu comportamento no estado fresco e endurecido do produto final.

A composição dos materiais cimentícios para impressão 3D ainda estão na fase de desenvolvimento e a proporção de matérias-primas são adotadas para avaliar se a matriz cimentícia é passível de ser utilizada na construção civil.

A Tabela 3 apresenta a proporção de areia adotada em pesquisas que desenvolveram materiais cimentícios para impressão 3D, na qual variou entre 1,24 e 1,71, dentre os autores pesquisados. Nota-se que a proporção 1,5 além de ser a intermediária, também foi a mais usada.

Tabela 3 – Proporção de areia em relação ao cimento em materiais cimentícios para impressão 3D

Proporção de Areia	Autores
1,24	Khalil et al. (2017)
1,38	Baz et al. (2020)
1,5	Marchment; Sanjayan; Xia (2019); Mazhoud et al (2019); Yuan et al. (2019)
1,67	Long et al. (2019)
1,71	Ma et al. (2019)

Fonte: Autora (2020).

É possível identificar que a água é uma das variáveis importantes, uma vez que os autores, Long et al. (2019), Mazhoud et al (2019) e Baz et al. (2020), investigam diversos valores do fator água/cimentício, e ainda, mostraram a interferência da água na resistência, secagem, trabalhabilidade e dosagem de aditivo superplasticificante. Dentre os autores citados, a proporção de água em relação ao cimento ou aglomerantes apresentou uma variação de 0,27 até 0,46 (Tabela 4).

Tabela 4 – Proporção de água em materiais cimentícios para impressão 3D

Água (*)	Autores
0,27	Long et al. (2019)
0,30	Long et al. (2019); Weng et al. (2019)
0,33	Long et al. (2019)
0,35	Long et al. (2019); Yuan et al. (2019); Khalil et al. (2017)
0,36	Marchment; Sanjayan; Xia (2019)
0,38	Ma et al. (2019); Mazhoud et al (2019)
0,39	Mazhoud et al (2019)
0,40	Baz et al (2020); Mazhoud et al (2019)
0,41	Mazhoud et al (2019)
0,42	Mazhoud et al (2019)
0,437	Mazhoud et al (2019)
0,45	Baz et al (2020)
0,46	Mazhoud et al (2019)

Fonte: Autora (2020).

A porcentagem de aditivo superplasticificante, verificada em estudos sobre impressão 3D variou entre 0,26 e 3,00 em relação a quantidade de cimento (Tabela 5).

Tabela 5 – Porcentagem de aditivo superplastificante sobre a massa do cimento encontrados em materiais cimentícios para impressão 3D

Aditivo Superplastificante (%)	Autores
0,26	Baz et al. (2020); Khalil et al. (2017)
0,30	Marchment; Sanjayan; Xia (2019)
0,36	Baz et al. (2020)
0,40	Baz et al. (2020); Soltan e Li (2018)
0,58	Long et al. (2019)
1,80	Ma et al. (2019)
3,00	Mazhoud et al (2019)

Fonte: Autora (2020).

Há estudos que inserem outras matérias-primas e/ou aditivos (KRUGER; ZERANKA; ZIJL, 2019), ainda podem conter outros materiais considerados materiais de reforço para alguns autores, como na pesquisa de Ma et al. (2019). E nesta agregação de novos materiais em sua matriz de referência são denominados compósitos.

A saber, os materiais compósitos são classificados em relação ao material da matriz (polímero, cerâmica ou metal), ao material de reforço (fibras, composto em chapas ou partículas), a escalas nanométricas (nanocompósitos) e à degradação (biocompósito) (RAJAK et al., 2019). Com a inserção de materiais de reforço, as matrizes cimentícias se tornam compósitos de matriz cimentícia (RAJAK et al., 2019).

A partir do século XX, os materiais compósitos vêm se introduzindo em diversas áreas, tais como aeroespacial, automotiva, construção, biomédica e outras. Os materiais compósitos são formados por uma combinação de materiais de matriz e de reforço, podendo ser utilizado material natural e sintético (RAJAK et al., 2019).

Os aditivos em materiais cimentícios influenciam na trabalhabilidade, na resistência mecânica e na durabilidade do produto (CHOUGAN et al., 2019). A saber, o superplastificante pode melhorar as propriedades reológicas dos materiais cimentícios (KRUGER; ZERANKA; ZIJL, 2019).

No entanto, o desempenho mecânico dos compósitos dependerá da resistência de união entre o material de reforço e a matriz cimentícia (ANDREW et al., 2019). Ma et al. (2019) desenvolveram compósitos de matriz cimentícia com adição de fibra de basalto que constataram um ganho na resistência à flexão. Também, a utilização de fibras alinhadas em compósitos cimentícios para filamento de impressão 3D podem aumentar a tração na direção da extrusão (SOLTAN; LI, 2018).

Nos estudos de Soltan e Li (2018) foram realizadas cinco dosagens de compósitos de matriz cimentícia, dentre os materiais utilizados, o cimento de aluminato de cálcio apresentou

eficiência na manipulação da taxa de endurecimento. A microssílica e a sílica moída substituíram parcialmente a areia e a incorporação de nanoargila de atapulgita mostraram reduzir a fluidez e o tempo de endurecimento.

Logo, os materiais compósitos e/ou reforçados podem ter êxito nas áreas críticas das estruturas, por meio da otimização dessas propriedades (SOLTAN; LI, 2018). Por outro lado, é de suma importância os estudos que desenvolvam compósitos de matriz cimentícia para a manufatura aditiva com foco na sustentabilidade. Há pesquisas recentes, que utilizaram a inserção de fibras alinhadas de basalto (MA et al., 2019), e de PVA (SOLTAN; LI, 2018) em matriz cimentícia para a produção de um novo compósito para a manufatura aditiva, visando sustentabilidade e aprimoramento nos resultados de desempenho mecânico.

Nos estudos de Ma et al. (2019) foi determinado o teor ótimo de fibras de basalto de 0,5% para o compósito cimentício com o uso do cimento de endurecimento rápido, para a extrusão do filamento de impressão 3D.

Nesta pesquisa referida, foi realizado o ensaio de flexão para as incorporações de 0%, 0,1%, 0,3%, 0,5% e 0,7% de fibra de basalto em um compósito cimentício. Foi possível determinar que a mistura com 0,7% obteve maior resistência mecânica. No entanto, quanto maior a porcentagem de fibras de basalto, menor a fluidez do composto de cimento e maior o risco de bloqueio. O teste para verificar a fluidez da extrusão do composto de cimento com o percentual de 0,7%, as fibras de basalto causaram um bloqueio no bocal da extrusora, o que não viabilizou o processo de extrusão (MA et al., 2019).

Os estudos de Soltan e Li (2018) mostram que o grau de alinhamento das fibras seja provavelmente reduzido à medida que o comprimento do filamento é aumentado e ainda as características do bocal da extrusão influência no grau de alinhamento. O *design* do bocal de extrusão do compósito pode melhorar o alinhamento das fibras que pode trazer vantagens como o reforço das áreas críticas das estruturas e otimização das propriedades mecânicas para uma determinada estrutura ou parte. Há um aumento no desempenho do material quando o alinhamento das fibras está na direção da força de tração, ou seja, as fibras são preferencialmente alinhadas na direção da extrusão do filamento. Isso pode ser explicado pelo fato em que a dimensão do filamento possui restrição e à direção do fluxo está associada ao processo de extrusão.

O Quadro 1 apresenta os resultados mecânicos observados em pesquisas acerca de compósitos de matriz cimentícia utilizados para a manufatura aditiva.

Quadro 1 – Principais incorporações e resultados mecânicos de compósitos de matriz cimentícia para manufatura aditiva.

Principais Incorporações	Principais Resultados	Autores
Fibra de basalto	O teste de extrudabilidade com 0,7% de fibra de basalto apresentou um bloqueio no bocal de extrusão. Com um teor ótimo de 0,5% de fibra de basalto resultou em bom desempenho mecânico.	Ma et al. (2019)
Cinzas Volantes; Cimento de aluminato de cálcio; Microssílica; Nanoargila de atapulgita	São eficazes na manipulação da taxa de endurecimento e fluidez precoce. Obteve uma dosagem promissora, com resistência à tração e a resistência à compressão média de 6 MPa e 30 MPa, respectivamente.	Soltan e Li (2018)
Magnésia; cinza volante, bórax; microssílica	As misturas investigadas apresentaram bom desempenho mecânico com idade inicial de resistência a compressão superior a 1MPa aos 30 min e 4MPa aos 90 min.	Weng et al. (2019)
Óxido de coloração; aditivo superplastificante	A resistência à compressão aos 7 dias das misturas realizadas variou de 34 a 53,4 MPa. Já a Resistência à tração entre as camadas de ligação variou entre 0,27 a 0,43 MPa. Este aumento se justifica pela dispersão de partículas do cimento associada ao superplastificante.	Marchment; Sanjayan; Xia. (2019)
Cimento de sulfoaluminoso; aditivo superplastificante	Obtiveram ótimos resultados na resistência à compressão de 79 MPa.	Khalil et al. (2017)

Fonte: Autora (2020).

Nota-se que a inserção de novos materiais para formação de compósitos de matriz cimentícia podem contribuir para a fabricação dos mesmos. A saber, as nanopartículas podem melhorar as características do material para a aplicação na manufatura aditiva, como por exemplo, nos estudos Kruger; Zeranka e Zijl (2019), a incorporação de nanosílica melhorou a capacidade de construção do material para impressão em concreto 3D.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1437**: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C1437-20

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C230 / C230M**: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0230_C0230M-20

- ANDREW, J. Jefferson et al. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review. **Composite Structures**, v. 224, p. 111007, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111007>
- ARANGO, D. C. et al. Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1322-1337, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.216>
- BAZ, Bilal; AOUAD, Georges; REMOND, Sébastien. Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3D printed elements. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117002, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117002>
- BUCHANAN, Craig; GARDNER, Leroy. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. **Engineering Structures**, v. 180, p. 332-348, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>
- BUSH, Judy; DOYON, Andréanne. Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute?. **Cities**, v. 95, p. 102483, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483>
- BÜYÜKÖZKAN, Gülcin; GÖÇER, Fethullah. Digital Supply Chain: Literature review and a proposed framework for future research. **Computers in Industry**, v. 97, p. 157-177, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.010>
- CABRAL, Laíse do Nascimento; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO08>
- CARVALHO, Michele Tereza Marques; CALDAS, Lucas Rosse; SPOSTO, Rosa Maria. Avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social a partir da especificação de materiais e elementos de edificação. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 17155, 2020. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.17155>.
- CHAMOSO, Pablo et al. Smart city as a distributed platform: Toward a system for citizen-oriented management. **Computer Communications**, v. 152, p. 323-332, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.059>
- CHOUGAN, Mehdi et al. A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116701, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116701>
- CIRAUD, P. **Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus beliebigem schmelzbarem Material.** German patent n. 2263777, priority filed December 28th, 1971, published July 5th, 1973.
- COSENZA, José Paulo; DE ANDRADE, Eurídice Mamede; DE ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 16147, 2020. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16147>.

CRUMP, S. Scott. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects.** U.S. Patent n. 5,121,329, 9 jun. 1992.

DALLASEGA, Patrick; RAUCH, Erwin; LINDER, Christian. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 99, p. 205-225, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.039>

DECKARD, Carl R. **Method and apparatus for producing parts by selective sintering.** U.S. Patent n. 4,863,538, 5 set. 1989.

DE SCHUTTER, Geert et al. Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 25-36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

DING, Tao et al. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118654>

DING, Zhikun et al. A digital construction framework integrating building information modeling and reverse engineering technologies for renovation projects. **Automation in Construction**, v. 102, p. 45-58, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.012>

EL-SAYEGH, S.; ROMDHANE, L.; MANJIKIAN, S. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 20, n. 2, p. 1-25, 2020. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>

FURET, Benoit; POULLAIN, Philippe; GARNIER, Sebastien. 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 58-64, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.002>

GARCIA, M. J. et al. Sensitivity of green spaces to the process of urban planning. Three case studies of Madrid (Spain). **Cities**, v. 100, p. 102655, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2020.102655>

GAVRILIDIS, Athanasios-Alexandru et al. Planning the “unknown”: Perception of urban green infrastructure concept in Romania. **Urban Forestry & Urban Greening**, p. 126649, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126649>

GHAFFAR, Seyed Hamidreza; CORKER, Jorge; FAN, Mizi. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. **Automation in Construction**, v. 93, p. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>

GREER, Fiona et al. Energy and water efficiency in LEED: How well are LEED points linked to climate outcomes?. **Energy and Buildings**, v. 195, p. 161-167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.010>

GUO, H.; LV, R.; BAI, S. Recent advances on 3D printing graphene-based composites. **Nano Materials Science**, v. 1, p. 101-115, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.03.003>

HAGER, I. GOLONKA, A. PUTANOWICZ, R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? **Procedia Engineering**, vol. 151, 292 – 299, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>

HAMIDI, F.; ASLANI, F. Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 582-609, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140>

HOUSHOLDER, Ross F. **Molding process**. U.S. Patent n. 4,247,508, 27 jan. 1981.

HULL, C. W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. US Pat. 4,575,330 1–16. 1986.

JALAEI, Farzad; JALAEI, Farnaz; MOHAMMADI, Sepehr. An integrated BIM-LEED application to automate sustainable design assessment framework at the conceptual stage of building projects. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101979, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101979>

KARJI, A. et al. Assessment of Social Sustainability Indicators in Mass Housing Construction: A Case Study of Mehr Housing Project. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, p. 101697, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101697>

KHALIL, Noura et al. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 382-391, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>

KHOSHNEVIS, B. **Additive fabrication apparatus and method**. U.S. Patent n. 5,529,471, 25 jun. 1996.

KHOSHNEVIS, B. **Deployable contour crafting**. U.S. Patent n. 7,814,937, 19 out. 2010.

KODAMA, Hideo. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. **Review of scientific instruments**, v. 52, n. 11, p. 1770-1773, 1981. <https://doi.org/10.1063/1.1136492>

KRUGER, Jacques; ZERANKA, Stephan; VAN ZIJL, Gideon. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 372-386, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078>

LABONNOTE, Nathalie et al. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. **Automation in construction**, v. 72, p. 347-366, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>

LA ROSA, Daniele; PAPPALARDO, Viviana. Planning for spatial equity-A performance based approach for sustainable urban drainage systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101885, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2019.101885>

LASLETT, Dean; URMEE, Tania. The effect of aggregation on city sustainability rankings. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106076, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106076>

LAZZARETTI, Kellen et al. Cidades inteligentes: insights e contribuições das pesquisas brasileiras. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, p. e20190118, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190118>

LIANG, Yue et al. Planning for urban life: A new approach of sustainable land use plan based on transit-oriented development. **Evaluation and Program Planning**, p. 101811, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2020.101811>

LONG, Wu-Jian et al. Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118054, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118054>

LU, Bing et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 477-490, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>

MA, Guowei et al. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118305, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118305>

MA, Guowei et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 770-783, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>

MARANGHI, Simone et al. Integrating urban metabolism and life cycle assessment to analyse urban sustainability. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106074, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106074>

MARCHMENT, Taylor; SANJAYAN, Jay; XIA, Ming. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. **Materials & Design**, v. 169, p. 107684, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107684>

MAROPO, Vivianne Lisbethe Bezerra et al. Planejamento urbano sustentável: um estudo para implantação de infraestrutura verde no Bairro Bancários, João Pessoa-PB, Brasil. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO09>

MATEOS, Rosa María et al. Integration of landslide hazard into urban planning across Europe. **Landscape and urban planning**, v. 196, p. 103740, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103740>

MAZHOUUD, Brahim et al. Underwater 3D printing of cement-based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 458-467, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.134>

MECHTCHERINE, Viktor et al. Large-scale digital concrete construction—CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in construction**, v. 107, p. 102933, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>

MOEINI, Mohammad Amin; HOSSEINPOOR, Masoud; YAHIA, Ammar. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119551, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119551>

OLIVEIRA, Jairo Cardoso de; FARIA, Ana Cristina de. Impacto econômico da construção sustentável: a reforma do Estádio do Mineirão. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.001.AO06>

OMER, Mohamed AB; NOGUCHI, Takafumi. A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs). **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101869, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101869>

OPOKU, Alex. Biodiversity and the built environment: Implications for the Sustainable Development Goals (SDGs). **Resources, conservation and recycling**, v. 141, p. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.011>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Traduzido pelo UNIC Rio e revisado pela CGDES do Ministério das Relações Exteriores do Brasil. Última edição em 11 de fevereiro de 2016. Disponível em:
[<http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf>](http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf). Acesso em 29/11/2020.

PARDO-BOSCH, Francesc; CERVERA, Carles; YSA, Tamyko. Key aspects of building retrofitting: Strategizing sustainable cities. **Journal of environmental management**, v. 248, p. 109247, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.07.018>

PHUYAL, S.; BISTA, D.; BISTA, R. Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review. **Sustainable Futures**, v. 2, p. 100023, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100023>

POULLAIN, Philippe et al. On site deployment of 3D printing for the building construction—The case of YhnovaTM. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018, v. 163, p. 01001, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201816301001>

RAJAGURU, K.; KARTHIKEYAN, T.; VIJAYAN, V. Additive manufacturing—State of art. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 628-633, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.728>

RAJAK, Dipen Kumar et al. Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 6354-6374, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>

RAJAN, Amala et al. 3D Printing of Buildings in UAE: Success and Failure factors. In: **2018 Fifth HCT Information Technology Trends (ITT)**. IEEE, 2018. p. 368-372. DOI: 10.1109/CTIT.2018.8649541

SAIEG, Pedro et al. Interactions of building information modeling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: a systematic review. **Journal of cleaner production**, v. 174, p. 788-806, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.030>

SAKIN, M.; KIROGLU, Y. C. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. **Energy Procedia**, v. 134, p. 702-711, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>

- SALET, T. A. M. et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 3, p. 222-236, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>
- SCHMIDT, Michael et al. Laser based additive manufacturing in industry and academia. **Cirp Annals**, v. 66, n. 2, p. 561-583, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.011>
- SHEALY, Tripp. Do sustainable buildings inspire more sustainable buildings?. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 412-419, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.008>
- SOLTAN, Daniel G.; LI, Victor C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 90, p. 1-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017>
- SOUZA, Marcelo Tramontin et al. 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. **Journal of Building Engineering**, p. 101833, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101833>
- SWAINSON, Wyn Kelly. **Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product**. U.S. Patent n. 4,041,476, 9 ago. 1977.
- WANGLER, Timothy et al. Digital concrete: opportunities and challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 67-75, 2016. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16
- WENG, Yiwei et al. Feasibility study on sustainable magnesium potassium phosphate cement paste for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 595-603, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.053>
- WILHITE, Ray; WÖLFEL, Inga. 3D Printing for veterinary anatomy: An overview. **Anatomia, histologia, embryologia**, v. 48, n. 6, p. 609-620, 2019. <https://doi.org/10.1111/ahe.12502>
- XIAO, Jianzhuang et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101779, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101779>
- YUAN, Q. et al. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116600, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.326>

6 ARTIGO 1

ANÁLISES PRELIMINARES DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUBMETIDOS A EXTRUSÃO EM PROTÓTIPO DE IMPRESSÃO 3D

PRELIMINARY ANALYSIS OF CEMENTITIOUS COMPOSITES SUBJECTED TO EXTRUSION IN 3D PRINTING PROTOTYPE

ANÁLISIS PRELIMINAR DE MATERIALES COMPUESTOS DE CEMENTO SOMETIDOS A EXTRUSIÓN EN UN PROTOTIPO DE IMPRESIÓN 3D

Lilian Keylla Berto¹, Maicon Douglas Leles da Silva¹, Lívia Fernanda Silva², Berenice Martins Toralles², Luciana Cristina Soto Herek Rezende^{1,3,*}

¹Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar – Unicesumar, Av. Guedner, 1610, Jardim Aclimação, CEP 87.050-900, Maringá – PR.

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina – UEL, Rodovia Celso Garcia C, KM 380, Londrina-Paraná, Brasil.

³Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação – ICETI, Av. Guedner, 1218, CEP 87.050-390, Maringá – PR

*Autor para correspondência: luciana.rezende@unicesumar.edu.br

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio institucional da Universidade Cesumar (UNICESUMAR), que garantiu bolsa integral para a produção desta pesquisa. Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao apoio à pesquisa do Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação – ICETI e Universidade Cesumar – Unicesumar.

DECLARAÇÃO

Todos os autores abaixo relacionados declaram a participação direta no desenvolvimento do artigo intitulado “**ANÁLISES PRELIMINARES DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS SUBMETIDOS A EXTRUSÃO EM PROTÓTIPO DE IMPRESSÃO 3D**” e que não está em revisão para publicação em outro periódico.

Declararam também que o texto foi revisado cuidadosamente para eliminar erros de gramática e ortografia e que não existe conflito de interesse.

Autor	ORCID	Participação	Assinatura
Lilian Keylla Berto	https://orcid.org/0000-0003-0343-9433	Desenvolvimento do trabalho experimental	
Maicon Douglas Leles da Silva	https://orcid.org/0000-0002-7176-6033	Desenvolvimento do trabalho experimental	
Lívia Fernanda Silva	https://orcid.org/0000-0002-1798-6828	Auxílio na interpretação dos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade	
Berenice Martins Toralles	https://orcid.org/0000-0001-8828-7250	Auxílio na interpretação dos ensaios no estado fresco e na estruturação do artigo	
Luciana Cristina Soto Herek Rezende	https://orcid.org/0000-0001-9677-4139	Orientadora do trabalho, responsável pela correção e estruturação do artigo	

Resumo - A manufatura aditiva apresenta oportunidades e desafios no setor construtivo, visando atender aos novos requisitos para materiais cimentícios. Assim, este trabalho teve por objetivo analisar preliminarmente compósitos cimentícios extrudados por meio de protótipo de impressora 3D em escala de bancada. O ensaio de extrudabilidade analisou a capacidade de extrusão e de impressão na horizontal em 4 amostras com traços distintos, já a construtibilidade investigou a capacidade de impressão na vertical nas amostras que não apresentaram falhas anteriormente. Dos resultados referentes a extrusão e construção de camadas na horizontal e vertical, definiu-se a mistura que apresentou o traço considerado promissor a ser aplicado no protótipo de impressão 3D de bancada e, para esta amostra foram realizados ensaios físicos preliminares. Os resultados referentes a consistência da amostra compatível sofreram queda conforme aumentava-se o tempo de mistura, isto possivelmente, ao fato de a mistura ter sofrido retenção de água (86,46%), ao longo do tempo, diminuindo a trabalhabilidade da amostra. A tensão de escoamento pelo aparelho de Vicat apresentou aumento nos minutos finais do teste, indicando que a amostra tem capacidade de resistir à deposição de camadas superiores. Portanto, o compósito cimentício desenvolvido e avaliado é considerado promissor para ser aplicado na manufatura aditiva.

Palavras-chave: Construção 3D. Construtibilidade. Extrudabilidade. Manufatura aditiva.

Resumen - La fabricación aditiva presenta oportunidades y retos en el sector de la construcción, con el objetivo de satisfacer los nuevos requisitos de los materiales cementantes. Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo analizar preliminarmente los compuestos cementicios extruidos por medio de un prototipo de impresora 3D a escala de banco. La prueba de extrudabilidad analizó la capacidad de extrusión e impresión horizontal en 4 muestras con diferentes rasgos, mientras que la constructibilidad investigó la capacidad de imprimir verticalmente en muestras que no mostraron fallos previamente. A partir de los resultados relativos a la extrusión y a la construcción de capas en sentido horizontal y vertical, se definió la mezcla que presentaba la traza considerada prometedora para ser aplicada en el prototipo de banco de impresión 3D y, para esta muestra, se realizaron pruebas físicas preliminares. Los resultados relativos a la consistencia de la muestra compatible disminuyeron a medida que aumentaba el tiempo de mezclado, posiblemente debido a que la mezcla sufrió una retención de agua (86,46%) con el paso del tiempo, disminuyendo la trabajabilidad de la muestra. El límite elástico por el aparato de Vicat mostró un aumento en los últimos minutos de la prueba, lo que indica que la muestra tiene la capacidad de resistir la deposición de capas superiores. Por lo tanto, el compuesto cementoso desarrollado y evaluado se considera prometedor para ser aplicado en la fabricación aditiva.

Palabras clave: construcción en 3D. La constructibilidad. Extrudibilidad. Fabricación aditiva.

Abstract - Additive manufacturing presents opportunities and challenges in the construction sector, aiming to meet the new requirements for cementitious materials. Thus, this work aimed to preliminarily analyze extruded cementitious composites using a bench-scale 3D printer prototype. The extrudability test analyzed the extrusion and horizontal printability in 4 samples with distinct traits, and the constructability test investigated the vertical printability in samples that had not previously failed. From the results regarding the extrusion and construction of horizontal and vertical layers, it was defined the mixture that presented the trace considered promising to be applied in the benchtop 3D printing prototype and, for this sample, preliminary physical tests were performed. The results concerning the consistency of

the compatible sample decreased as the mixing time increased, possibly due to the fact that the mixture suffered water retention (86.46%) over time, decreasing the workability of the sample. The yield stress by Vicat apparatus showed an increase in the final minutes of the test, indicating that the sample has the ability to resist the deposition of higher layers. Therefore, the developed and evaluated cementitious composite is considered promising to be applied in additive manufacturing.

Keywords: 3D Construction. Constructability. Extrudability. Additive manufacturing

Introdução

No contexto mundial, é notório que a inovação tem ganhado espaço e tornado uma resposta para o fortalecimento das metodologias tradicionais, pois os avanços dos métodos construtivos mais sustentáveis apresentam características de uma produção mais limpa e responsável (Karji et al. 2019; Omer e Noguchi 2019).

A inserção de métodos de fabricação mais sustentáveis provoca mudanças que contribuem para reduzir impactos ambientais negativos (Karji et al. 2019), em virtude da busca em mitigar os problemas relacionados às mudanças climáticas e em promover as infraestruturas resilientes e tornar as cidades sustentáveis (Omer e Noguchi 2019).

Uma das inovações que tem ganhado destaque em diversas áreas é a manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D. Está presente na biomedicina, na aeronáutica e nas engenharias de forma geral (Guo et al. e 2019), com destaque para a engenharia civil (Lu et al., 2019).

É evidente que as novas tecnologias geram oportunidades e desafios para a construção civil, como a técnica de fabricação digital (*digital fabrication*), que deixa de lado métodos tradicionais, aquela com fôrmas e modelagem padrão, e traz mudanças inteligentes com modelagem em malhas (Yuan et al. 2019).

De acordo com (Souza et al. 2020), a impressão 3D em edifícios é uma tecnologia que torna o processo construtivo mais limpo e pode ser classificado como ecologicamente correto, no entanto, há divergências e discussão sobre essa visão (Wangler et al. 2016; Labonne et al. 2016; De Schutter et al. 2018).

Por outro lado, um dos maiores desafios no setor construtivo ainda é o desenvolvimento de materiais cimentícios que possuam propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, podendo ser impressas por meio da técnica *Contour Crafting* (Hager et. al. 2016) e/ou em métodos como, por exemplo, o denominado *3D printing concrete* (Yuan et al. 2019).

Nesse sentido vem surgindo termologias para denominar compósitos cimentícios para uso na manufatura aditiva, como, por exemplo, *Additive Mortar* (Ma et al. 2020) e *3D printing mortar* (Khalil et al. 2017; Yuan et al. 2019; Ding et al. 2020; Xiao et al. 2020).

Distingue-se os materiais cimentícios para uso na manufatura aditiva pelos novos requisitos a serem atingidos, citado por (Yuan et al. 2019), como *printability*. Esse termo refere-se à capacidade de impressão, ou seja, é estudada a eficácia do transporte do material pelo sistema de extrusão após a preparação da mistura até o assentamento em camadas.

Desta forma, esta capacidade de impressão inclui os estudos referente a consistência, extrudabilidade, construtibilidade, tempo de abertura e a ligação entre camadas (Yuan et al. 2019).

Por esta razão, o atendimento desses novos requisitos dos materiais cimentícios para impressão 3D é um dos maiores desafios até então, pois a consistência e a extrudabilidade estão relacionadas entre si (Yuan et al. 2019). Já que na extrudabilidade, o material deve apresentar uma alta taxa de fluidez inicial, devido à capacidade de impressão e/ou bombeamento sem que haja alguma obstrução (Weng et al. 2019).

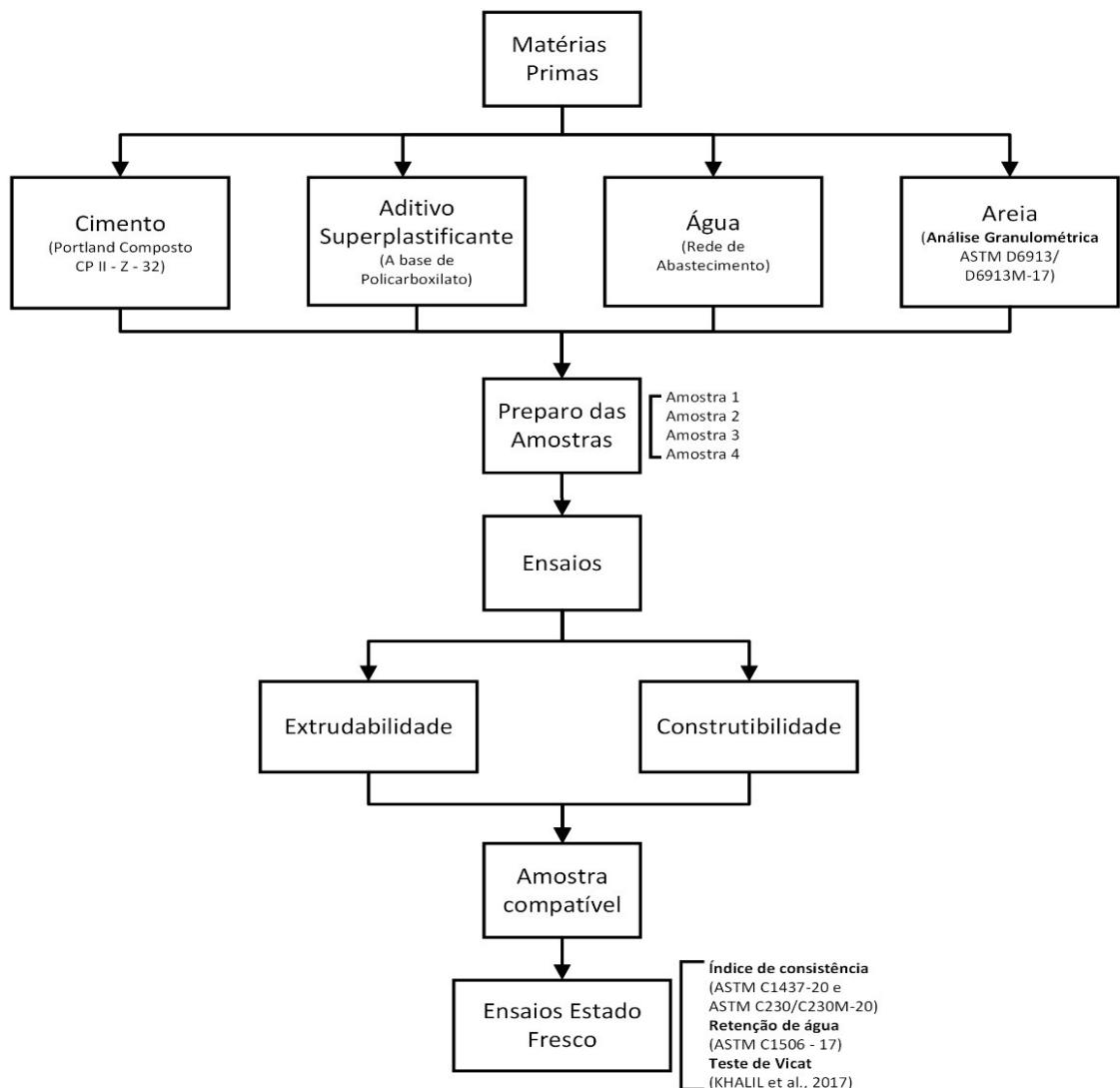
No entanto essas propriedades se mostram conflitantes com a construtibilidade, na qual sua finalidade é a exigência de uma alta taxa de endurecimento inicial em virtude da necessidade do material ser depositado em camadas na vertical de forma estável (Weng et al. 2019), ou seja, estas propriedades são opostas em relação a cada finalidade (Yuan et al. 2019).

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo a análise preliminar de extrusão de compósitos cimentícios através de um protótipo de impressora 3D de bancada.

Materiais e Métodos

A Figura 1 discorre o caminho metodológico seguido nesta pesquisa. Após a seleção das matérias-primas, foi realizada a caracterização granulométrica da areia (ASTM D6913/D6913M - 17), utilizada na fabricação das amostras de compósitos cimentícios. Após o preparo das amostras, deu-se sequência nos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade para se obter uma amostra de um compósito cimentício compatível para uso em protótipo de impressão 3D de bancada. Este compósito cimentício foi analisado com relação aos ensaios no estado fresco.

Figura 1. Metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.



Confecção dos compósitos cimentícios para impressão 3D

Para o desenvolvimento das amostras dos compósitos cimentícios foi utilizado cimento Portland composto CP II – Z - 32 (Votoran); água, proveniente da rede de abastecimento e aditivo superplastificante a base de policarboxilato.

A areia foi adquirida no comércio local, e seca em estufa (110 ± 5 °C) até massa constante. O ensaio granulométrico foi realizado com um agitador de peneiras eletromagnético Bertel (modelo VP-01), segundo a (ASTM D6913/D6913M – 17).

Para este ensaio utilizou-se uma série de peneiras de malhas 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm e 0,15 mm (NBR NM – ISO 3310-1). O material passante na malha

de diâmetro de 1,18 mm foi utilizado para o preparo das amostras utilizadas nesta pesquisa, denominadas 1, 2, 3 e 4.

Após a caracterização, deu-se sequência no trabalho para a definição das quantidades dos materiais que seriam utilizados no preparo das amostras. Essas proporções foram baseadas na literatura conforme apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Matérias-primas utilizadas nos compósitos cimentícios para impressão 3D.

Matérias-primas	Faixa de variação (*)	Autores
Areia	1,24 – 1,71	Baz et al. 2020; Long et al. 2019; Ma et al. 2019; Marchment et. al. 2019; Mazhoud et al 2019; Yuan et al. 2019; Khalil et al. 2017.
Água	0,27 – 0,46	Baz et al. 2020; Long et al. 2019; Ma et al. 2019; Marchment et. al. 2019; Mazhoud et al 2019; Weng et al. 2019; Yuan et al. 2019; Khalil et al. 2017.
Aditivo Superplastificante (%)	0,26 – 3,00	Baz et al. 2020; Long et al. 2019; Ma et al. 2019; Marchment et. al. 2019; Mazhoud et al 2019; Soltan e Li 2018.

* Faixa de variação da proporção de matérias-primas em relação aos cimentícios.

Com base nos levantamentos realizados na literatura (Tabela 1) ao todo foram preparadas 4 amostras (Tabela 2). Os materiais constituintes secos, foram fixados na proporção 1:1,5 (cimento:areia), baseados nos autores (Marchment et. al. 2019, Mazhoud et al. 2019 e Yuan et al. 2019) com variação no fator água/cimento (A/C) e na proporção em porcentagem em relação ao cimento de aditivo superplastificante (SP).

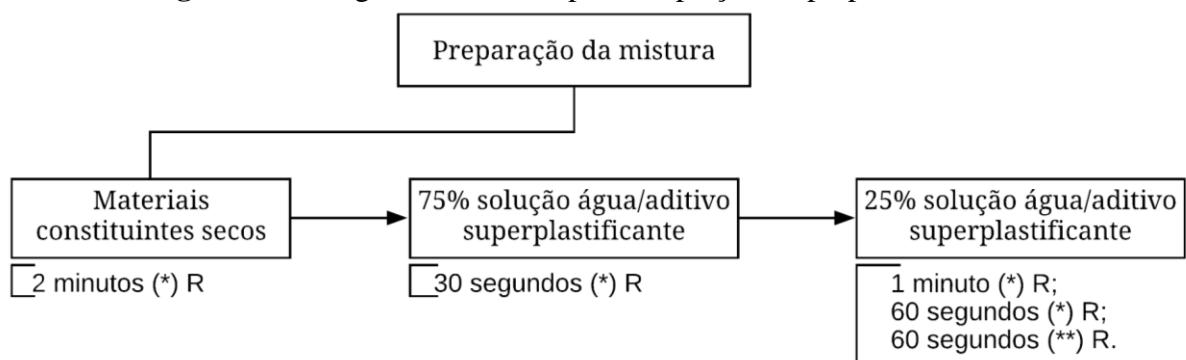
Tabela 2. Proporção de materiais para o desenvolvimento dos compósitos cimentícios

Amostras	Cimento	Areia	Água (A/C)	Aditivo Superplastificante (%)
1	1	1,5	0,33	0,23
2	1	1,5	0,33	0,24
3	1	1,5	0,33	0,25
4	1	1,5	0,35	0,25

O preparo das amostras iniciou-se com a pesagem das matérias-primas em balança eletrônica (Solotest, modelo BG 2000, com precisão de 0,01g e capacidade de 2020g). Para a dispersão mecânica das matérias-primas foi utilizado um misturador da marca OBRK, com capacidade de cinco litros. Os materiais constituintes secos foram adicionados na quantidade de 1 kg de cimento e 1,5 kg de areia, perfazendo um total de 2,5 Kg.

Realizou-se uma adaptação da norma brasileira ABNT NBR 16.541:2016 (Figura 2).

Figura 2. Fluxograma realizado para adaptação do preparo da mistura.



(*) Velocidade baixa (140 ± 5 r / min).

(**) Velocidade alta (285 ± 10 r / min).

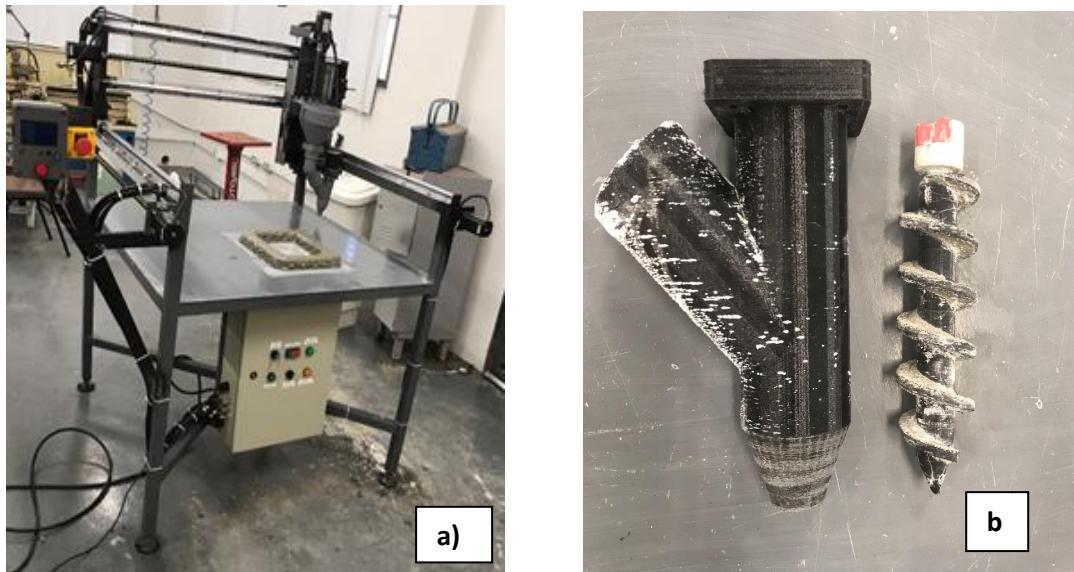
R – Rasparem nas laterais e fundo, inclusive na pá do misturador.

Ensaios de Extrudabilidade e de construtibilidade

Os ensaios de extrudabilidade e construtibilidade foram realizados em uma impressora 3D em escala de bancada para matrizes cimentícias (Figura 3).

A estrutura da impressora contém 3 eixos de dimensões de 1,10 m, na direção X e Y, e, 0,50 m na direção Z. A automatização da impressora foi dada por um conjunto de cinco motores NEMA 23, com 30 kgf.cm, cinco drivers 9-42V 4A TB6600 (dois na direção Y e um na extrusora, na direção X e Z) e uma fonte chaveada de 24 Volts e 30 Amperes. O movimento nas três direções, além desse conjunto, foi dado por guias lineares do tipo de 20 mm, fuso trapezoidal de passo de 4 mm, acoplamento flexível e acessórios (Figura 3 a). O bocal de 10 mm, que teve por finalidade depositar o material de forma contínua por meio de uma rosca sem fim com eixo de aproximadamente 12 cm foi apresentado na Figura 3 b.

Figura 3 – Protótipo de impressora 3D de compósitos cimentícios em escala de bancada.



a) Impressora 3D em escala de bancada para compósitos cimentícios; b) Peça pertencente a extrusora com bocal de 10 mm de diâmetro.

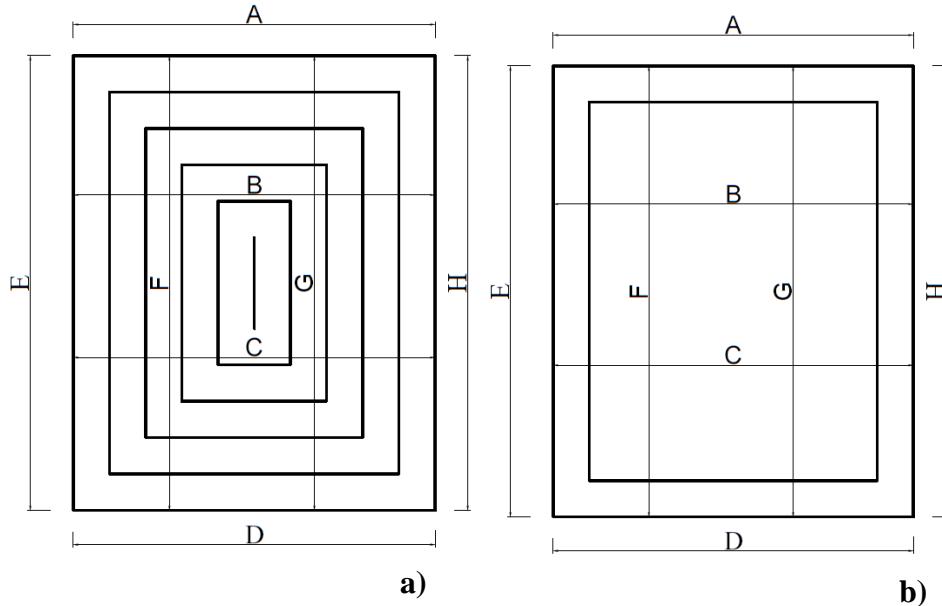
Para a impressão das amostras foram utilizadas duas configurações, a A (amostras 1, 2 e 3) e a B (amostra 4). Os parâmetros utilizados em cada uma das configurações estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros utilizados na impressão das amostras nas configurações A e B.

Parâmetros	Configuração A	Configuração B
Velocidade de impressão (mm/s)	995	995
Padrão de preenchimento	Linhas concêntricas	Linhas
Padrão do suporte	Grades	Grades
Espaçamento entre linhas (mm)	30	0
Altura da camada (mm)	5	5
Largura (mm)	200	250
Comprimento (mm)	250	300

A Figura 5 (a) e 5 (b) apresenta as aferições realizadas nas amostras após as impressões, referentes à largura e ao comprimento.

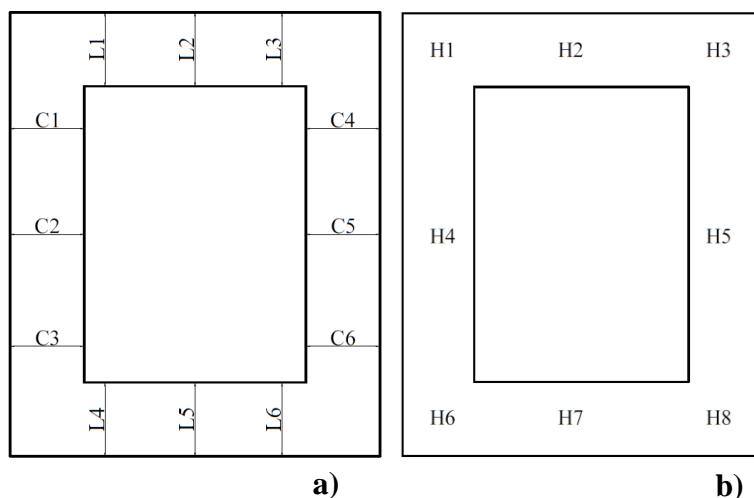
Figura 5. Esquema dos locais de aferição das amostras em largura e comprimento.



- a) Configuração A (amostras 1, 2 e 3); b) Configuração B (amostra 4).

O teste de construtibilidade foi realizado na configuração B (Figura 6) com a quantidade de compósito cimentício realizada em duplicata para a preparação das amostras 3 e 4. Neste teste, a impressora foi programada para realizar 10 camadas de 5 mm, resultando em 50 mm de altura. Ao final da impressão de cada amostra investigada, foram realizadas medições referentes a largura e altura nos quatro cantos e centro de cada linha, como está apresentado com letras e números e em cotas na Figura 6.

Figura 6. Medidas aferidas utilizando a configuração B.



- a) horizontais; b) verticais.

Ensaios no estado fresco de compósitos cimentícios para impressão 3D

Índice de consistência

O índice de consistência foi realizado utilizando uma mesa de ensaio, um molde tronco cone com dimensões de 125x80x65mm e um soquete cilíndrico para compósitos cimentícios, aferidos anteriormente, conforme as normativas (ASTM C1437-20) e (ASTM C230/C230M-20).

Após a realização das misturas (Tabela 2), o molde foi posicionado no centro da mesa. Após a compactação, realizou-se o arrasamento no topo do molde com uma espátula. Foram realizadas quatro aferições do diâmetro após 25 quedas durante 15s.

A primeira repetição foi considerada no tempo $t= 0$, após a preparação das misturas. Foi determinado o índice de consistência nos intervalos de 0, 20, 40 e 60 minutos, segundo (Long et al. 2019). Esse procedimento foi realizado para o compósito cimentício compatível desenvolvido.

Retenção de água

Após a preparação da amostra 3 foi realizado o índice de consistência (conforme as seções preparo das amostras e índice de consistência, descritas anteriormente) antes e após a sucção da água por um período de um minuto. Nesse ensaio foi realizado o cálculo de retenção de água pela (Equação 1).

$$\text{Retenção de água (\%)} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

com A sendo a média das quatro aferições do índice de consistência após a sucção da água por meio de uma bomba à vácuo ajustado em $7,0 \pm 0,4$ kPa durante 60 segundos. A variável B, é a média das quatro aferições do índice de consistência imediatamente após a preparação da mistura do compósito cimentício (ASTM C1506 – 17).

Tensão de escoamento pelo teste de Vicat

O teste foi realizado com o aparelho de Vicat com a sonda de consistência “Tetmajer” de 33,12 g, uma placa base de vidro e um molde cônico de plástico com dimensões de 70X60X40 mm, base superior, inferior e altura, respectivamente. Este ensaio consistiu em

compactar o compósito cimentício e registrar, após a preparação da mistura, a penetração, em milímetros, com a agulha (diâmetro de $1,13 \pm 0,05$ mm e altura de 50 ± 1 mm), em relação ao tempo.

Conforme descrito por (Khalil et. al. 2017), determinou-se o início de pega quando a agulha de 1,13 mm penetrou 36 mm e, o fim da pega, a 2,5 mm. A tensão de escoamento (equação 2), foi calculada, considerando h a penetração em mm.

$$\tau_0 = \frac{3}{2 \times \pi \times 0,005 \times h} \quad (2)$$

Resultados e discussões

No ensaio granulométrico a areia apresentou módulo de finura igual a 2,10 e diâmetro máximo $\leq 5\%$ igual a 1,18 mm. Assim, adotou-se para o processo de peneiramento com a malha de mesmo diâmetro do valor do diâmetro máximo, que teve como finalidade evitar a obstrução na extrusora do protótipo em escala de bancada para compósitos cimentícios.

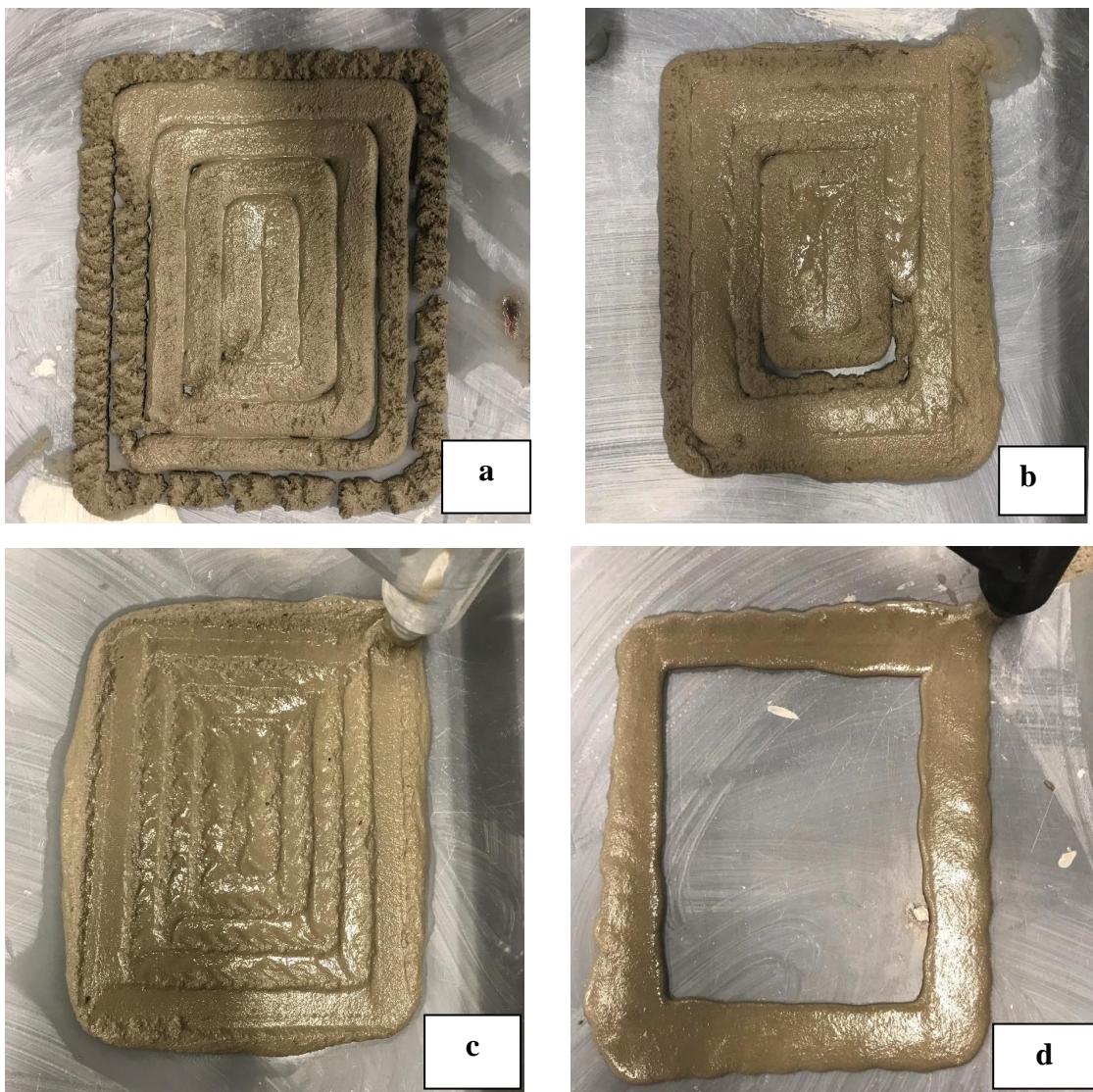
Foram desconsiderados os valores acima ou igual a 38,82 mm para o cálculo de tensão de escoamento devido ao diâmetro máximo $\leq 5\%$ igual a 1,18 mm da amostra passante, o que para (Khalil et al. 2017) pode evitar o distanciamento durante a penetração entre os grãos e a placa de vidro.

Extrudabilidade e construtibilidade

Na Figura 7 (a e b), pode-se observar as falhas na impressão nas amostras 1 e 2. (Souza et al. 2020) relatam que essas falhas ocasionadas durante a impressão são defeitos originados nos filamentos devido ao fluxo inconsistente da mistura, o que resultam em camadas com diferentes larguras.

Nessas amostras mencionadas esse defeito pode ser explicado pela falha na rotação do motor, ou seja, o motor acoplado à extrusora perdeu passos durante a impressão devido a redução do fluxo contínuo das amostras 1 e 2 em relação as demais amostras testadas, as amostras 3 e 4, que não apresentaram esse defeito e mostraram ser facilmente extrudáveis (Figura 7 (c e d)), devido ao aumento do aditivo superplastificante.

Figura 7. Amostras submetidas ao ensaio de extrudabilidade.



a) amostra 1. b) amostra 2. c) amostra 3. d) amostra 4.

Há uma redução da falha devido à falta de fluxo contínuo da mistura observada com o aumento de 0,01% na quantidade de aditivo superplastificante na amostra 2 em relação a amostra 1. Nota-se a eliminação dessa falha com o aumento de 0,02% nas amostras 3 e 4 resultando em 0,25% de aditivo superplastificante em relação ao cimento.

O bocal de diâmetro de 10 mm e a altura de impressão projetada de 5 mm foram as variáveis adotadas nesta pesquisa. Essa configuração causou na amostra 3 um excesso de compósito cimentício na lateral do objeto projetado, observado na Figura 7 (c), possivelmente devido à falta de um sistema de bombeamento para manter uma impressão contínua. (Xiao et al. 2020), investigando a qualidade da impressão 3D utilizando areia reciclada, detectaram

excesso de material na saída do bocal da impressora (projetado para 30 mm e altura de 10 mm), e relatam essa causa a falta de ajustes para uma impressão contínua.

As variáveis geométricas de projeto em relação a largura e comprimento, 200 x 250 mm para as amostras 1, 2 e 3 e, 250 x 300 mm para a amostra 4, por meio do resultado das aferições das medidas horizontais em milímetros das geometrias em escala real após a impressão de cada amostra são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis geométricas de projeto em relação a largura e comprimento das amostras.

Medidas (mm)	Amostras	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
A		196,00	204,00	232,10	295,00
B		196,10	206,65	245,15	287,30
C		196,10	206,70	239,20	290,00
D		196,00	208,25	223,50	284,10
Média da largura(*)		196,05±0,05	206,40±1,76	234,99±9,33	289,10±4,61
Erro (%) (**)		1,97	3,20	17,50	15,64
E		246,00	252,00	269,30	335,00
F		248,35	263,70	289,20	335,00
G		247,60	263,70	297,40	340,00
H		247,60	263,75	281,90	340,00
Média do comprimento(*)		247,39±0,99	260,79±5,85	284,45±11,92	327,50±2,89
Erro (%) (***)		1,04	4,32	13,78	9,17

(*) Média com desvio padrão.

(**) Erro em porcentagem em relação à largura do modelo 3D projetado 200 mm (amostras 1, 2 e 3) e 250 mm (amostra 4).

(***) Erro em porcentagem em relação ao comprimento do modelo 3D projetado de 250 mm (amostras 1, 2 e 3) e 300 (amostra 4).

Interessante observar que as falhas vistas anteriormente reduziram o valor do erro, e, por conseguinte, as amostras que não apresentaram falhas apresentaram erros maiores. Outra observação, é que a configuração A, que possui preenchimento interno, facilita o espalhamento e aumento na geometria do objeto a ser impresso.

(Souza et al. 2020) apontam como um defeito as camadas com diferentes alturas e/ou larguras. No entanto, os mesmos autores consideram que a largura maior do que o diâmetro do bocal é um efeito que traz como vantagem a aderência, e, por consequência, um bom desempenho mecânico.

A diferença entre a espessura projetada e a real foi analisada também por (Xiao et al. 2020), com o valor de 38 mm na aferição da espessura da amostra utilizando um bocal de 30

mm. Portanto, essas variações apresentadas irão depender da precisão almejada na execução para serem significativas ou não.

Assim como nos estudos de (Ma et al. 2020), nesta pesquisa também é perceptível que a fluidez inicial é aumentada em razão do aumento do fator água e cimento (A/C), e que ainda pode variar conforme o acréscimo de materiais ou aditivos. De acordo com os mesmos autores, este valor para a fluidez contribuiu para a redução de falhas no material, como, o surgimento de vazios e as falhas longitudinais. Além disso, exibiram boa coesão e aderência. No entanto, é vista também como um desafio para o teste de construtibilidade.

Diante do exposto, a configuração B foi adotada para verificar a capacidade de suportar camadas das amostras que não apresentaram falha na execução (Figura 8).

Figura 8. Resultados obtidos referentes a ensaio de construtibilidade.



a) e b) amostra 3. c) e d) amostra 4.

A amostra 3 completou 10 camadas em um tempo de 9 minutos e 22 segundos, o que resultou em uma linearidade de filamento de compósito cimentício de 1687 mm com a dosagem para duas misturas iguais. Já para a amostra 4, completou-se apenas 8 camadas e não foi possível determinar o tempo e nem o filamento linear exato, mas estima-se que o tempo foi de 7 minutos e 30 segundos com um comprimento de 1349,6 mm para a quantidade referente a dosagem de duas misturas da mesma amostragem. Ressaltando que para ambas, foi utilizada a velocidade de impressão de 995 mm/s.

Em uma análise comparativa, nos estudos de (Weng et al. 2019), a impressão de um modelo 3D de um pentágono regular com segmentos de reta de 85 mm e com a altura de 190 mm finalizou em 5 minutos com 20 camadas e altura de 180 mm. Ainda, este modelo foi construído com o ajuste de velocidade de impressão igual a 2000 mm/min – velocidade pelo menos duas vezes mais lenta do que realizada nesta pesquisa de 59700 mm/min - e com o sistema de bombeamento de 650 rpm por meio de uma impressora com dimensões de 1,2 m x 1,2 m x 1,0 m - essas medidas referidas se assemelham com as dimensões descritas na metodologia desta pesquisa, confirmando os resultados obtidos.

Para (Long et al. 2019), uma das formas de avaliar a construtibilidade é por meio das medições referente a altura resultante das estruturas impressas. A Tabela 4 apresenta as medidas horizontais e verticais em milímetros em relação a largura e comprimento.

Tabela 4. Medidas horizontais e verticais da largura e comprimento.

Largura da linha (mm)	Amostra 3	Amostra 4	Altura (mm)	Amostra 3	Amostra 4
L1	59,70	120,95	H1	36,85	27,20
L2	68,55	122,10	H2	38,75	27,55
L3	78,00	121,75	H3	34,60	29,65
L4	63,00	123,75	H4	37,20	25,75
L5	61,90	113,40	H5	34,70	28,05
L6	65,20	106,90	H6	34,55	28,55
C1	69,15	130,00	H7	34,70	27,90
C2	62,20	126,55	H8	34,20	28,80
C3	59,55	122,95	-	-	-
C4	75,15	115,00	-	-	-
C5	64,00	110,00	-	-	-
C6	71,40	106,05	-	-	-
Média (*)	66,48±6,01	118,28±7,82	Média (*)	35,69±1,68	27,93±1,16

(*) Média com desvio padrão.

As amostras 3 e 4 apresentaram uma diferença de 14,31 mm e 22,07 mm entre a altura projetada de 50 mm e a média das aferições após a impressão. Ainda, a amostra 4 apresentou

uma redução de altura em 21,74% em comparação com a amostra 3. (Weng et al. 2019) também mostraram redução entre a altura projetada e a real.

(Long et al. 2019) relataram que as estruturas impressas em cinco camadas de amostras com dosagem distintas apresentaram diferença na altura total. A saber, em comparação com a amostra de referência - sem adição de um aditivo natural polimérico a base de celulose – com as incorporações de 0,5%, 1% e 1,5% deste material, a proporção de altura reduziu em 16,7%, 33,3% e 60,0%.

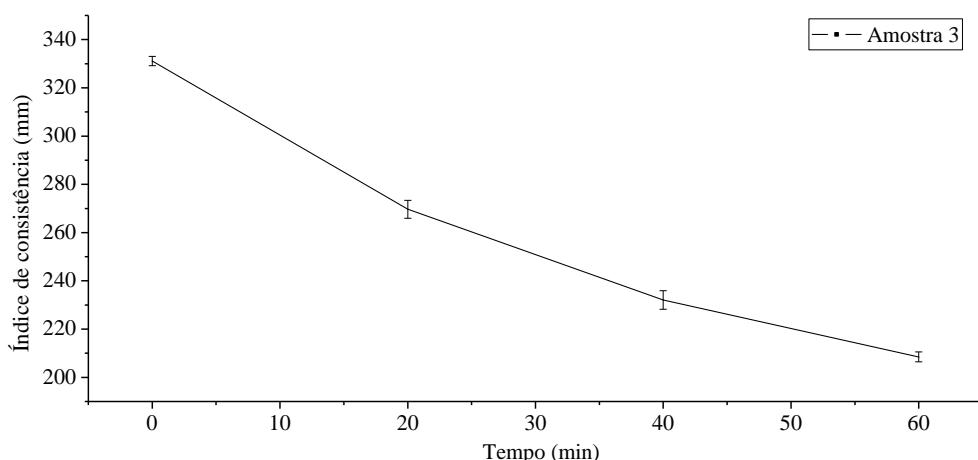
Portanto, a amostra 3 apresentou o traço mais adequado para impressão 3D de compósito cimentício, devido aos resultados apresentados referentes a extrusão e construção de camadas na horizontal e vertical, e, dentre as amostras estudadas, passível de ser utilizada na manufatura aditiva para o setor da construção civil definida pela análise dos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade. Devido aos fatores aqui expostos, esta amostra passa a ser a adotada nesta pesquisa para a realização dos ensaios no estado fresco.

Ensaios no estado fresco

Índice de consistência

O diâmetro médio do teste de índice de consistência em comparação com a amostra após a preparação, indicada pelo tempo zero, reduziu-se em 18,56%, 29,73% e 37,03%, em 20, 40 e 60 minutos, respectivamente, após a preparação da amostra (Figura 12). Assim, o tempo de mistura é diretamente proporcional ao índice de consistência. Houve uma variação significativa para os valores dos diâmetros médios determinados entre 0 e 20 minutos ($331,13 \pm 1,93$ mm e $269,68 \pm 3,72$ mm), sendo de 61,45 mm.

Figura 12. Diâmetro médio do índice de consistência em relação ao tempo após a preparação da mistura da amostra 3.



(Marchment et. al. 2019) também observaram a variação do índice de consistência registrado no intervalo entre 3 e 15 minutos apresentou uma diferença diâmetro médio de até 30 mm. Os dados de (Moeini et al. 2020) e (Long et al. 2019) comprovam que os resultados de índice de consistência decrescem após as aferições realizadas a cada 10 minutos, estabilizando aos 40 minutos; e a cada 20 minutos até atingir 60 minutos, respectivamente.

Em um intervalo menor, como na pesquisa de (Marchment et. al. 2019), essa variação foi pouco evidenciada, sendo que três amostras exibiram redução no diâmetro e as demais um aumento aos 15 minutos.

Nos estudos de (Long et al. 2019) o índice de consistência variou entre 280 e 210 mm após o preparo da mistura (0 min) e entre 245 e 177 mm com 60 minutos. Já para (Yuan et al. 2019), o aditivo superplastificante foi adicionado até o índice de consistência atingir o diâmetro médio de 230 ± 5 mm. No teste de índice de consistência das cinco misturas pesquisadas por (Ma et. al. 2020), os diâmetros médios variaram de 180 a 220 mm.

Portanto, a trabalhabilidade é uma das propriedades que avaliam a capacidade de um material cimentício se tornar extrudável e imprimível, havendo, porém, divergências na determinação da fluidez ideal, sendo relevante a investigação de propriedades no estado fresco, como o teste de Vicat e a retenção de água.

Retenção de Água e Teste de Vicat

Em relação a fluidez, a retenção de água (86,46% para a amostra 3), pode ser vista com um dos resultados complementares ao índice de consistência, pois está diretamente relacionada a perda de água, uma das variáveis que explica o fenômeno da redução da trabalhabilidade.

Para determinação da retenção de água da amostra 3 foi realizada um novo preparo da mistura para obtenção de um diâmetro médio antes e após a sucção à vácuo. Isso levou a aferição do diâmetro médio, $316,04 \pm 2,14$ mm - diferente do determinado no índice de consistência, e, após 60 minutos de sucção à vácuo, $273,25 \pm 6,44$ mm - uma aferição semelhante à encontrada após 20 minutos no índice de consistência.

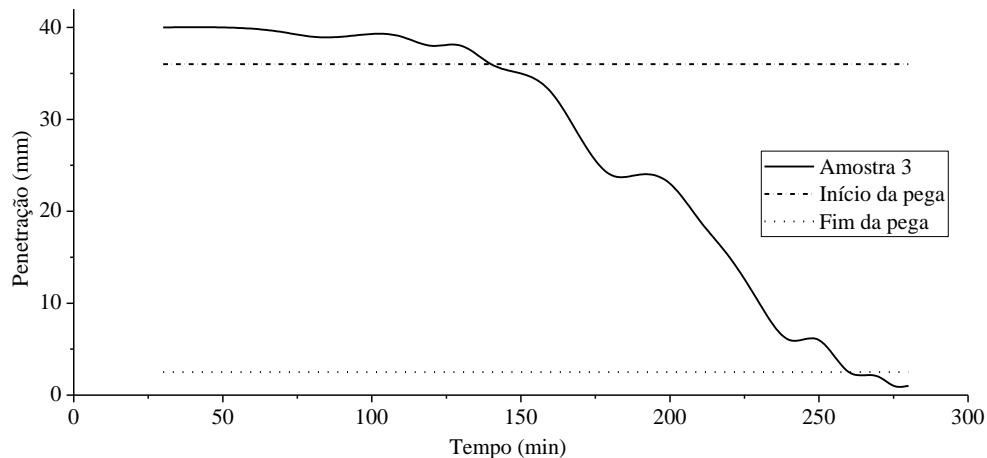
Essa variação do índice de consistência na mesma composição de matérias-primas foi discutida por (Soltan e Li 2018), onde apontam que além da composição, a temperatura pode interferir nos resultados da trabalhabilidade.

As variáveis analisadas nesta pesquisa podem estar relacionadas com o tipo de aditivo utilizado. (Xiao et. al. 2020), determinaram que o tempo de início e fim de pega foi reduzido com o aumento da quantidade do aditivo acelerador utilizado, uma vez que ele tem por

objetivo a melhora das propriedades reológicas dos materiais cimentícios (Kruger et al. 2019). Já (Ding et al. 2020), utilizaram o aditivo superplastificante, para controlar a resistência ao cisalhamento inicial a fim de garantir a trabalhabilidade dos materiais impressos.

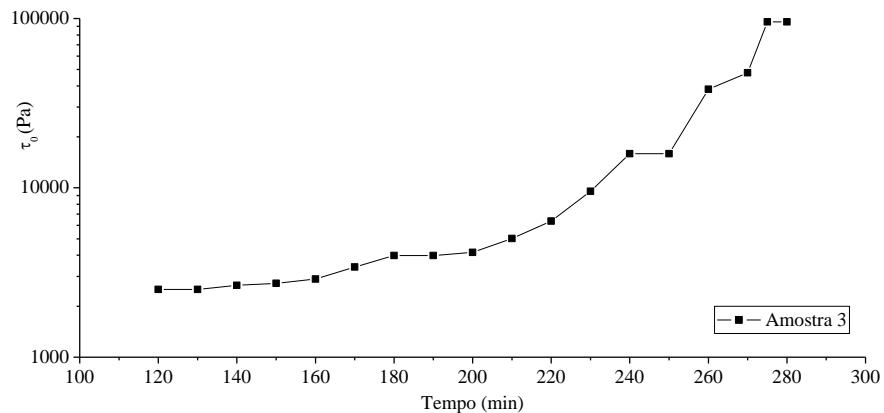
Na Figura 13 tem-se o comportamento da amostra 3 (0,25% de superplastificante com o fator água e cimento de 0,33), mediante a realização do teste de Vicat. A profundidade da penetração pelo aparelho de Vicat em relação ao tempo apresenta a interseção entre a curva de penetração e as retas que compreendem o horário em que a agulha de diâmetro de 1,13 mm penetrou a 36 mm e, 2,5 mm para o início (140 min), e fim de pega (260 min), respectivamente.

Figura 13. Profundidade da penetração em relação ao tempo da amostra 3.



Para (Long et al. 2019) a reologia se remete a evolução das propriedades de viscosidade plástica, tixotropia e a análise da tensão de escoamento desejáveis para alcançar a capacidade de impressão, construtibilidade e resistência a segregação. A Figura 14 exibe a evolução da tensão de escoamento por meio do aparelho de Vicat, conforme (Khalil et al. 2017).

Figura 14. Tensão de escoamento em relação ao tempo da amostra 3.



(Khalil et al. 2017) investigaram os 45 minutos antes do final do teste e constataram que quanto mais rápida for a mudança na tensão de escoamento, o que pode ser observado na (Figura 14), significa que o compósito cimentício aumenta a capacidade de resistir às deposições de camadas superiores. Em uma análise comparativa, nota-se o rápido crescimento ou mudança na tensão de escoamento nos últimos seis pontos, que representam o intervalo dos 40 minutos finais, observados nesta pesquisa.

Conclusões

A manufatura aditiva é uma tendência promissora para o setor construtivo e demonstra ser uma tecnologia dotada de um processo construtivo mais limpo. No entanto, um dos maiores desafios atuais envolve o desenvolvimento de materiais cimentícios com atendimento de novos requisitos como a capacidade de impressão, e, por consequência, propriedades adequadas nos estados fresco e endurecido.

Neste estudo, investigou-se a extrudabilidade dos compósitos cimentícios quanto aos traços testados. Posteriormente, na construtibilidade verificou-se a capacidade de suportar camadas. Destes, em uma das amostras (amostra 3), apresentou o traço mais adequado para impressão 3D de compósitos cimentícios, fator comprovado pelos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade.

Os resultados de avaliação no estado fresco da amostra 3 foram satisfatórios. Os valores de índice de consistência apontaram diminuição quando aumenta o tempo de mistura, sendo que a retenção de água foi um resultado complementar ao índice de consistência pois está diretamente relacionada a perda de água e a tensão de escoamento pelo aparelho de Vicat

apresentou um ganho de resistência ao longo do tempo e um rápido crescimento nos minutos finais do teste.

Sugere-se para estudos futuros, o emprego do sistema de bombeamento acoplado ao sistema de extrusão/impressão, bem como, o estudo de novos traços, inclusive com o desenvolvimento de materiais compósitos com foco na sustentabilidade.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1437: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C1437-20

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1506: Standard Test Method for Water Retention of Hydraulic Cement-Based Mortars and Plasters. West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/C1506-17

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C230 / C230M: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0230_C0230M-20

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C348: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. West Conshohocken, PA, 2020. DOI: 10.1520/C0348-20

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C349: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). West Conshohocken, PA, 2018. DOI: 10.1520/C0349-18

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6913/D6913M: Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/D6913_D6913M-17

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução, v. 5, p. 189-250, 2002.

DE SCHUTTER, Geert et al. Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 25-36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

DING, Tao et al. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118654>

GUO, H.; LV, R.; BAI, S. Recent advances on 3D printing graphene-based composites. **Nano Materials Science**, v. 1, p. 101-115, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.03.003>

HAGER, I. GOLONKA, A. PUTANOWICZ, R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? **Procedia Engineering**, vol. 151, 292 – 299, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>

HIBBEKER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 5^a ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

KARJI, A. et al. Assessment of Social Sustainability Indicators in Mass Housing Construction: A Case Study of Mehr Housing Project. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, p. 101697, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101697>

KHALIL, Noura et al. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 382-391, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>

LABONNOTE, Nathalie et al. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. **Automation in construction**, v. 72, p. 347-366, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>

LONG, Wu-Jian et al. Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118054, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118054>

LU, Bing et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 477-490, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>

MA, Guowei et al. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118305, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118305>

MA, Guowei et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 770-783, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>

MARCHMENT, Taylor; SANJAYAN, Jay; XIA, Ming. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. **Materials & Design**, v. 169, p. 107684, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107684>

MAZHOUUD, Brahim et al. Underwater 3D printing of cement-based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 458-467, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.134>

MOEINI, Mohammad Amin; HOSSEINPOOR, Masoud; YAHIA, Ammar. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119551, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119551>

OMER, Mohamed AB; NOGUCHI, Takafumi. A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals

(SDGs). **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101869, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101869>

SOLTAN, Daniel G.; LI, Victor C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 90, p. 1-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017>

SOUZA, Marcelo Tramontin et al. 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. **Journal of Building Engineering**, p. 101833, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101833>

WANGLER, Timothy et al. Digital concrete: opportunities and challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 67-75, 2016. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16

WENG, Yiwei et al. Feasibility study on sustainable magnesium potassium phosphate cement paste for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 595-603, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.053>

XIAO, Jianzhuang et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101779, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101779>

YUAN, Qiang et al. A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116600, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.326>

6.1 Normas do Artigo 1

Condições para submissão

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

- Os manuscritos devem ser apresentados na seguinte sequência: página de rosto, resumos em português, espanhol e inglês, palavras chaves, palavras clave e keywords, texto, referências bibliográficas.
- A Pagina de rosto contém a identificação dos autores e a indicações de três possíveis revisores.
- Todos os autores e suas filiações estão cadastrados no sistema e possuem ORCID.
- A contribuição é original e inédita, e não está sendo avaliada para publicação por outra revista; caso contrário, justificar em "Comentários ao Editor".
- Foram informadas as autorizações e licenças para realização da pesquisa? O trabalho deve incluir a autorização do comitê de ética (no caso de pesquisas com pessoas) e outras licenças necessárias a sua realização.
- O texto segue os padrões de estilo e requisitos bibliográficos descritos em [Diretrizes para Autores](#), na seção Sobre a Revista.
- A identificação de autoria deste trabalho foi removida do arquivo e da opção Propriedades no Word, garantindo desta forma o critério de sigilo da revista, caso submetido para avaliação por pares (ex.: artigos), conforme instruções disponíveis em [Assegurando a Avaliação por Pares Cega](#).
- A carta de anuência foi assinada por todos os autores e anexada no sistema.

Diretrizes para Autores

A submissão deve ser feita única e exclusivamente pela plataforma da revista (<https://periodicos.ufpb.br/index.php/gaia/submission/wizard>). Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

1) Dois arquivos estão sendo submetidos: o arquivo do artigo e a carta de apresentação e anuência assinada por todos os autores. Todos os autores e suas filiações acadêmicas completas estão cadastrados no sistema e possuem ORCID. Não será aceita a inclusão de novos autores após o processo de revisão ter sido iniciado.

2) Os manuscritos devem ser apresentados na seguinte sequência: página de rosto, declarações, resumos em português, espanhol e inglês, palavras chaves, palavras clave e keywords, texto, referências bibliográficas. Tudo em um único arquivo no formato Word.

3) A contribuição é original e inédita, e não está sendo avaliada para publicação por outra revista; caso contrário, justificar em "Comentários ao Editor".

4) Todos os endereços de páginas na Internet (URLs), incluídas no texto (Ex.: <http://www.ibict.br>) estão ativos e prontos para clicar. Os manuscritos submetidos devem citar e referenciar todos os dados, códigos de programas e outros materiais que foram utilizados ou gerados na pesquisa.

5) O texto segue os padrões de estilo e requisitos bibliográficos descritos em Diretrizes para Autores, na seção Sobre a Revista.

6) A identificação de autoria deste trabalho foi removida do arquivo e da opção Propriedades no Word, garantindo desta forma o critério de sigilo da revista, caso submetido para avaliação por pares (ex.: artigos), caso os autores optem pela Avaliação por Pares Cega.

Diretrizes para Autores

A Revista **Gaia Scientia** publica manuscritos inéditos. A autoria dos manuscritos deve ser limitada aqueles que contribuíram substancialmente à elaboração do trabalho. Todos os autores devem estar em concordância com a inclusão de seus nomes no trabalho e a submissão é de inteira responsabilidade dos autores.

Considerando os processos avaliativos pelos quais a revista está submetida e os critérios das plataformas de indexação, a **Gaia Scientia** limita a publicação de artigos de autores vinculados ao corpo editorial, à UFPB e à Rede Prodema (UFPB, UFPI, UFRN, UFS, UFPI, UFC, UESC) a 20% dos artigos publicados anualmente.

Considerando o perfil da revista e a importância que damos às informações alcançarem um amplo público, a **Gaia Scientia** publica artigos, preferencialmente, em inglês, mas aceita manuscritos nos idiomas inglês, português e espanhol.

O processo de submissão deve contar com uma carta de apresentação (cover letter), ressaltando os pontos relevantes do artigo, sua aderência ao escopo da revista e qualquer outra informação que os autores considerarem importantes. A carta de apresentação deve informar que o artigo é uma obra inédita, que não está sendo considerado para publicação em nenhum outro canal, que não tem plágio ou má conduta ética de pesquisa e deve ser assinada por todos os autores (anuênciia de todos os autores para a submissão).

Tipos de trabalho publicados

Revisões

Revisões são publicadas somente com consulta prévia ao Editor-Chefe do periódico.

Artigos

Solicitamos que os autores leiam com atenção as normas. Esse é um passo importante e o não cumprimento pode influenciar o processo de avaliação.

Os artigos devem ser organizados em um ÚNICO arquivo Word, subdivididos nas seguintes partes:

- Folha de rosto;
- Declarações;

- Resumo, Abstract e Resumen (iniciado com o título do trabalho e com até 200 palavras), com suas respectivas palavras-chave, keywords e palabras clave. O resumo e o título são OBRIGATÓRIOS nos 3 idiomas;
- Introdução;
- Material e Métodos;
- Resultados e Discussão (o autor pode optar por separar ou unir estes itens);
- Conclusão;
- Referências.

As sessões não devem ser numeradas. Apenas as primeiras letras das sessões devem ser escritas em caixa alta. Caso sejam necessárias subdivisões nas sessões, elas não devem ser numeradas. Todos os trabalhos devem estar de acordo com os comportamentos éticos adotados pela **Gaia Scientia** (ver seção Questões Éticas). Os autores devem enviar seus artigos somente em versão eletrônica e pela plataforma da revista. Toda comunicação deve ser feita via plataforma da revista.

FORMATAÇÃO DOS ARTIGOS

Folha de rosto

Deve conter o título do trabalho, os nomes dos autores, suas filiações acadêmicas e o(s) cadastro(s) ORCID. Deve ser informado o autor para correspondência e todos os autores do trabalho devem estar cadastrados no sistema da revista na hora da submissão, assim como suas filiações completas. Não será permitida a inclusão de autores após o processo de avaliação ter iniciado. Deve ser informado um título curto. Devem ser indicados, pelo menos, três possíveis revisores, que devem ser doutores, especialistas na área e sem conflito de interesses com os autores ou com o trabalho. Informar os nomes, filiação e email dos possíveis revisores. Agradecimentos devem vir nessa folha. Agradecimentos pessoais devem preceder os agradecimentos às instituições ou agências. Agradecimentos a auxílios ou bolsas (com os números de processos), assim como agradecimentos à colaboração de colegas, bem como menção à origem de um artigo (e.g. teses) devem ser indicados nesta seção.

Declarações

Os autores devem informar, obrigatoriamente, os seis itens listados abaixo:

- participação dos autores: deve ser informada a participação de cada autor no desenvolvimento do artigo.
- aprovação ética: todos os manuscritos devem incluir uma declaração sobre aprovação e consentimento éticos (mesmo quando a necessidade de aprovação foi dispensada), incluindo o nome do comitê de ética que aprovou o estudo e o número de referência do comitê, se apropriado. Estudos envolvendo animais devem incluir uma declaração de aprovação de ética.
- Tipo de revisão: os autores concordam com a divulgação dos seus nomes para os revisores?
- disponibilidade dos dados: Informar se os dados estarão disponíveis em alguma base ou repositórios.
- Fomento: informar todas as fontes de fomento.
- Conflito de Interesses: No caso de haver conflito de interesses, este deve ser informado.

Corpo do texto

Os artigos podem ser redigidos em português, inglês ou espanhol, mas a revista recomenda a publicação em inglês. Os textos devem ser preparados em espaço 1,5, fonte Times News Roman, tamanho 12, com folha A4 (210 x 297 mm), obedecendo todas as margens com 2,0 cm. As páginas devem estar numeradas a partir da primeira página. As linhas devem estar numeradas sequencialmente. Notas de rodapé devem ser evitadas; quando necessário, devem ser numeradas sequencialmente. No momento da submissão, não deve haver nenhuma identificação dos autores no corpo do artigo e nem na opção Propriedades no Word (caso os autores optem pela avaliação cega). Todos os endereços de páginas na Internet (URLs), incluídas no texto (Ex.: <http://www.ibict.br>) deverão estar ativos e prontos para clicar.

Tamanho dos artigos

Os artigos devem ter no máximo 25 laudas. Artigos sucintos e cuidadosamente preparados têm preferência tanto em termos de impacto, quanto na sua facilidade de leitura.

Tabelas e ilustrações

Tabelas e figuras serão consideradas quando realmente se mostrem necessárias à compreensão do Texto. Os autores não devem repetir informações de tabelas e gráficos ao longo do texto. Somente ilustrações de alta qualidade serão aceitas. Todas as ilustrações serão consideradas como figuras, inclusive desenhos, gráficos, mapas e fotografias. As figuras e tabelas devem vir ao longo do texto e com legendas. Todas as Figuras e Tabelas devem ser chamadas ao longo do texto. Tabelas e quadros são diferenciados pela presença de linhas verticais e horizontais. Tabelas apresentam linhas apenas nas partes superior e inferior. Nem Tabelas, nem quadros devem ter células coloridas. Quando houver gráficos ou figuras com informações correlatas ou complementares, elas devem formar uma única prancha. As figuras organizadas em prancha devem ser editadas de forma a ser uma única figura, identificadas por letras maiúsculas do lado esquerdo superior de cada imagem.

As figuras devem ser formatadas de acordo com as seguintes especificações:

1. Desenhos e ilustrações devem ser em formato .JPG ou .PS/.EPS ou .CDR (Postscript ou Corel Draw);
2. Imagens ou figuras em meio tom devem ser no formato .JPG ou .TIF ou .PNG;
3. As figuras devem ter formatações que permitam que cada dimensão linear das menores letras e símbolos não deve ser menor que 2 mm depois da redução.
4. Figuras que não sejam de autoria do próprio autor ou, quando do autor, que já tiverem sido previamente publicadas só serão aceitas com a carta de anuência do autor original ou da revista onde a figura foi publicada.
5. Durante o processo de edição de artigos aceitos, os autores podem ser solicitados para o envio de figuras de melhor qualidade, caso seja necessário. Artigos que contenham símbolos de Matemática, Física ou Química podem ser digitados em Tex, AMS-Tex ou Latex; Artigos sem fórmulas matemáticas dever ser enviados em Word para Windows.

Abreviaturas

As abreviaturas devem ser definidas em sua primeira ocorrência no texto, exceto no caso de abreviaturas padrão e oficial. Unidades e seus símbolos devem estar de acordo com os aprovados pela ABNT ou pelo Bureau International des Poids et Mesures (SI).

Referências

Os autores devem priorizar a citação de artigos relevantes e com aderência ao tema do manuscrito, priorizando a citação de artigos/ referências recentes. Os autores devem ter atenção na formatação tanto das citações ao longo do texto quanto das referências. Os autores são responsáveis pela exatidão das referências.

Artigos publicados e aceitos para publicação (no prelo) podem ser incluídos. Evitar a citação de teses e dissertações e outras referências cinzas. Referências de *apud*, abstracts de reuniões, simpósios (não publicados em revistas), artigos em preparo ou submetidos, mas ainda não aceitos em definitivo NÃO podem ser citados no texto e não devem ser incluídos na lista de referências. Incluir o DOI ao final da referência sempre que possível.

As referências devem ser citadas no texto como, por exemplo, (Smith 2004), (Smith and Wesson 2005), no caso de texto em inglês ou (Smith e Wesson 2005), no caso de texto em português ou, para três ou mais autores, (Smith et al. 2006). Dois ou mais artigos do mesmo autor no mesmo ano devem ser distinguidos por letras, e.g. (Smith 2004a), (Smith 2004b) etc. Artigos com três ou mais autores com o mesmo primeiro autor e ano de publicação também devem ser distinguidos por letras. No caso de citar vários autores em um mesmo ponto do texto, as referências devem ser organizadas em ordem cronológica e separadas por ponto e vírgula (Silva 1999; Colen 2003; Menezes 2010; Anuda 2015). As referências devem ser listadas em ordem alfabética do primeiro autor sempre na ordem do sobrenome XY no qual X e Y são as iniciais.

ARTIGOS

- García-Moreno J, Clay R, Ríos-Munoz CA. 2007. The importance of birds for conservation in the neotropical region. *Journal of Ornithology*, 148(2):321-326.
- Pinto ID, Sanguinetti YT. 1984. Mesozoic Ostracode Genus Theriosynoecum Branson, 1936 and validity of related Genera. *Anais Academia Brasileira Ciências*, 56:207-215.
- Posey DA. 1983. O conhecimento entomológico Kayapó: etnometodologia e sistema cultural. *Anuário Antropológico*, 81:109-121.

LIVROS E CAPÍTULOS DE LIVROS

- Davies M. 1947. An outline of the development of Science, Athinker's Library, n. 120. London: Watts, 214 p.
- Prehn RT. 1964. Role of immunity in biology of cancer. In: National Cancer Conference, 5, Philadelphia Proceedings, Philadelphia: J.B. Lippincott, p. 97-104.
- Uyttenbogaardt W and Burke EAJ. 1971. Tables for microscopic identification of minerals, 2nd ed., Amsterdam: Elsevier, 430 p.
- Woody RW. 1974. Studies of theoretical circular dichroism of Polipeptides: contributions of B-turns. In: Blouts ER et al. (Eds), Peptides, polypeptides and proteins, New York: J Wiley & Sons, New York, USA, p. 338-350.

OUTRAS PUBLICAÇÕES

- International Kimberlite Conference, 5, 1991. Araxá, Brazil. Proceedings ... Rio de Janeiro: CPRM, 1994, 495 p.
- Dynamics of Classical Fields. 1998. University of Calgary, Department of Mathematics and Statistics, 55 p. Preprint n. 600.

Política de Privacidade

Os manuscritos publicados são de propriedade da Revista **GAIA SCIENTIA**, vedada tanto a reprodução, mesmo que parcial em outros periódicos, como a tradução para outro idioma sem a autorização por escrito do Conselho Editorial.

Política de Acesso Livre

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratização mundial do conhecimento.

Propriedade intelectual

Todo o conteúdo do periódico está licenciado sob uma Licença Creative Commons do tipo atribuição BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Ou seja, o conteúdo pode ser copiado, adaptado, modificado, desde que sejam indicadas a origem, a autoria, as alterações feitas e desde que seja para uso não comercial. Todo conteúdo da revista tem publicação online, de acesso aberto e gratuito

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As principais contribuições da revisão de literatura estão vinculadas ao fato de se dar ênfase as inovações no setor urbano com a apresentação dos principais avanços e aspectos relativos à manufatura aditiva.
- Foi possível perceber que as contribuições mostradas nesta revisão podem fomentar a sustentabilidade e contribuir para o planejamento urbano sustentável.
- Neste estudo foi investigada a capacidade de impressão na horizontal de 4 amostras com traços distintos. Dentre estas amostras, verificou-se falha na impressão em dois traços. Para as demais amostras, foi realizado o teste de construtibilidade, a fim de avaliar a capacidade de impressão na horizontal.
- De posse aos resultados referentes a extrusão e construção de camadas na horizontal e vertical, a amostra 3 foi considerada dentre as amostras estudadas neste trabalho a que possui o traço mais adequado para impressão 3D pela análise dos ensaios de extrudabilidade e construtibilidade.
- Os resultados de avaliação no estado fresco da amostra 3 apontaram que os valores de índice de consistência diminuíram quando aumentou o tempo de mistura, sendo que a retenção de água foi um resultado complementar ao índice de consistência pois está diretamente relacionada a perda de água e a tensão de escoamento pelo aparelho de Vicat apresentou um ganho de resistência ao longo do tempo e uma elevação nos minutos finais do teste.
- Já a avaliação mecânica no estado endurecido da amostra 3 apontou um rápido crescimento na resistência mecânica aos 7 dias, acima de 35 MPa em relação à resistência à compressão e cerca de 6 MPa à resistência à tração na flexão. Portanto, a argamassa desenvolvida e avaliada pode ser passível de ser utilizada na manufatura aditiva.
- Sugere-se para estudos futuros, o emprego do sistema de bombeamento acoplado ao sistema de extrusão/impressão, bem como, o estudo de novos traços, inclusive com o desenvolvimento de materiais compósitos com foco na sustentabilidade.