

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL

CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**INOVAÇÃO EM CONCRETO NA ERA DIGITAL: UMA ANÁLISE DAS  
CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA MANUFATURA  
ADITIVA**

RAYANNE LIRA BARROS

Maceió-AL

2024

RAYANNE LIRA BARROS

**INOVAÇÃO EM CONCRETO NA ERA DIGITAL: UMA ANÁLISE DAS  
CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA MANUFATURA  
ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Karoline Alves de Melo Moraes

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ivvy Pedrosa Cavalcante Pessoa Quintella

Maceió-AL

2024

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

B277i Barros, Rayanne Lira.  
Inovação em concreto na era digital : uma análise das características de materiais cimentícios para manufatura aditiva / Rayanne Lira Barros. - 2024.  
81 f. : il.

Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.  
Co-orientadora: Ivy Pedrosa Cavalcante Pessôa Quintella.  
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) –  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 74-81.

1. Concreto (Impressão 3D). 2. Materiais cimentícios. I. Título.

CDU: 693.54/.56

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por a todo momento me fazer ter a plena certeza de que a minha trajetória tem um plano guiado por Ele, que basta apenas eu confiar. Sem dúvidas, chegar à finalização desse trabalho e conclusão da minha graduação é a concretização de que Ele é um Deus cuidadoso e que realiza sonhos.

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão Roberto por serem meus maiores apoiadores, por junto comigo sonharem, lutarem e serem meu ponto de segurança quando tudo parece incerto. Obrigada por toda paciência, por entenderem as ausências, por aguentarem meus momentos mais difíceis e por não me deixarem desistir, amo vocês para sempre. Estendendo a família, agradeço em especial a minha vó Helena e aos meus tios/tias Janaína, Charles, Fábio e Marilane, a minha cunhada Laura e sua família, por todas as orações, apoio e confiança de que eu chegaria a esse dia, vocês foram essenciais.

Agradeço aos meus amigos que se tornaram extensão da minha família nesses anos de graduação e por tornarem Maceió meu outro lar. Em especial, agradeço à Mariana, Alana, Hilleana, Hítilla e Marianni, as minhas “Engatas”, a Luis, Luca, Arthur e Diogo, por terem sido meu maior suporte, por dividirem os dias mais difíceis, os medos, as incertezas, as mil horas de estudos dentro e fora da UFAL e, claro, as alegrias nas pequenas conquistas todos os dias nos últimos anos, vocês são gigantes. Estendo minha gratidão aos meus parceiros/irmãos, Gabriela, Freitas, Ariana, Ariany, Christian, Yanna, José Matheus, Maria Clara, Pedro, Evelylyn, Wislayne, Márcio e Samira por cada conselho, por estarem sempre por perto e por terem tornado os dias de UFAL mais leves.

Agradeço ao PET Engenharia Civil UFAL por ter sido meu lar durante quatro anos. Não tenho dúvidas que fui extremamente privilegiada e presenteada com a oportunidade de poder fazer parte desse grupo. Foi incrível poder ter sido desafiada, poder aprender, ensinar, acolher e, principalmente, ser uma agente de transformação na educação junto a pessoas que tenho profunda admiração. Agradeço a cada geração de petianos, do PET Civil e PET UFAL, com a qual tive a oportunidade de compartilhar e vivenciar essa jornada. Cada um tem uma parcela de contribuição enorme na pessoa e profissional que estou saindo hoje. Em especial, agradeço a minha geração Diana, Luis e Mateus, “Quarteto Fantástico”, por terem tornado toda trajetória ainda mais especial, sou muito grata por ter vocês como parceiros/irmãos.

Agradeço à professora Karol por ser um dos seres humanos mais lindos que já conheci e por sempre ter acreditado em mim quando nem eu mesma acreditava. Professora, obrigada por me mostrar que ser professora/tutora/orientadora vai muito além da sala de aula, que dar o meu melhor sempre vai ser o melhor caminho, por ter sido minha família em Maceió, por cada conversa, conselho, ensinamento e por toda paciência. Sem dúvidas, sem a senhora, durante praticamente toda minha graduação, meu caminho teria sido muito mais árduo. Estendo minha imensa gratidão à sua família, Joaquim, Maria, Rafa e Juju, por sempre me receberem tão bem e por todo cuidado, amo vocês demais.

Agradeço à professora Ivvy por todo apoio, paciência e atenção desde orientação no PIBIC. Obrigada por cada conselho, por todas as conversas e, principalmente, por ser um espelho de pessoa e profissional para mim.

Agradeço à Marcante Engenharia por toda confiança, aprendizado e contribuição na minha formação durante meu período de estágio. Em especial a Isabela e Célio, por todo ensinamento, por entender minha rotina e me apoiar em cada decisão.

Agradeço à Podium Engenharia pela oportunidade de todos os dias poder consolidar minha formação, por toda confiança e paciência nos desafios que a profissão de engenharia requer. Em especial, agradeço a José Roberto, Fernando e João Neto, por toda supervisão, suporte e apoio. Em extensão agradeço a Emily, Aline, Derivânia, Gabrielle, Thaysllane, Rayane, Roberto, Jailton, Jonatas, Paula e Querem por toda torcida e suporte.

Por fim, agradeço a todos os professores e demais funcionários do Centro de Tecnologia (CTEC) por toda dedicação e contribuição para tornar o curso de Engenharia Civil da UFAL cada dia mais reconhecido e diferenciado.

## RESUMO

BARROS, R. L. **Inovação em concreto na era digital: uma análise das características de materiais cimentícios para manufatura aditiva.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

No contexto da crescente revolução digital na indústria da construção, a manufatura aditiva com materiais cimentícios (3DCP) emerge como uma promissora alternativa de inovação no setor. Entretanto, as misturas cimentícias devem atender requisitos complexos associados à tecnologia. Sendo assim, pesquisas recentes têm se concentrado em analisar o comportamento do material no estado fresco para o processo 3DCP partindo de análises do impacto dos seus materiais constituintes. Desse modo, o presente trabalho se propõe a realizar uma análise sistemática da literatura acerca das características de misturas cimentícias para manufatura aditiva, com foco na técnica de extrusão. A partir da definição do protocolo e critérios de busca foram selecionados 35 artigos nas bases de dados bibliográficas eletrônicas *Scopus* e *Web of Science*. Em seguida, com o auxílio da ferramenta *StArt*, foram filtrados 12 estudos, que se apresentaram em consonância com o objetivo da presente pesquisa, para análise aprofundada. Além disso, como complemento para a revisão sistemática (RS), realizou-se um mapeamento dos estudos que compõem os anais das três edições da Conferência Internacional RILEM em Concreto e Fabricação Digital - *Digital Concrete*. É perceptível que, além do progresso exponencial em investigações voltadas ao processo 3DCP, em uma curta janela temporal, a abrangência e complexidade das pesquisas também estão em evolução. Além disso, o desenvolvimento de material cimentício para a tecnologia está para além das pesquisas em ambiente acadêmico, pois o mercado da construção vem investindo e ampliando estrategicamente seus produtos. Somado a isso, constata-se ainda que grande parte dos estudos buscam encontrar alternativas que substituam parcialmente o elevado volume de cimento Portland (CP) nas misturas por diferentes tipos de resíduos. Essas alternativas devem atender todos os parâmetros requeridos para a manufatura aditiva com materiais cimentícios tornando a tecnologia competitiva com o mercado convencional.

**Palavras-chave:** 3DCP. Materiais Cimentícios. Impressão 3D com concreto.

## ABSTRACT

BARROS, R. L. **Innovation in concrete in the digital age: an analysis of the characteristics of cementitious materials for additive manufacturing.** Undergraduate thesis (Civil Engineering) – Federal University of Alagoas, Maceió, 2024.

In the context of the burgeoning digital revolution within the construction industry, additive manufacturing with cementitious materials (3DCP) stands out as a promising and innovative alternative. However, the cementitious mixtures integral to this technology must meet intricate and demanding specifications. Consequently, recent research has been diligently directed toward scrutinizing the material's behavior in its fresh state during the 3DCP process, with a focus on understanding the impact of its constituent materials. This study aims to conduct a systematic analysis of the existing literature regarding the characteristics of cementitious mixtures intended for additive manufacturing, particularly emphasizing the extrusion technique. Following the establishment of a protocol and rigorous search criteria, 35 articles were meticulously selected from the reputable electronic bibliographic databases Scopus and Web of Science. Subsequently, employing the StArt tool, a judicious filtration process identified 12 studies that were inherently aligned with the primary objectives of this research, warranting an in-depth examination. In addition to this systematic review (SR), a supplementary endeavor involved mapping studies within the proceedings of the three editions of the International RILEM Conference on Concrete and Digital Manufacturing - Digital Concrete. Notably, the temporal progression of research in the 3DCP domain reveals not only an exponential growth but also an evolution in the breadth and intricacy of investigations. Moreover, the development of cementitious materials for this technology transcends the confines of academic research, as the construction market strategically invests in and expands its product portfolio. Furthermore, a significant portion of contemporary studies seeks alternatives that partially substitute the substantial volume of Portland cement (CP) in mixtures, often incorporating different types of waste. These alternatives aspire to meet stringent parameters necessary for additive manufacturing with cementitious materials, thereby positioning the technology as a competitive force in comparison to conventional market offerings.

**Keywords:** 3DCP. Cementitious materials. 3D printing concrete.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Extrusão em impressora 3D BOD2 da empresa COBOD em parceria com a Peri.....	15
<b>Figura 2</b> – Processo de construção de casa com impressão 3D em concreto (3DCP) desenvolvido por equipe da China liderada pelo professor Xu Weiguo.....	20
<b>Figura 3</b> – Curva complexidade-custo fabricação digital x construção convencional ..	20
<b>Figura 4</b> – Primeira idealização do processo <i>Contour Crafting</i> .....	22
<b>Figura 5</b> – Processo de impressão 3D em concreto por leito de agregado .....	24
<b>Figura 6</b> – Processo de jateamento de material .....	24
<b>Figura 7</b> – Sistema de impressão em jateamento para fundição em areia da empresa <i>ExOne</i> .....	25
<b>Figura 8</b> – Método de impressão 3D para colunas de concreto desenvolvido por equipe da ETH Zurique na Suíça .....	26
<b>Figura 9</b> – Área de produção 3DCP de colunas pré-fabricadas: (a) silo de mistura seca; (b) betoneira; (c) bomba de concreto; (d) misturador acelerador; (e) bomba aceleradora; (f) pórtico de 3 eixos; (g) robô manipulador; (h) ferramenta extrusora; (i) objeto de....	26
<b>Figura 10</b> – Gráfico taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do modelo de Bingham .....	28
<b>Figura 11</b> – Regimes de deposição de material por extrusão .....	31
<b>Figura 12</b> – Colapso durante o processo 3DCP para concepção de colunas pré-fabricadas .....	32
<b>Figura 13</b> – Porcentagem de materiais (por volume) em concretos convencional, autoadensável e para 3DCP .....	33
<b>Figura 14</b> – Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática – RBS <i>Roadmap</i> .....	42
<b>Figura 15</b> – Procedimento iterativo da fase de processamento – RBS <i>Roadmap</i> .....	44
<b>Figura 16</b> – Etapas de condução realizadas na “Fase de Processamento” da RLS .....	47

<b>Figura 17</b> – Tela de Execução da ferramenta StArt para a base <i>Scopus</i> .....	48
<b>Figura 18</b> – Tela de Execução da ferramenta StArt para a base <i>Web of Science</i> .....	48
<b>Figura 19</b> – Tela da extração final da segunda etapa do processo na ferramenta StArt	49
<b>Figura 20</b> – Gráfico da representação dos países que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no <i>Digital Concrete 2022</i> .....	55
<b>Figura 21</b> – Mapa de localização dos países que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no <i>Digital Concrete 2022</i> .....	58
<b>Figura 22</b> – Mapa dos países da Europa que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no <i>Digital Concrete 2022</i> .....	58
<b>Figura 23</b> – Comportamento reológico das misturas cimentícias com SCM.....	61
<b>Figura 24</b> – Efeito da associação de CV e SA na tensão de escoamento estática e na viscosidade aparente da mistura .....	62
<b>Figura 25</b> – Efeito da associação das SCM ao CP na taxa de acúmulo estrutural da mistura de acordo com a relação água/aglomerante .....	63
<b>Figura 26</b> – Conceito “ <i>set-on-demand</i> ”: uma mistura cimentícia inicialmente retardada é ativada, ainda no reator de mistura, antes da deposição final .....	67
<b>Figura 27</b> – Ensaios com a CyBe <i>Mortar</i> , material cimentício produzido pela empresa CyBe .....	68
<b>Figura 28</b> – Processo de construção aplicando as tecnologias das empresas Cemex e Cobod em Luanda, na África.....	69
<b>Figura 29</b> – Construção finalizada pela empresa <i>Power2build</i> aplicando as tecnologias das empresas Cemex e Cobod em Luanda, na África .....	69
<b>Figura 30</b> – Paredes fabricadas com tecnologia 3DCP utilizando o Sikacrete-7100 3D70	

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Resumo quantitativo das primeiras etapas da “Fase de Processamento” da RSL .....	49
<b>Tabela 2</b> – Países que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no Digital Concrete 2022.....	54
<b>Tabela 3</b> – Misturas para tecnologia 3DCP associando as proporções agregado/ligante .....	65

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Critérios de inclusão e exclusão adotados para a RSL.....	45
<b>Quadro 2</b> – Descritores e critérios definidos para as strings nas bases Scopus e Web of Science.....	46
<b>Quadro 3</b> – Artigos selecionados para leitura completa a partir da RSL .....	53
<b>Quadro 4</b> – Quadro das Universidades/Institutos de ensino da Alemanha e suas respectivas áreas de pesquisa no <i>Digital Concrete 2022</i> .....	56
<b>Quadro 5</b> – Características e efeitos dos diferentes SCM nas misturas para 3DCP.....	60
<b>Quadro 6</b> – Características e efeitos do calcário e da argila calcinada, em forma de Metacaulim (MK) como fase principal, nas misturas para impressão .....	64
<b>Quadro 7</b> – Associação das principais empresas às composições e as tecnologias compatíveis com as misturas cimentícias produzidas para o mercado.....	67

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Considerações iniciais .....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Justificativa.....	16
1.4 Estrutura do trabalho .....	17
<b>2. A MANUFATURA ADITIVA COM MISTURAS CIMENTÍCIAS: HISTÓRICO, PROCESSOS, PARÂMETROS E COMPONENTES</b> .....	19
2.1 A manufatura aditiva e o setor da construção .....	19
2.2 A manufatura aditiva e os materiais cimentícios .....	21
2.3 Processos de manufatura aditiva com misturas cimentícias .....	23
2.4 Parâmetros de controle de misturas cimentícias para extrusão .....	27
2.4.1 Bombeamento, extrusão e capacidade de construção.....	29
2.4.2 Falhas durante o processo de fabricação 3DCP.....	32
2.5 Características dos componentes das misturas cimentícias para extrusão .....	33
2.5.1 Cimento Portland (CP) .....	34
2.5.2 Agregados .....	35
2.5.3 Materiais Cimentícios Suplementares (SCM) ou Adições Minerai.....	35
2.5.3.1 Cinza Volante (CV).....	36
2.5.3.2 Sílica Ativa (SA).....	37
2.5.3.3 Escória Granulada de Alto-forno (EGAF).....	38
2.5.4 Aditivos Químicos .....	39
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	41
3.1 Revisão Bibliográfica da Literatura (RBL) .....	41
3.2 Revisão Sistemática da Literatura (RSL) .....	41
3.2.1. Fase de Entrada da RSL.....	44

3.2.2. Fase de Processamento da RSL .....	46
3.3 Mapeamento dos anais da Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital - <i>Digital Concrete</i> .....	50
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>53</b>
4.1 Quantificação da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e dos anais da Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital - <i>Digital Concrete</i> .....	53
4.1.1. Revisão Sistemática de Literatura (RSL) .....	53
4.1.2. Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital - <i>Digital Concrete</i> .....	54
4.2 Misturas com Cimento Portland (CP) para extrusão .....	59
4.2.1. Materiais Cimentícios Suplementares (SCM) ou adições minerais .....	59
4.2.2. Argila Calcinada de Calcário (LC <sup>3</sup> ).....	64
4.3 Influência dos agregados nas misturas para extrusão .....	65
4.4 Influência dos aditivos químicos nas misturas para extrusão.....	66
4.5 Componentes das misturas cimentícias para extrusão no mercado.....	67
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>72</b>
5.1 Sugestão para trabalhos futuros.....	73
REFERÊNCIAS .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações iniciais

O concreto é o material de construção mais usado em todo o mundo e o material mais utilizado depois da água. Isso se deve às características inerentemente úteis do concreto: matérias-primas de fácil e global obtenção, relativa facilidade de processamento e manuseio e sua capacidade de passar de um estado fluido, onde pode preencher um molde, para um estado sólido, onde pode então suportar uma carga estrutural (WANGLER, 2019).

Segundo Flatt e Wangler (2022), a fabricação digital na construção foi impulsionada pelo desejo de abrir os espaços de projeto dos arquitetos, tornando acessível a concepção de estruturas cada vez mais complexas possibilitadas pelo projeto auxiliado por computador. A impressão tridimensional (3D), um subconjunto das tecnologias de fabricação digital, é uma das técnicas mais promissoras implementada com materiais cimentícios devido aos benefícios associados à construção livre de fôrmas, excelentes índices de produtividade e qualidade, redução no desperdício de material, maior liberdade arquitetônica e, também, ambientes de construção mais seguros (Barbosa, 2022).

No entanto, os requisitos do processo na fabricação digital com materiais cimentícios geralmente exigem misturas de pasta muito ricas em Cimento Portland (CP). Isso se dá porque, como a maioria desses processos envolve bombeamento, o uso de agregados graúdos é restringido, de modo que a maioria dos materiais à base de cimento para impressão 3D tende a ter um tamanho máximo de agregado de 4 mm ou menos (Boscaro *et al.*, 2022).

O maior desafio associado ao processo de impressão 3D com materiais cimentícios é o de empilhar camadas fortemente unidas umas às outras (Figura 1). Uma vez que as sobreposições das camadas ocorrem rapidamente, elas não terão resistência suficiente para evitar deformações causadas por seu próprio peso, e por outro lado, se ultrapassado o tempo ótimo de espera entre as deposições, haverá perda de adesão “intercamadas” e formação de juntas frias (Buswell *et al.*, 2018). Isso faz com que o volume da pasta aumente e, portanto, também o teor de cimento (Boscaro *et al.*, 2022).

**Figura 1** – Extrusão em impressora 3D BOD2 da empresa COBOD em parceria com a Peri



**Fonte:** Peri (2023)

Diante deste alto consumo de cimento, a redução da pegada de carbono (*carbon footprint*), uma metodologia criada para medir as emissões de gases estufa, é essencial para que as tecnologias relacionadas ao processo se tornem competitivas com a construção convencional. Nesse sentido, pesquisas recentes têm se concentrado no desenvolvimento de cimentos de baixo teor de clínquer e ligantes alternativos para fabricação digital (Boscaro *et al.*, 2022).

Somado a isso, avaliar a trabalhabilidade do material cimentício para impressão usando métodos convencionais ou outros métodos menos comumente usados também passou a ser alvo de vários estudos (Ahmed; Yehia, 2022). Uma compreensão inicial das propriedades frescas para a tecnologia em estudo, fornecida por Le *et al.* (2012), aponta que a capacidade de extrusão e a construção são os dois principais critérios que devem ser satisfeitos ajustando a trabalhabilidade. Nesse sentido, os métodos convencionais de ensaio não fornecem propriedades físicas fundamentais, devendo ser selecionados ensaios que proporcionem uma investigação mais reológica.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise das características de misturas cimentícias para manufatura aditiva por extrusão.

Além disso, tem como objetivo específico:

- Disseminar e estimular investigações, na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), sobre as potencialidades e aplicações da fabricação digital em misturas cimentícias para a construção civil no Brasil, mais especificamente para o estado de Alagoas.

### 1.3 Justificativa

Em 2017, um estudo da empresa americana de consultoria empresarial, *McKinsey & Company*, analisou que a produtividade da indústria da construção permaneceu estagnada nas últimas duas décadas. A pesquisa elencou diversas ações que vêm sendo tomadas por empresas e regiões inovadoras para lidar com essa falta de produtividade, entre elas destaca-se a infusão de tecnologia digital, novos materiais e automação avançada (Barbosa *et al.*, 2017).

Além da liberdade de forma, Wangler *et al.* (2019) colocam que o potencial das técnicas de fabricação digital com concreto e materiais cimentícios para revolucionar a construção é real, não só através da redução de custos, mas também trazendo mais sustentabilidade e maior funcionalidade. Os autores complementam que os desafios materiais são significativos, sendo o principal deles entender e controlar a hidratação precoce e a ligação com a reologia, a incorporação de reforço e, em geral, a ligação entre processamento, material e desempenho, tanto do ponto de vista estrutural quanto da durabilidade.

Na construção, o uso de concreto tem sido limitado principalmente à moldagem e padronização. O concreto fresco é lançado em fôrmas e, na maioria das vezes, é vibrado para obter um preenchimento uniforme. Em alguns casos, o custo da aplicação de fôrmas pode chegar à metade do custo total da estrutura de concreto (Chen; Liew, 2002).

A construção sem a necessidade do uso de fôrmas apresenta uma série de vantagens, dentre elas, a economia de custos, tempo e materiais associados à construção das peças. Estima-se que as tecnologias de fabricação digital em concreto consigam reduzir de 30% a 60% da geração de resíduos da construção, 50% a 80% dos custos com mão de obra e 50% a 70% do tempo de execução (Doris, 2016). Por outro lado, implica em alguns desafios significativos de engenharia de materiais, pois todos os requisitos que

normalmente são atendidos pela fôrma agora são impostos diretamente à mistura do concreto e à forma como ele é lançado (Marchon *et al.*, 2018).

Ainda não existem padrões, normas e diretrizes associados aos materiais cimentícios para manufatura aditiva, logo, são necessários testes específicos para quantificar as propriedades frescas e os comportamentos “intercamadas” de tais materiais (Chen *et al.*, 2022). Com isso, métodos e parâmetros para a caracterização das propriedades frescas de materiais cimentícios para manufatura aditiva durante o bombeamento e processos de extrusão estão em desenvolvimento, principalmente em âmbito internacional.

No contexto do Brasil, Universidades e Instituições de pesquisa estão conduzindo estudos pioneiros sobre o desenvolvimento de técnicas de manufatura aditiva com materiais cimentícios. Além disso, algumas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento em impressão 3D de concreto no Brasil envolvem colaborações com universidades, instituições de pesquisa e empresas de outros países. Entretanto, no país ainda existem poucas iniciativas o que direciona para um campo que ainda necessita ser bastante explorado (Dias, 2022).

Tendo em vista as potencialidades da tecnologia digital envolvendo materiais cimentícios para o setor da construção. Somado às barreiras para tornar a tecnologia competitiva com o mercado que envolve materiais e técnicas construtivas convencionais evidencia-se a necessidade de um panorama do estado da arte nos últimos anos. Além disso, por ainda existirem iniciativas pontuais, no contexto nacional, a presente pesquisa torna-se relevante para disseminação da aplicabilidade no país.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é composto por cinco capítulos, além das referências bibliográficas. O primeiro capítulo consiste na introdução e nele foram abordadas as considerações iniciais, os objetivos gerais e específicos, as justificativas e a disposição dos tópicos abordados.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre a manufatura aditiva com misturas cimentícias. O capítulo contextualiza a aplicação da tecnologia na indústria da construção somado ao desenvolvimento envolvendo misturas cimentícias.

Além disso, expõe os principais processos, parâmetros e características das misturas cimentícias para a manufatura aditiva por extrusão.

O terceiro capítulo consiste nos procedimentos metodológicos, apresentando as etapas executadas para a revisão sistemática da literatura (RSL) e o mapeamento dos estudos desenvolvidos no *Digital Concrete*.

O quarto capítulo expõe os resultados quantitativos e as discussões sobre a crescente exploração de estudos associados a fabricação digital com materiais à base de cimento, bem como sobre a influência dos materiais constituintes das misturas cimentícias para que os requisitos requeridos pela tecnologia 3DCP seja atendido. Além disso, o capítulo apresenta a característica dos materiais desenvolvidos no mercado.

Por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **2. A MANUFATURA ADITIVA COM MISTURAS CIMENTÍCIAS: HISTÓRICO, PROCESSOS, PARÂMETROS E COMPONENTES**

Neste capítulo será apresentado o panorama geral construído a partir de abordagens da literatura sobre a manufatura aditiva com misturas cimentícias. Inicialmente será apresentado o contexto da manufatura aditiva no setor da construção, bem como seu desenvolvimento associado às misturas cimentícias. Além disso, serão expostos os principais processos de fabricação aditiva, assim como os parâmetros de controle e as características dos componentes das misturas para extrusão.

### **2.1 A manufatura aditiva e o setor da construção**

A facilidade de acesso e a popularização das ferramentas digitais tornou o desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia dependente do uso dos programas de computador. Logo, os programas destinados ao setor da construção evoluíram para atender as especificidades dos projetos. Assim, é possível contar com ferramentas inovadoras como algoritmos generativos para estudo da forma, sistema de modulação automática, análise estrutural, análise térmica, simulação de fluidos, gerenciamento de projetos, coordenação de obra, entre outras (Florêncio, 2019).

Kolarevic (2001) define a Manufatura Aditiva (MA) como um processo automatizado que envolve a conformação pela adição sucessiva de material por camadas. Nesse viés, a impressão tridimensional (3D) é um processo de fabricação aditiva a partir de modelos de Desenho Assistido por Computador (CAD) – tecnologia de interlocução gráfica entre usuário e computador através de *softwares* para a concepção e execução virtual de projetos em diversas áreas (Leake; Borgerson, 2015).

No campo da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), a fabricação digital é definida como um processo de fabricação ou construção baseado na conversão perfeita de dados de projeto e engenharia em código de fabricação para ferramentas controladas digitalmente (Gershenfeld, 2012). Kaseman e Graser (2020) pontuam que os processos de fabricação digital na construção incluem montagem robótica, fabricação aditiva em larga escala e o uso de sistemas de automação especializados para processamento de materiais em áreas que vão desde a fabricação avançada de montagens de metal ou

madeira até várias formas de processamento de concreto para a fabricação de materiais compostos (Figura 2).

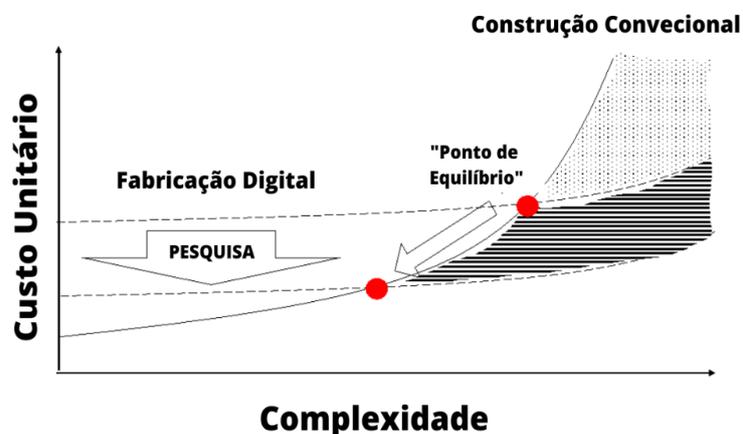
**Figura 2** – Processo de construção de casa com impressão 3D em concreto (3DCP) desenvolvido por equipe da China liderada pelo professor Xu Weiguo



Fonte: ArchDaily Brasil (2021)

Uma das grandes vantagens das tecnologias digitais na construção é a possibilidade da introdução de formas complexas, potencialmente mais eficientes e sustentáveis em termos de materiais e custo. Wangler *et al.* (2019) apresentaram as curvas complexidade-custo em relação ao processo de construção convencional e ao da fabricação digital, Figura 3.

**Figura 3** – Curva complexidade-custo fabricação digital x construção convencional



Fonte: Wangler *et al.* (2019)

A partir da curva que representa a construção convencional, é evidente que o custo unitário da produção de um componente aumenta, exponencialmente, à medida que sua complexidade aumenta. Em relação à curva associada à fabricação digital, o custo unitário atrelado às construções menos complexas é inicialmente bem maior, mas ao passo que a complexidade aumenta o custo tende a tornar-se muito menor comparado aos métodos convencionais (Wangler *et al.*, 2019).

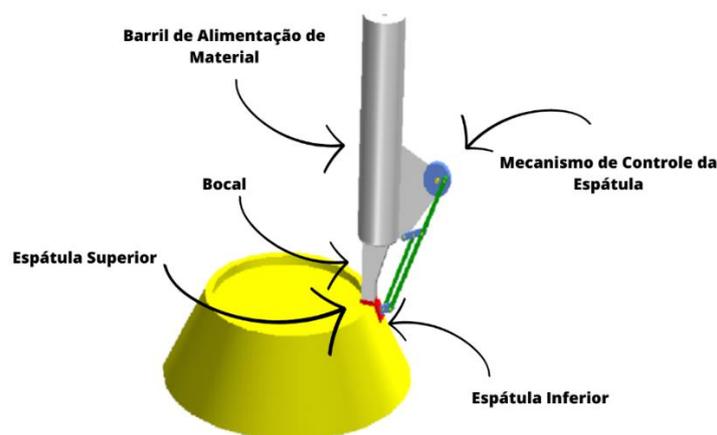
Por outro lado, os autores destacam que onde as curvas se cruzam existe um “ponto de equilíbrio” que torna a fabricação digital economicamente competitiva com os métodos convencionais. Além disso, o desenvolvimento contínuo de pesquisas tende a conduzir a curva da fabricação digital para baixo, deslocando o ponto de equilíbrio mais para a esquerda tornando os componentes menos complexos econômicos para produção com a tecnologia (Wangler *et al.*, 2019).

## **2.2 A manufatura aditiva e os materiais cimentícios**

Em 1998, na Universidade do Sul da Califórnia, o projeto “*Contour Crafting*” (CC) ou “Fabricação de Contorno”, liderado pelo professor Behrokh Khoshnevis revelou o potencial da impressão 3D no setor da construção em larga escala (Khoshnevis; Dutton, 1998). Na década de 90, a automação crescia e prevalecia em quase todos os setores industriais, mas no setor da construção o processo era lento devido, principalmente, à dificuldade de adaptação dos métodos convencionais para construção de grandes estruturas (Khoshnevis, 2004).

A partir disso, Khoshnevis (2004) apresenta a CC como a primeira tecnologia de fabricação aditiva controlada por computador que cria superfícies planas de forma livre, suaves e precisas a partir de um bico extrusor e espátulas (Figura 4). Com isso, melhor qualidade de superfície, maior velocidade de fabricação e a possibilidade de escolha mais ampla de materiais, como por exemplo o concreto, são algumas das vantagens importantes do CC em comparação a outros processos de fabricação (Khoshnevis, 2004).

**Figura 4** – Primeira idealização do processo *Contour Crafting*



**Fonte:** Adaptado de Khoshnevis (2004)

Lyu *et al.* (2021) destacam que o *Contour Crafting* impulsionou o desenvolvimento de estudos e aplicações da impressão 3D com materiais à base de cimento, caracterizando o processo de avanço como aumento contínuo na escala da indústria; surgimento e desenvolvimento de novos materiais; e contínuo surgimento de novas tecnologias e aplicações de engenharia.

Nos últimos anos, a União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção (RILEM - *Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, systemes de construction et ouvrage*) tem publicado diversos estudos e relatórios sobre a tecnologia de impressão 3D com materiais cimentícios. Em 2016, durante a 71ª Reunião Geral da organização em Delft, na Holanda, foi criado o Comitê Técnico de Tecnologia de Impressão 3D de Concreto do RILEM. O comitê é composto por especialistas de várias partes do mundo, incluindo universidades, institutos de pesquisa e empresas da área da construção civil que tem trabalhado no desenvolvimento de normas e diretrizes com técnicas de fabricação digital envolvendo materiais à base de cimento. Além disso, a comissão promove a colaboração entre pesquisadores, profissionais e indústrias através de eventos como a Conferência Internacional RILEM em Concreto e Fabricação Digital - *Digital Concrete* (RILEM, 2023).

### 2.3 Processos de manufatura aditiva com misturas cimentícias

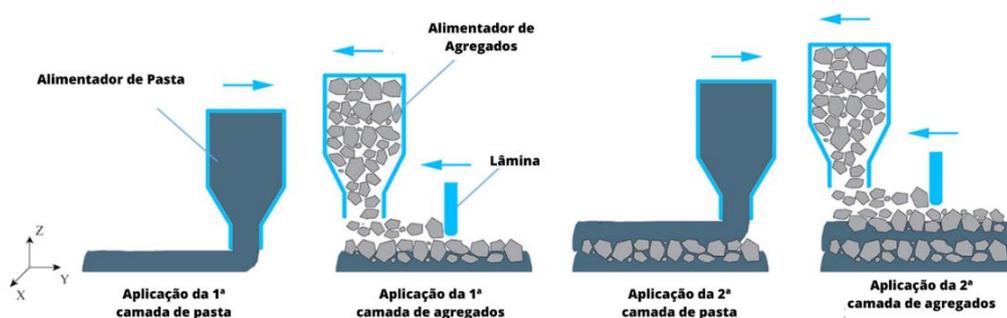
Em geral, os métodos de fabricação digital com materiais cimentícios podem ser classificados com base no processo, mas todos apresentam como base a construção sem o uso de fôrmas tradicionais (Wangler *et al.*, 2019). Além disso, Mechtcherine *et al.* (2020) ressaltam que os processos diferem consideravelmente em relação a seus respectivos conceitos de materiais, equipamentos e etapas de produção, embora todos se baseiem na interação efetiva entre material e máquina ao longo da cadeia de processamento.

Buswell *et al.* (2020) classificam os processos para Manufatura Aditiva (MA) com materiais à base de cimento em larga escala em: ligação de leito de partículas (*particle bed-binding*), jateamento de material (*material jetting*) e extrusão de material (*material extrusion*).

A técnica de MA por ligação de leito de partícula é composta por duas principais etapas repetitivas de processo: aplicação de uma camada de partículas secas e deposição de uma fase fluida, por meio de um bocal, para o empacotamento das partículas. A partir de um processo de despoeiramento, as partículas não ligadas são removidas e, após concluído o ciclo de impressão, a resistência e a durabilidade do produto podem ser melhoradas por infiltração ou tratamento térmico (Lowke *et al.*, 2018).

Com isso, os pesquisadores Yu, Du e Sanjayan (2020) propuseram o sistema de ligação por leito de partículas com material à base de cimento, ilustrado na Figura 5. O processo é composto por um alimentador de agregado que armazena e espalha uma certa quantidade de agregados para cada camada, uma lâmina para controlar a altura de cada camada e um alimentador de pasta que deve ter a capacidade de extrudar a pasta a uma taxa de fluxo constante e precisa. Uma das vantagens do processo em comparação com as outras técnicas de MA é a possibilidade da utilização de maior volume de agregado graúdo durante a impressão, desde que seja usado um aglutinante compatível (Yu; Du; Sanjayan, 2020).

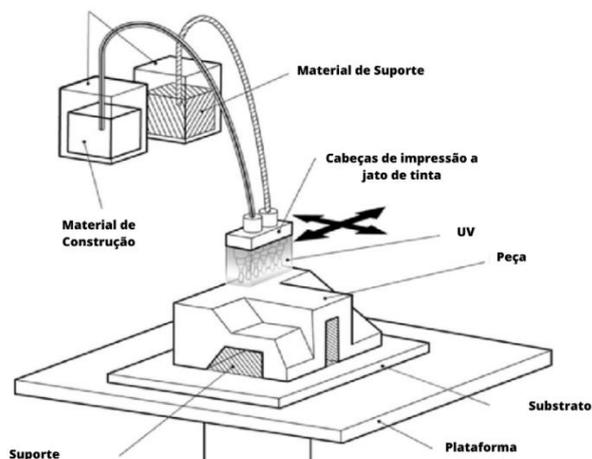
**Figura 5** – Processo de impressão 3D em concreto por leito de agregado



Fonte: Adaptado de Yu, Du e Sanjayan (2020)

O processo de fabricação aditiva de jateamento de material gera peças com base na tecnologia de jato de “tinta” e, portanto, também é comumente referido como jateamento de tinta (*binder jetting*). Os sistemas de impressão são baseados em duas etapas: impressão/jateamento e cura. Durante a etapa de impressão, os cabeçotes de impressão ejetam gotas minúsculas e precisas de “tinta” por meio de vários bicos em um substrato, onde as gotas se espalham e se aglutinam. Além disso, o processo injeta pelo menos dois materiais: material de construção e material de suporte. Para garantir a suavidade da superfície e a altura uniforme da camada, alguns processos apresentam a etapa de nivelamento da camada aplicada para remover o material saliente da camada impressa e ainda não polimerizada. Esta etapa é então seguida por uma etapa de cura UV solidificando esta camada impressa. Essas etapas serão repetidas camada por camada até que o objeto seja concluído (Elkaseer *et al.*, 2022), Figura 6.

**Figura 6** – Processo de jateamento de material



Fonte: Adaptado de Otton *et al.* (2016)

Segundo Shakor *et al.* (2022), a tecnologia por jateamento de material tem o potencial de trazer avanços significativos para a indústria da construção. Os autores destacam principalmente a possibilidade de escolha de diversos materiais, incluindo cimento, agregados e aditivos. No entanto, enfatizam que mais pesquisas são necessárias para aprimorar e aperfeiçoar a técnica, visando o desenvolvimento de novos materiais, o aprimoramento dos processos de impressão e a otimização dos projetos.

No mercado, algumas empresas, como a *ExOne*, já fornecem sistemas de impressão baseada no jateamento com uma variedade de materiais, além de flexibilidade e inovação de material do jato de ligantes, Figura 7.

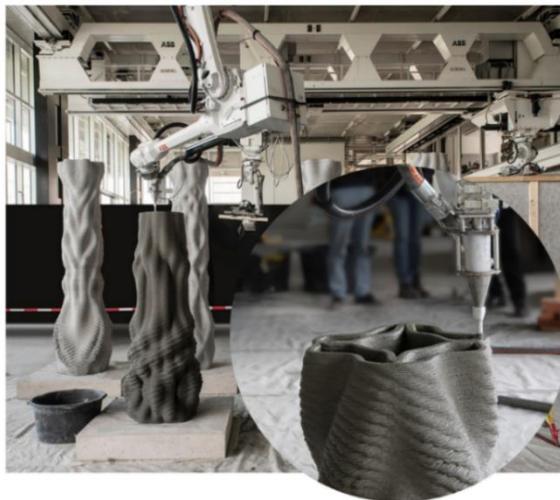
**Figura 7** – Sistema de impressão em jateamento para fundição em areia da empresa *ExOne*



**Fonte:** *ExOne* (2022)

A impressão 3D por extrusão é atualmente um dos métodos de fabricação digital aditiva mais utilizados com concreto – *3D Concrete Printing (3DCP)*, método em foco nesta pesquisa. A 3DCP é caracterizada por originar um filamento contínuo depositado sobre camadas sucessivas através de um bico, muitas vezes montado em um pórtico ou braço robótico, que posiciona o material durante o processo de construção (Buswell *et al.*, 2018). Do ponto de vista da sustentabilidade, uma das grandes vantagens desse processo de controle digital é a deposição do material apenas onde é estruturalmente necessário, maximizando a eficiência estrutural e minimizando o uso de materiais (Anton *et al.*, 2021), Figura 8.

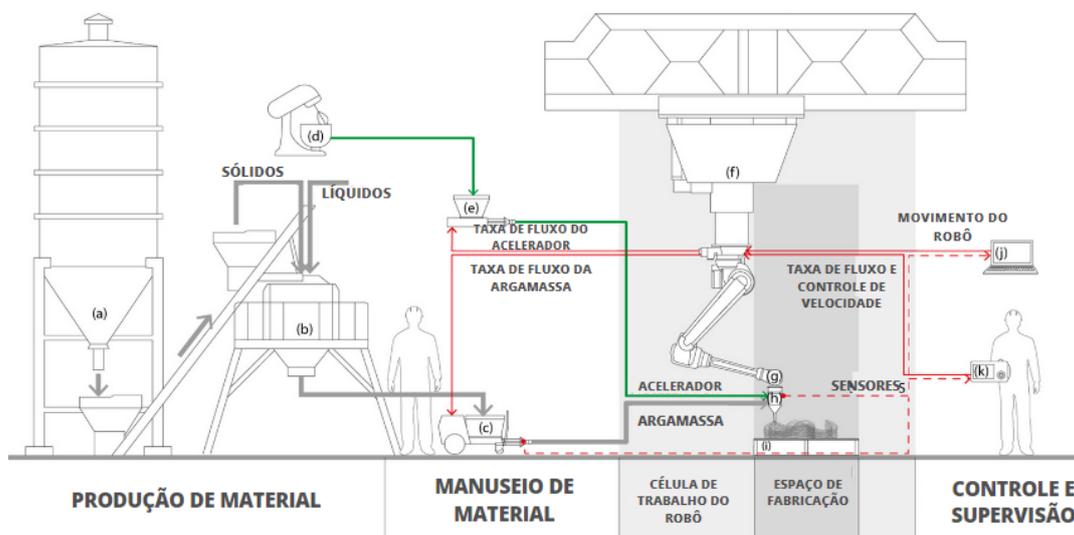
**Figura 8** – Método de impressão 3D para colunas de concreto desenvolvido por equipe da ETH Zurique na Suíça



Fonte: ArchDaily Brasil (2019)

O processo 3DCP envolve a combinação do material, da extrusora e dos mecanismos de movimento em um sistema unificado. Além disso, são necessários espaços de produção específicos que incluem uma área designada para a mistura e manipulação do concreto, uma área fechada e segura destinada a abrigar o robô ou braço robótico responsável pelo processo de impressão e uma área limpa designada para o controle e monitoramento dos parâmetros e da qualidade da impressão (Anton *et al.*, 2021). A figura 9 ilustra um modelo de área de produção 3DCP de colunas pré-fabricadas.

**Figura 9** – Área de produção 3DCP de colunas pré-fabricadas: (a) silo de mistura seca; (b) betoneira; (c) bomba de concreto; (d) misturador acelerador; (e) bomba aceleradora; (f) pórtico de 3 eixos; (g) robô manipulador; (h) ferramenta extrusora; (i) objeto



Fonte: Adaptado de Anton *et al.* (2021)

Nos tópicos que se seguem será exposto, de forma mais aprofundada, sobre os parâmetros de controle e as características dos componentes das misturas cimentícias para o processo 3DCP.

#### 2.4 Parâmetros de controle de misturas cimentícias para extrusão

Segundo Wangler (2018), uma característica fundamental do processamento digital de fabricação 3DCP é a necessidade de um processamento contínuo com controle de material mais rígido que o processamento convencional. Uma das principais problemáticas de controle é em relação ao tempo das mudanças reológicas do material.

Nas etapas de processamento de impressão o mesmo material deve cumprir requisitos contraditórios em momentos muito específicos. Com isso, na 3DCP, os requisitos de reologia buscam lidar com a capacidade de mudança do material bombeável para um material quase sólido capaz de suportar seu próprio peso, dentro de uma janela de tempo extremamente curta (Wangler *et al.*, 2019).

A reologia é o ramo da ciência que estuda as deformações, no caso de sólidos, e o fluxo, no caso de líquidos. Nos processos de construções convencionais e na manufatura aditiva 3DCP, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica são propriedades reológicas dos materiais cimentícios que desempenham um papel importante na previsão de fluxo durante o bombeamento e lançamento de concretos convencionalmente vibrados e autoadensáveis (Wangler *et al.*, 2022).

Ferraris (1999) aponta que os materiais à base de cimento, como argamassas e concretos, são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta). Com isso, o modelo de Bingham, dado pela Equação 1, é utilizado para caracterizar o comportamento reológico desses materiais (Ferraris, 1999).

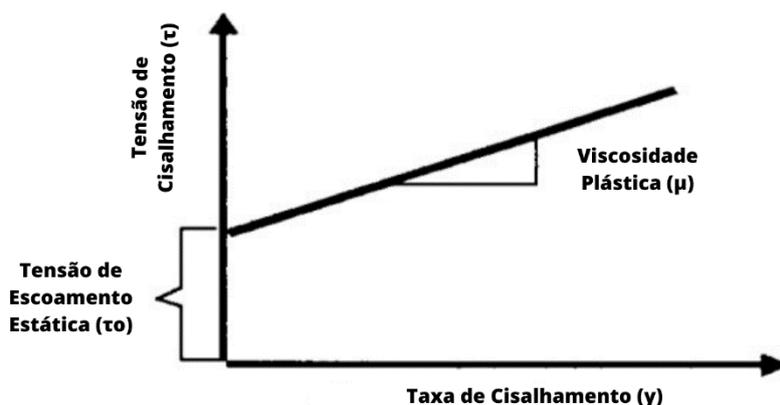
$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (1)$$

Onde:  $\tau$  corresponde a tensão de cisalhamento,  $\gamma$  a taxa de cisalhamento,  $\tau_0$  a tensão de escoamento e  $\mu$  a viscosidade plástica.

No geral, o fluxo é iniciado quando uma certa tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) é aplicada ao material. Com isso, é denominada de tensão de escoamento estática ( $\tau_0$ ), a

tensão de cisalhamento mínima necessária para iniciar o escoamento. Além disso, uma vez que o material começa a fluir é necessária uma tensão de cisalhamento, denominada tensão de escoamento dinâmica, para manter o fluxo. A viscosidade plástica ( $\mu$ ) é o fator de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, com isso, caracteriza a resistência interna do fluido ao escoamento (Ferraris, 1999). A figura 10 ilustra o modelo de Bingham, o ponto que intercepta o eixo de tensão representa a tensão de escoamento e a viscosidade plástica é a inclinação do gráfico.

**Figura 10** – Gráfico taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do modelo de Bingham



Fonte: Adaptado de Ferraris (1999)

Quando a tensão ou deformação aplicada ao material cessa, o processo de floculação das partículas irá restaurar a tensão de escoamento estática, esse fenômeno é chamado de tixotropia (Roussel, 2006). Somado a isso, ao longo do tempo, os materiais cimentícios no estado fresco passam por um processo de estruturação devido ao aumento da interação interpartículas e ao início da hidratação do cimento (Perrot; RANGEARD; Pierre, 2016). A evolução da tensão de escoamento tem sido chamada de acúmulo estrutural (Wangler *et al.*, 2022).

Diante disso, segundo Rehman e Kim (2021), durante o processo 3DCP deve existir um equilíbrio entre os requisitos reológicos das etapas de bombeamento (*pumpability*), extrusão (*extrudability*) e capacidade de construção (*buildability*), mais a frente esses requisitos serão definidos de forma detalhada. Os autores ressaltam que se for usado um material com baixa tensão de escoamento, para ajudar nos estágios de bombeamento e extrusão, o material extrudado não manterá sua forma. Em contrapartida, se for utilizado um material rígido, com alta tensão de escoamento e viscosidade, para

obter retenção de forma e alta capacidade de construção, acarretará o aumento da potência de bombeamento, bem como dificultará o processo de extrusão através do bocal. Portanto, as misturas para 3DCP são projetadas para garantir baixa viscosidade e alto limite de escoamento (Rehman; Kim, 2021).

Outro fator importante relacionado aos processos de bombeamento e extrusão é que, durante esses estágios, diferentes comportamentos de fluxo podem ocorrer para materiais à base de cimento. O cisalhamento excessivo do material cimentício, quando bombeado através de uma tubulação até o bico extrusor, e a extrusão através do bocal estreito alteram a composição e a reologia da mistura (Vallurupalli; Farzadnia; Khayat, 2021).

Com isso, além das propriedades reológicas das misturas cimentícias, os parâmetros de controle do processo 3DCP também estão associados às características do processo de impressão, como taxa de bombeamento, espessura do tubo e geometria do bocal extrusor (Vallurupalli; Farzadnia; Khayat, 2021).

#### **2.4.1 Bombeamento, extrusão e capacidade de construção**

Lyu *et al.* (2021) apontam que a capacidade de impressão (*printability*) para materiais à base de cimento está diretamente ligada à garantia de um bombeamento eficaz a partir da fluidez do material (*pumpability*), à extrusão contínua durante o processo (*extrudability*) e à capacidade de manter o acúmulo estrutural estável (*buildability*).

A capacidade de bombeamento é definida como a característica da mistura cimentícia, no caso da 3DCP, ser transportada através de um sistema de bombeamento sob pressão para o bico extrusor, mantendo suas propriedades iniciais por todo o intervalo de tempo. Com isso, um material bombeável deve possuir baixa viscosidade plástica e tensão de escoamento moderada, além de depender de parâmetros como distância de bombeamento, método de bombeamento e diâmetro do tubo (Zhang *et al.*, 2021).

Rehman e Kim (2021) ressaltam que as misturas cimentícias são heterogêneas. Logo, quando a mistura é bombeada ocorre a migração de partículas formando uma camada de lubrificação, cisalhada nas paredes do tubo, e uma camada com concentração dos agregados no centro do tubo. Essas camadas têm aspectos reológicos diferentes, com isso, o requisito de bombeamento ideal depende da combinação da tensão de escoamento

e da viscosidade plástica de ambas as camadas. Nesse contexto, Zhang *et al.* (2021) complementam que o material da mistura deve ser capaz de resistir à segregação sob tais altas pressões de bombeamento. Com isso, Mechtcherine *et al.* (2020) afirmam que a metodologia de caracterização das propriedades reológicas relevantes para o bombeamento dos materiais cimentícios e da camada lubrificante, bem como a previsão das pressões de bombeamento são os maiores desafios atrelados ao controle desse parâmetro. Alguns pesquisadores estimam as pressões ótimas necessárias para o bombeamento de misturas cimentícias, a partir da vazão e pressão do material no tubo. Essas estimativas são geradas de acordo com as características e parâmetros do processo de impressão abordado (Zhang *et al.*, 2021).

Zhang *et al.* (2021) definem a capacidade de extrusão como a aptidão da mistura em depositar um filamento contínuo, sem bloqueio e/ou falhas, a partir do bocal de extrusão. Lyu *et al.* (2021) destacam que a razão entre o tamanho das partículas agregadas e o diâmetro do bocal de extrusão é o principal fator que afeta a eficiência da extrusão. Logo, a composição e as distribuições de tamanho dos constituintes secos na mistura são as principais características que afetam o processo. Somado a isso, a dimensão do bocal de extrusão caracteriza a forma e o tamanho finais do objeto extrudado (Zhang *et al.*, 2021).

Por fim, a capacidade de construção pode ser definida como a capacidade do material em formar camada aderidas à medida que ocorre o processo de extrusão. Além disso, o material deve suportar o peso das sucessivas camadas acumuladas no processo mantendo os filamentos extrudados estáveis (Zhang *et al.*, 2021).

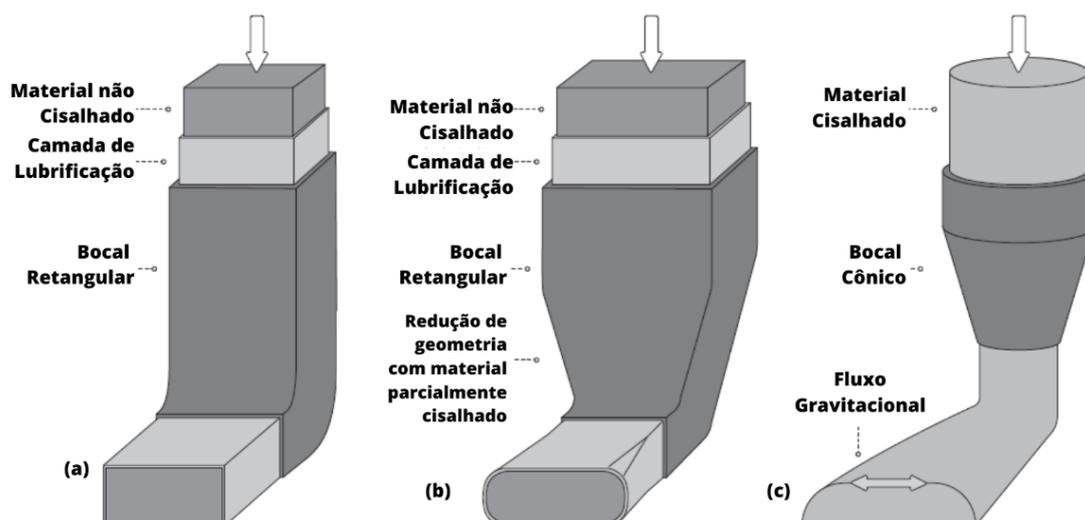
Pela ausência de fôrmas na técnica 3DCP, o material cimentício recém-extrudado deve recuperar sua viscosidade inicial e tensão de escoamento estática antes da deposição da próxima camada (Panda; Tan, 2018). Logo, segundo Zhang *et al.* (2021), esse parâmetro está diretamente associado a taxa de acúmulo estrutural que, por sua vez, depende da flocculação das partículas e dos mecanismos de hidratação do cimento. Mechtcherine *et al.* (2020) destacam que o aumento da rigidez e da resistência do material, ao longo do tempo, permite que o material depositado resista ao aumento das cargas associadas à impressão da estrutura. Desta forma é possível calcular e prever as

velocidades ótimas de fabricação para garantir a estabilidade e a compensação da deformação elástica da estrutura impressa.

Somado a isso, no processo 3DCP, após a deposição, há “competição” entre a força da gravidade e a resistência do material, dada pela razão entre a tensão induzida pela gravidade e a tensão de escoamento do material (Mechtcherine *et al.*, 2020). Com isso, para que uma determinada camada seja estável e sua forma seja controlada após a deposição, uma tensão de escoamento inicial deve sustentar as tensões de gravidade induzidas pela própria deposição (Roussel, 2018).

Mechtcherine *et al.* (2020) ressaltam que o formato final da camada depositada irá depender da tensão de escoamento do material, da seção transversal da abertura do bocal e do vão entre o bocal e as camadas impressas. Na figura 11 estão ilustrados os casos de deposições ideais dos regimes de extrusão com material rígido (11-a) e material fluido com deposição de fluxo livre (11-c). Mechtcherine *et al.* (2020) descrevem o primeiro caso como regime de extrusão “tijolo infinito”, onde as seções transversais do filamento e do bocal são iguais. No segundo caso, o material flui livremente até que a tensão induzida pela gravidade iguale à tensão de escoamento da mistura extrudada. Os autores destacam que, no contexto da manufatura aditiva com materiais cimentícios, a maioria dos fluxos e deposições de extrusão está entre esses regimes assintóticos (11-b).

**Figura 11** – Regimes de deposição de material por extrusão



Fonte: Adaptado de Mechtcherine *et al.* (2020)

### 2.4.2 Falhas durante o processo de fabricação 3DCP

Durante o processo 3DCP são esperados dois modos de ocorrências de falhas nas estruturas extrudadas. Segundo Rehman e Kim (2021) pode ocorrer a falha devido ao escoamento plástico do material cimentício ou a instabilidade devido à flambagem elástica da altura da estrutura. Os autores complementam que a ocorrência dos modos de falha é afetada pela geometria do objeto final, pela tensão de escoamento, pela taxa de estruturação e pela taxa de construção vertical.

Panda, Lim e Tan (2019) pontuam que a deformação elástica pode ocorrer devido à baixa rigidez do concreto. Enquanto, a ruptura plástica pode ocorrer devido à resistência a verde inadequada, etapa de processo de formação de resistência à tração do material cimentício. Com isso, Kruger *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de construtibilidade para avaliar a velocidade ideal de extrusão e a altura da camada para construir uma altura vertical especificada dentro de um intervalo de tempo definido. Este modelo é baseado na evolução dos parâmetros reológicos com o tempo e peso próprio do concreto e leva em conta a ruptura plástica do concreto. A Figura 12 ilustra o momento do colapso durante os estudos para construção de colunas pré-fabricadas com material cimentício proposta por Anton *et al.* (2021).

**Figura 12** – Colapso durante o processo 3DCP para concepção de colunas pré-fabricadas



**Fonte:** Anton *et al.* (2021)

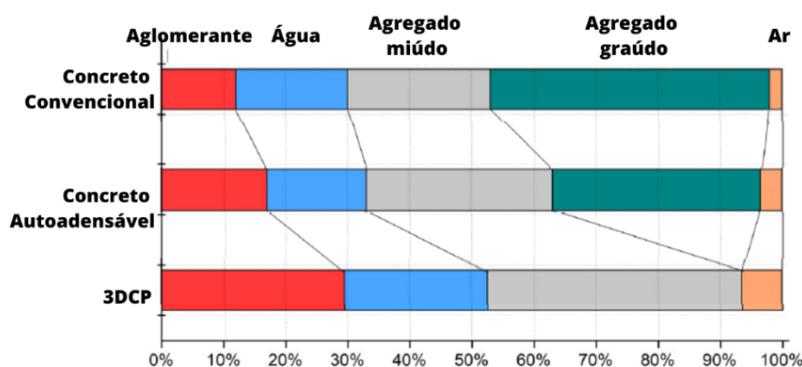
## 2.5 Características dos componentes das misturas cimentícias para extrusão

No geral, as propriedades reológicas das misturas cimentícias dependem da qualidade de cada material constituinte e suas interações. Na manufatura aditiva para extrusão, a seleção dos componentes constituintes das misturas cimentícias e o estudo de dosagem devem atender aos requisitos reológicos característicos à tecnologia de impressão (Barbosa, 2022).

Helene e Tutikian (2005) definem a dosagem como o estudo dos procedimentos necessários à obtenção da proporção ideal entre os materiais constituintes de uma mistura cimentícia. Logo, deve ser realizada visando obter uma mistura que atenda uma série de requisitos demandados para o seu fim, de forma econômica e a partir dos materiais disponíveis em uma determinada região.

Rehman e Kim (2021) apontam que a maioria das misturas 3DCP desenvolvidas não contém agregado graúdo, para evitar o bloqueio do processamento durante as etapas de bombeamento e extrusão. Com isso, para aumentar a tensão de escoamento e a capacidade de retenção de forma após a extrusão, as misturas 3DCP são projetadas com maior teor de aglomerante e agregado miúdo do que as misturas de concreto convencionais e concreto autoadensável (CAA), Figura 13. Diante disso, pesquisadores estão buscando investigar soluções ecológicas que reduzam o impacto ambiental negativo causado pelo aumento da proporção de aglutinante nas misturas (Rehman; Kim, 2021). Outro ponto relevante é que, devido à ausência de agregado graúdo, alguns pesquisadores caracterizam as misturas para 3DCP como argamassas (Buswell *et al.*, 2020).

**Figura 13** – Porcentagem de materiais (por volume) em concretos convencional, autoadensável e para 3DCP



Fonte: Adaptado de Rehman e Kim (2021)

Devido à complexidade para obtenção de misturas cimentícias que sejam compatíveis com os parâmetros de controle do processo de impressão, para alcançar as formulações ideais são feitos testes iterativos. Logo, com base no desempenho das misturas frescas, quando a mistura é compatível com o requisito anterior, logo em seguida é testada para o próximo requisito. Caso contrário, a mistura é alterada através da variação dos componentes que influenciam o parâmetro e, novamente, seu desempenho é observado. Este processo continua até que a mistura de concreto atenda a todos os requisitos da operação de impressão (Rehman; Kim, 2021).

Como abordado no tópico 2.4, o material cimentício para a tecnologia de MA por extrusão requer mudanças reológicas em um espaço de tempo bastante curto. Com isso, os aditivos químicos são componentes que auxiliam no controle da mistura para que o material com baixo limite de escoamento e bombeável possa aumentar a tensão de escoamento linearmente, ao longo do tempo, para corresponder à taxa de construção necessária ao produto (Wangler *et al.*, 2022).

Assim, semelhante às misturas cimentícias para métodos convencionais, as misturas para 3DCP podem ser desenvolvidas com diferentes tipos de aglomerantes, agregados finos, diferentes proporções água/aglomerante e aditivos químicos. Nesse viés, a seguir serão destacadas as principais características dos componentes constituintes das misturas para extrusão.

### **2.5.1 Cimento Portland (CP)**

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o Cimento Portland (CP) um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer, produto da calcinação de calcário e argila. Durante a fabricação do CP são adicionadas a quantidade necessária, de uma ou mais formas, de sulfato de cálcio e adições minerais em teores que possibilitam a melhoria das propriedades do material e diferentes aplicações.

O CP é constituído por quatro compostos químicos principais, os silicatos e aluminatos:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ , provenientes do clínquer. Quando misturado com água, o cimento Portland desenvolve reações químicas entre os compostos anidros, silicatos e aluminatos, que resultam nas propriedades mecânicas e de durabilidade associadas às misturas cimentícias (Taylor, 1997).

Segundo Cook, Lake e Mitchell (2006), as reações derivadas do processo de hidratação são complexas, pois cada fase presente no clínquer apresenta diferentes velocidades de processos de reação com a água e ocorre de maneira simultânea. Com isso, para o controle dos parâmetros requeridos no processo 3DCP torna-se essencial o estudo minucioso do mecanismo de hidratação das misturas cimentícias.

### **2.5.2 Agregados**

Conforme definido na NBR 9935 (ABNT, 2005), os agregados são caracterizados como substâncias sem forma ou volume definidos, geralmente inertes, com dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassas e concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2014), por serem considerados inertes, os agregados não sofrem reações químicas com a água. Com isso, esses materiais são caracterizados como material de enchimento, fixo nas misturas cimentícias. Os autores destacam que os agregados ocupam de 60 a 80% do volume das misturas à base de cimento utilizadas e, além disso, possuem baixo custo em relação a outros insumos.

Além disso, os agregados podem ser classificados quanto à origem, que podem ser naturais, encontrados na natureza, artificiais, passam por um processo industrial, com sua massa específica em leves, normais ou pesados, pela forma dos grãos em arredondados, angulosos ou irregulares e de acordo com sua dimensão em graúdos e miúdos (ABNT, 2005).

Para a tecnologia 3DCP, devido à limitação na dimensão do agregado nas misturas para o processo, o estudo da granulometria é essencial. Segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2013), a qualidade do material cimentício final é influenciada diretamente pela composição granulométrica, principalmente quando se refere a trabalhabilidade, densidade e resistência mecânica.

### **2.5.3 Materiais Cimentícios Suplementares (SCM) ou Adições Mineraias**

Os Materiais Cimentícios Suplementares (SCM), também conhecidos como adições minerais, são partículas finas obtidas por beneficiamento de resíduos industriais e de mineração. Atualmente, os SCM servem como uma das principais ferramentas para redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas à produção de materiais à base de cimento na construção civil. Por apresentarem características semelhantes ou

complementares às do cimento, os SCM são usados como substitutos parciais do clínquer em cimentos ou como substitutos parciais do Cimento Portland (CP) nas misturas cimentícias (Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Jiao *et al.* (2017) destacam que as propriedades reológicas das misturas cimentícias são significativamente influenciadas pelo tipo, composição química, teor, densidade de empacotamento, finura, textura da superfície e distribuição granulométrica das adições minerais. Com isso, os SCM podem melhorar as propriedades reológicas e tixotrópicas, bem como a estabilidade da mistura no estado fresco. Além de impactar na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade do material cimentício (Ahari; Erdem; Ramyar, 2015).

Na tecnologia 3DCP, as Cinzas Volantes (CV), a Sílica Ativa (SA) e a Escória Granulada de Alto-Forno (EGAF) são alguns tipos de resíduos industriais incorporados aos compósitos cimentícios visando obter uma mistura ecologicamente sustentável e que auxiliem no controle dos requisitos de impressão (Wang *et al.*, 2022).

#### **2.5.3.1 Cinza Volante (CV)**

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), as cinzas volantes são resíduos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado. Somado a isso, Yao *et al.* (2015), as cinzas volantes são um dos materiais antropogênicos mais complexos e abundantes provenientes da combustão de carvão em usinas termelétricas. Os autores complementam que as propriedades químicas e de fase das CV dependem da composição mineral do carvão, das condições de combustão e da configuração do coletor.

Fisicamente, as cinzas volantes apresentam-se como partículas finas, com geometria predominantemente esférica, superfície lisa, alta área de superfície específica (300–500 m<sup>2</sup>/kg) e baixa porosidade. Embora, também apresentem uma parcela de carbono poroso não queimado (Yao *et al.*, 2015).

De acordo com o ASTM C. 618 (2013), as cinzas volantes podem ser dos tipos siliciosas (Classe F), com teor de cálcio reduzido, e calcárias (Classe C), que apresentam alto teor de cálcio. Vale destacar que, ambos os tipos apresentam propriedades pozolânicas, na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio originando silicatos e aluminatos de cálcio, conferindo propriedades aglomerantes aos produtos (Giergiczny,

2019). Entretanto, as cinzas volantes calcárias também apresentam propriedades autocimentantes devido à presença do alto teor de óxido de cálcio (CaO) reativo (Yao *et al.*, 2015).

O alto teor de substituição de massa de CP por cinza volante nas misturas causa retardo no processo de hidratação do ligante e, conseqüentemente atraso no tempo de pega e redução da resistência inicial (Wilińska; Pacewska, 2018). Para o processo convencional com concreto, esses fatores limitam as possibilidades de uso prático de altos volumes de CV. Entretanto, as misturas cimentícias que contém grandes quantidades de cinzas volantes podem desenvolver suas propriedades cimentantes ao longo do tempo, geralmente associadas às estratégias de ativação de ligantes, resultando em um material de alto desempenho (Wilińska; Pacewska, 2018).

### **2.5.3.2 Sílica Ativa (SA)**

A sílica ativa consiste em um subproduto da sílica metálica e das ligas de sílica na indústria metalúrgica. O resíduo é caracterizado como um pó extremamente fino, com tamanho médio variando em menos de 0,1 a 0,3  $\mu\text{m}$ , composto por partículas redondas que tendem a se aglomerar. A área superficial específica da sílica ativa é de 20.000 a 28.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , 80 a 100 vezes maior que a do cimento e 50 a 70 vezes maior que a da cinza volante (Jiao *et al.*, 2017).

Com isso, Chen *et al.* (2022) destacam que, em materiais à base de cimento, a adição de sílica ativa pode aumentar a densidade de empacotamento e melhorar a coesão da mistura devido à sua capacidade de preencher os espaços vazios entre as partículas de cimento.

Com isso, Hermann *et al.* (2016) destacam que, em materiais à base de cimento, a adição de sílica ativa pode melhorar o empacotamento e, conseqüentemente, melhorar a coesão da mistura devido à sua capacidade de preencher os espaços vazios entre as partículas de cimento. Vale destacar que o teor de substituição de sílica muito elevado, que superem o volume de vazios entre as partículas de cimento, pode promover o afastamento destas partículas. Como isso, a adição de sílica irá aumentar o volume de vazios, diminuindo a concentração de sólidos na pasta.

Além disso, a alta finura e alta atividade química, devido ao elevado teor de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), podem aumentar a demanda de água e o atrito entre partículas resultando em diferentes efeitos nas propriedades reológicas da mistura. Outro fator é que, a alta área superficial específica da sílica ativa pode adsorver moléculas superplastificantes (Jiao *et al.*, 2017).

Jiao *et al.* (2017) expõem que muitos estudos descobriram que a adição de sílica ativa em misturas cimentícias aumenta significativamente a taxa de floculação. Com isso, aumenta tanto o limite de escoamento quanto a viscosidade plástica e reduz a fluidez do material. Embora, a depender das diferentes características físicas e da variação da fração volumétrica de sílica, bem como das diferentes proporções de água/ligante e dos diferentes tipos de superplastificantes, as características reológicas da mistura podem apresentar resultados opostos (Jiao *et al.*, 2017).

### **2.5.3.3 Escória Granulada de Alto-forno (EGAF)**

A escória granulada de alto-forno é um subproduto obtido na fabricação de ferro-gusa no alto-forno. Por possuir atividade hidráulica, a EGAF, quando finamente moída e combinada com cimento Portland, apresenta propriedades cimentícia. A área superficial da escória é comercializada variando entre 350–550  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Vale destacar que a finura influencia a reatividade da EGAF no material cimentício, bem como no desenvolvimento inicial da resistência para estado endurecido do material e na necessidade de água (Pal; Mukherjee; Pathak, 2003).

Pal, Mukherjee e Pathak (2003) ressaltam que a hidratação inicial da escória é muito mais lenta do que o cimento quando misturado com água. Os autores complementam que a hidratação da EGAF na presença de CP depende da quebra e dissolução da estrutura vítrea da escória pelos íons hidroxila liberados durante a hidratação, bem como do conteúdo alcalino no cimento. Logo, a hidratação da escória consome hidróxido de cálcio e o utiliza para formação adicional de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

Somado a isso, Giergiczny (2019) mostram que, devido ao efeito de micro preenchimento, a trabalhabilidade pode ser melhorada aumentando a substituição de CP por escória. Jiao *et al.* (2017) discutiram, a partir de estudos da literatura, os efeitos da escória granulada de alto-forno nas propriedades reológicas de materiais à base de

cimento da literatura. Com isso, a maioria dos estudos revela que a adição de EGAF diminui a viscosidade plástica e a tensão de escoamento, entretanto para as misturas com baixo teor de cimento pode ocorrer o aumento da viscosidade e redução da tensão de escoamento. Além disso, Jiao *et al.* (2017) destacam que as demandas de água e superplastificantes aumentam devido à alta área superficial específica e reatividade química da EGAF.

#### 2.5.4 Aditivos Químicos

Nas misturas cimentícias para a tecnologia 3DCP, é fundamental o controle da reologia por meio do uso de aditivos adequados, muitas vezes em combinação, para garantir a estabilidade do processo. De acordo com seus efeitos e compatibilidade, os aditivos podem ser uma ferramenta eficaz para atender os parâmetros de controle específicos para a manufatura aditiva com materiais cimentícios (Marchon *et al.*, 2018).

Gelardi *et al.* (2016) destacam que os aditivos químicos têm a capacidade modificar as propriedades do concreto fresco ou endurecido ou, em alguns casos, ambos. Com isso, podem ser incorporadores essenciais para a formulação de materiais cimentícios com baixo impacto ambiental. O autor ressalta que, além de seu efeito principal, muitos aditivos têm efeitos secundários. Logo, faz-se necessário compreender os efeitos dos tipos e das dosagens de aditivos químicos associado ao material requerido. Somado a isso, Marchon *et al.* (2018) complementam que a maioria dos aditivos alteram as propriedades reológicas das misturas à base de cimento por meio de efeitos físicos. No entanto, podem induzir fortes efeitos colaterais físico-químicos.

Para o processo 3DCP, Wangler *et al.* (2022) enfatiza que o uso de aditivos químicos altamente flocculantes, que induzam ou potencializem a formação de produtos de hidratação, são fortemente recomendados. Com isso, Marchon *et al.* (2018) apresenta os superplastificantes, os agentes modificadores de viscosidade, os aceleradores e retardadores de pega como os principais aditivos incorporados aos materiais cimentícios para a manufatura aditiva por extrusão.

- Superplastificantes (SP): também conhecidos como aditivos redutores de água de alto alcance, são dispersantes poliméricos que reduzem a tensão de escoamento e a viscosidade com teor de sólidos constante. Em materiais

cimentícios são comumente usados para alcançar alta fluidez com baixa relação água/cimento (Gelardi *et al.*, 2016). Logo, os SP aprimoram a trabalhabilidade da mistura implicando em efeitos que favorecem à moldagem e extrusão do material. Além disso, esses aditivos permitem uma diminuição do teor de líquido em uma tensão de escoamento constante, o que pode diminuir a porosidade do material endurecido, melhorando seu desempenho mecânico e sua durabilidade (Marchon *et al.*, 2018);

- Agentes modificadores de viscosidades (AMV): também conhecidos como aditivos retentores de água, são geralmente moléculas orgânicas de cadeia longa que aumentam a viscosidade da suspensão por pontes e ligações entre as partículas. Esses aditivos são amplamente usados para aumentar a estabilidade, coesão e robustez das misturas cimentícias altamente fluidas, no estado fresco, evitando a segregação e a exsudação do material (Gelardi *et al.*, 2016). Além disso, os AMV podem aumentar a tensão de escoamento de materiais cimentícios e reduzir efetivamente a deformação do material sob seu próprio peso (Marchon *et al.*, 2018);
- Aceleradores de pega: podem atuar nas fases de silicato, acelerando a formação de C-S-H, fase principal de ganho de resistência no processo de endurecimento das misturas cimentícias (Wangler *et al.*, 2022).
- Retardadores de pega: consistem em açúcares e outros carboidratos, sendo a sacarose uma das mais poderosas. Esses aditivos controlam o tempo aberto de um determinado lote de material cimentício, permitindo que ele permaneça trabalhável e processável por longos períodos (Wangler *et al.*, 2022).

### 3. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos apresentados no capítulo 1 foram desenvolvidas três etapas. A primeira etapa deu-se através de uma Revisão Bibliográfica da Literatura (RBL) no campo das tecnologias de manufatura aditiva com misturas cimentícias.

A segunda etapa consistiu em uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), ao longo dos últimos dez anos, visando a identificação e caracterização dos materiais utilizados nas misturas cimentícias formuladas para estas tecnologias.

Por fim, como complemento para a RSL, a terceira etapa compreendeu um mapeamento dos estudos que compõem os anais das três edições da Conferência Internacional RILEM em Concreto e Fabricação Digital - *Digital Concrete*.

#### 3.1 Revisão Bibliográfica da Literatura (RBL)

Para construção do capítulo 2 desta pesquisa, foi realizada uma Revisão Bibliográfica visando compreender, analisar e descrever acerca dos processos de manufatura aditiva aplicados ao setor da construção civil, mais especificamente ligados às misturas cimentícias. As investigações tiveram como foco principal a busca, na literatura, por parâmetros de dosagem e desempenho requerido nas misturas, assim como as características de seus componentes.

As pesquisas foram realizadas através da biblioteca virtual *Google Scholar* (Google Acadêmico) a partir das palavras-chaves: *digital concrete*, *cementitious materials printing* e *3D Concrete Printing* (3DCP). Em seguida, foram selecionados os trabalhos mais citados e mais recentes visando abranger diferentes abordagens metodológicas.

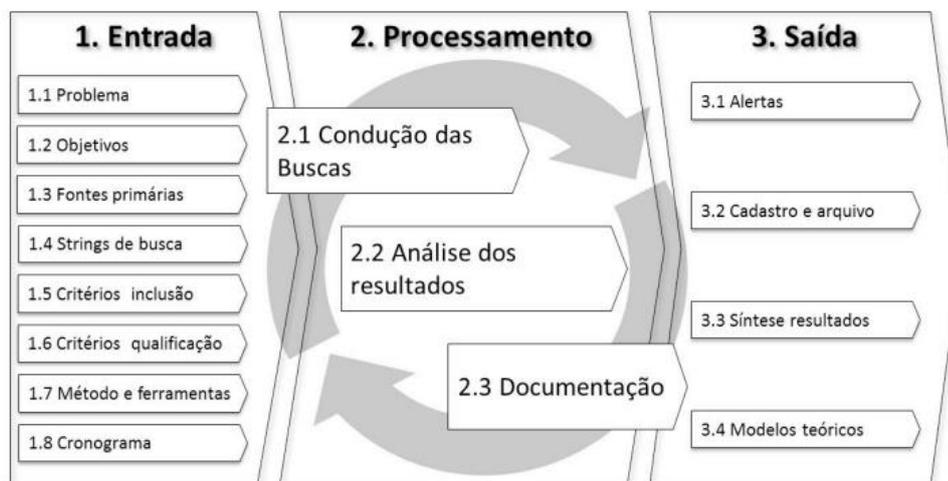
#### 3.2 Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Para Levy e Ellis (2006), a RSL tem o propósito de criar um estado da arte sobre um tópico ou assunto específico através de etapas sequenciais de coleta, conhecimento, compreensão, análise, síntese e avaliação de um conjunto de artigos científicos. Além disso, o processo deve demonstrar que a concepção da pesquisa contribui com algo novo para o corpo geral de conhecimento.

Com isso, os autores definem três fases principais para o processo da RSL: entrada, processamento e saída. Na fase “entrada” estão as informações preliminares e a definição do protocolo de condução da pesquisa. A fase de “processamento” é formada por ciclos que seguem uma sequência de ações em seis etapas: conhecer a literatura; compreender a literatura; aplicar a revisão; analisar os resultados; compilar resultados (síntese); e avaliar resultados, que serão o produto da revisão (saída).

Assim, com base nas definições apresentadas, o método de Revisão Sistemática adotado nesta pesquisa foi o RBS *Roadmap* proposto por Conforto, Amaral e Silva (2011), que está organizado em 15 etapas distribuídas em 3 fases (Entrada, Processamento e Saída), Figura 14. Contou-se com o auxílio da ferramenta StArt (*State of the Art by Systematic Review*), desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos (LaPES – UFSCar), para a fase de processamento.

**Figura 14** – Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática – RBS *Roadmap*



**Fonte:** Conforto, Amaral e Silva (2011)

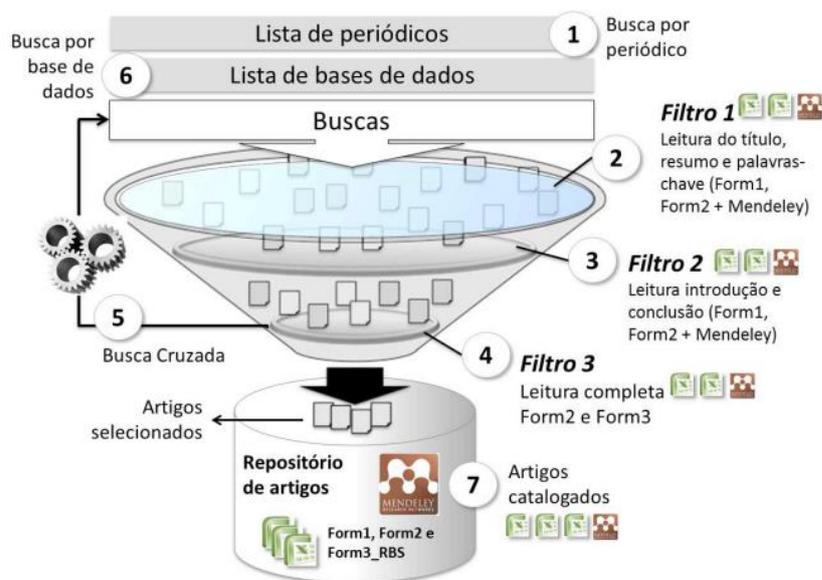
Conforto, Amaral e Silva (2011) denominam a primeira fase do RBS *Roadmap* como “Fase de Entrada”, que está subdividida em oito etapas, sendo estas:

- Etapa 1: Problema – etapa de definição do problema de pesquisa, em forma de pergunta, de maneira clara, precisa, empírica, passível de solução e delimitado a uma dimensão viável;

- Etapa 2: Objetivos – definição dos objetivos da Revisão Sistemática alinhados aos objetivos do projeto de pesquisa. Devem ter clareza e serem factíveis.
- Etapa 3: Fontes primárias – pesquisa preliminar, sem rigor de uma revisão sistemática de artigos, periódicos ou bases de dados que serão úteis para a definição de palavras-chave, e identificação dos principais autores e artigos relevantes;
- Etapa 4: *Strings* de buscas – criação de *strings* compostas por palavras e/ou termos referentes ao tema de pesquisa;
- Etapa 5: Critérios de inclusão – definição de quais critérios serão necessários para que os estudos sejam incluídos na RSL, de acordo com os objetivos da pesquisa;
- Etapa 6: Critérios de qualificação – definição dos critérios de qualificação dos estudos, visando avaliar a relevância para a pesquisa. É necessário observar elementos dos estudos, tais como: método de pesquisa utilizado, a quantidade de citações do artigo, o fator de impacto da revista que o artigo foi publicado, dentre outros;
- Etapa 7: Método e ferramentas - definição das etapas para a condução das buscas. O método deve ser iterativo, ou seja, deve contemplar ciclos e refinar a investigação, a partir de referências citadas nos artigos encontrados;
- Etapa 8: Cronograma – definição do cronograma para realização de todos os processos para construção da RSL.

A segunda fase é a “Fase de Processamento”, subdividida em três etapas iterativas: Condução das buscas, Análise dos dados e Documentação. Na primeira etapa são realizadas as buscas, através de periódicos, buscas cruzadas e base de dados; na segunda etapa são realizadas as leituras e análise dos resultados aplicando os filtros de leitura; e, finalmente, na terceira etapa as informações relacionadas à quantidade de estudos encontrados por periódico, quantidade de artigos excluídos, entre outros, são documentadas para servirem de argumentação e embasamento teórico na síntese final, Figura 15 (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

**Figura 15** – Procedimento iterativo da fase de processamento – RBS *Roadmap*



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011)

Por fim, a terceira fase chamada de “Fase de Saída” é a fase final do roteiro que consiste em quatro etapas, sendo estas:

- Etapa 1: Alertas - consiste na inserção de “alertas”, nos periódicos utilizados para a condução da Revisão Sistemática, para rastreamento de possíveis novos estudos ao longo do projeto;
- Etapa 2: Cadastro e arquivo – inclusão dos artigos que serão analisados e interpretados no repositório de artigos da pesquisa;
- Etapa 3: Síntese e resultados - elaboração de um relatório que será uma síntese da bibliografia estudada;
- Etapa 4: Modelos teóricos - construção do resultado da RSL, a partir de modelos teóricos e definição de hipóteses, baseado na síntese do projeto desenvolvido.

### 3.2.1. Fase de Entrada da RSL

Como ponto de partida para construção do protocolo da RSL foi definido o seguinte problema de pesquisa alinhado aos objetivos do presente trabalho: “Quais as formulações produzidas e discutidas na literatura com potencial de tornar a manufatura aditiva com materiais cimentícios viável para a construção civil?”

Com os objetivos bem definidos, foram selecionadas as bases de dados bibliográficas eletrônicas *Scopus* e *Web of Science* considerando seus impactos e abrangências no meio científico e na área da Engenharia. Além disso, foram adotadas a busca por pesquisas no idioma inglês por ser o idioma utilizado nas bases e nos eventos de maior relevância científica.

Em seguida, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão com o intuito de certificar que os trabalhos selecionados auxiliassem na solução do problema de pesquisa. No Quadro 1 estão expostos os critérios estabelecidos.

**Quadro 1** – Critérios de inclusão e exclusão adotados para a RSL

<b>Critérios de Inclusão (I)</b>	<b>Critérios de Exclusão (E)</b>
Pesquisas que abordam o campo experimental com os procedimentos e as formulações utilizadas baseados nos parâmetros de controle para impressão de misturas cimentícias e que discutam os resultados obtidos	Pesquisas que não abordam o campo experimental
Artigos dos últimos 10 anos (2012 - 2023)	Artigos que não sejam da área de Engenharia Civil e/ou Ciência dos Materiais
Artigos primários e artigos de revisão	Artigos que não apresentem características das misturas cimentícias no estado fresco
Artigos em inglês	Artigos que não envolvam o método de extrusão
Artigos de livre acesso	Artigos que não envolva materiais cimentícios

**Fonte:** Autor (2023)

O próximo passo foi a construção da *string* de busca. Para aumento da sensibilidade das buscas foram utilizados os operadores booleanos “AND” e “OR” que possibilitam a abrangência de termos alternativos e sinônimos, respectivamente.

É importante destacar que a Revisão Bibliográfica realizada para construção da fundamentação teórica, abordada nos capítulos iniciais desta pesquisa, serviu como estudo preliminar para a escolha dos termos utilizados na *string* de busca para RSL.

Dessa forma, o Quadro 2 apresenta as caracterizações finais das *strings* utilizadas nos bancos da *Scopus* e da *Web of Science*, assim como as quantidades de estudos encontrados em cada uma das bases.

**Quadro 2** – Descritores e critérios definidos para as *strings* nas bases *Scopus* e *Web of Science*

<b>BASE DE DADOS SCOPUS</b>				
<b>DESCRITORES E CRITÉRIOS DEFINIDOS</b>				
<b>CAMPO</b>	<b>DESCRITORES</b>	<b>OPERADORES BOOLEANOS</b>	<b>FILTROS</b>	<b>QTD.</b>
TITLE-ABS-KEY	"cement mixtures" OR "cementitious materials" OR concrete OR mortar	AND	ARTICLE / REVIEW	38
	3D OR "additive manufacturing"	AND	ENGLISH	
	rheology OR "fresh properties" OR dosage*	AND	LAST 10 YEARS (2012 - 2023)	
	extrusion		ENGINEERING / MATERIALS SCIENCE	
<b>BASE DE DADOS WEB OF SCIENCE</b>				
<b>DESCRITORES E CRITÉRIOS DEFINIDOS</b>				
<b>CAMPO</b>	<b>DESCRITORES</b>	<b>OPERADORES BOOLEANOS</b>	<b>FILTROS</b>	<b>QTD.</b>
TÓPICO	"cement mixtures" OR "cementitious materials" OR concrete OR mortar	AND	ARTICLE / REVIEW	59
	3D OR "additive manufacturing"	AND	ENGLISH	
	rheology OR "fresh properties" OR dosage*	AND	LAST 10 YEARS (2012 - 2023)	
	extrusion		CONSTRUCTION BUILDING TECHNOLOGY / MATERIALS SCIENCE MULTIDISCIPLINARY / ENGINEERING CIVIL / MATERIALS SCIENCE COMPOSITES	

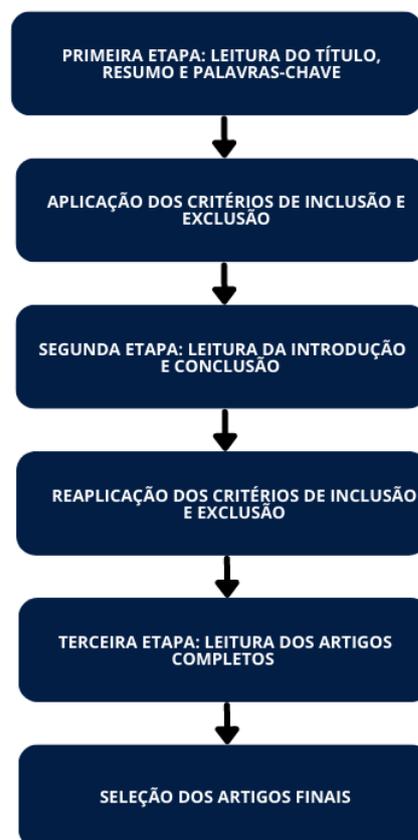
Fonte: Autor (2023)

Assim, com a “Fase de Entrada” elaborada pode-se seguir para a “Fase de Processamento” da RSL.

### 3.2.2. Fase de Processamento da RSL

Durante a “Fase de Processamento” foram realizadas as etapas de condução propostas por Conforto, Amaral e Silva (2011), dispostas no fluxograma da Figura 16.

**Figura 16** – Etapas de condução realizadas na “Fase de Processamento” da RLS



**Fonte:** Adaptada de Conforto, Amaral e Silva (2011)

Com o auxílio da ferramenta StArt foi possível conduzir a “Fase de Processamento” da RSL de forma organizada e ágil. Uma das características relevantes do *software* é a possibilidade de identificar, de forma automática, a duplicidade dos estudos selecionados nas bases escolhidas. Além disso, possibilita a visualização ordenada dos artigos selecionados ao aplicar os filtros de leitura, bem como realizar o levantamento quantitativo para elaboração da etapa de Documentação da Revisão.

Para início do processamento da RSL, na ferramenta, foi preenchido o protocolo da pesquisa já definido anteriormente na “Fase de Entrada” e seguiu-se para etapa de “Execução”. Nesta etapa, foram inseridas as *strings* construídas para as bases *Scopus* e *Web of Science*, além dos resultados das buscas a partir de suas respectivas exportações no formato *.RIS*. Ressalta-se que para as exportações foram selecionados todos os campos de informações das bases para melhor processamento do *software*. Nas Figuras 17 e 18 são exibidas as informações na StArt para ambas as bases de dados após a inserção destes dados.

Figura 17 – Tela de Execução da ferramenta StArt para a base Scopus

General information					
String: ("cement mixtures" OR "cementitious materials" OR concrete OR mortar) AND (3D OR "additive manufacturing") AND (rheology OR "fresh properties" OR dosage) AND (extrusion)					
Search machine:	Scopus	Number of papers:	38	Date of the search:	03/18/2023
Observations:					
<input type="checkbox"/> ID Paper <input checked="" type="checkbox"/> Title <input checked="" type="checkbox"/> Author <input checked="" type="checkbox"/> Status/Selection <input type="checkbox"/> Status/Extraction <input checked="" type="checkbox"/> Priority Reading <input checked="" type="checkbox"/> Score					
Title	Author	Year	Status/Selection	Reading Pri...	
Early-age rheology and hydration control of ternary binders f...	Das, A.; Reiter, L.; Mantellato, S.; Flatt, R.J.	2022	Accepted	Low	
Effects of rheological properties and printing speed on moldin...	Zhao, Y.; Yang, G.; Zhu, L.; Ding, Y.; Guan, X.; Wu, X.; Y...	2022	Accepted	Low	
Rheometry for Concrete 3D Printing: A Review and an Experi...	Jayathilakage, R.; Rajeev, P.; Sanjayan, J.	2022	Accepted	Very high	
Comparison between methods for indirect assessment of buil...	Ivanova, I.; Ivaniuk, E.; Bisetti, S.; Nerella, V.N.; Mechtcher...	2022	Accepted	Low	
Printable and Mechanical Performance of 3D Printed Concrete...	Wang, B.; Zhai, M.; Yao, X.; Wu, Q.; Yang, M.; Wang, X.; J...	2022	Accepted	Very high	
Numerical Predictions of Bottom Layer Stability in Material Ext...	Mollah, M.T.; Comminal, R.; Serdeczny, M.P.; Pedersen, D....	2022	Accepted	Low	
Eco-Friendly, Set-on-Demand Digital Concrete	Boscaro, F.; Quadranti, E.; Wangler, T.; Mantellato, S.; Rei...	2022	Accepted	High	
A review of printing strategies, sustainable cementitious mat...	Chen, Y.; He, S.; Gan, Y.; A+opuroAYlu, O.; Veer, F.; Schl...	2022	Accepted	Very high	
Juxtaposing fresh material characterisation methods for build...	Bos, F.P.; Kruger, P.J.; Lucas, S.S.; van Zijl, G.P.A.G.	2021	Accepted	High	
Use of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement mixes in ...	Panda, B.; Sonat, C.; Yang, E.-H.; Tan, M.J.; Unluer, C.	2021	Accepted	Low	
Assessment of asymmetrical rheological behavior of cementit...	Jacquet, Y.; Perrot, A.; Picandet, V.	2021	Accepted	Very high	
Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-rei...	Arunothayan, A.R.; Nematollahi, B.; Ranade, R.; Bong, S.H. ...	2020	Accepted	Low	
Improving printability of limestone-calcined clay-based cemen...	Chen, Y.; Chaves Figueiredo, S.; Li, Z.; Chang, Z.; Jansen, ...	2020	Accepted	High	
Effects of volume fraction and surface area of aggregates on ...	Ivanova, I.; Mechtcherine, V.	2020	Accepted	Low	
Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement pas...	Chaves Figueiredo, S.; A+opuroAYlu, O.; Schlangen, E.	2019	Accepted	High	
The effect of material fresh properties and process paramete...	Panda, B.; Mohamed, N.A.N.; Paul, S.C.; Singh, G.V.P.B.; T...	2019	Accepted	High	
The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudabilit...	Chen, Y.; Figueiredo, S.C.; YalAginkaya, A.; A+opuroAYlu, ...	2019	Accepted	Low	
3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research	Buswell, R.A.; Leal de Silva, W.R.; Jones, S.Z.; Dirrenberg...	2018	Accepted	High	
Mix design and fresh properties for high-performance printin...	Le, T.T.; Austin, S.A.; Lim, S.; Buswell, R.A.; Gibb, A.G.F. ;...	2012	Accepted	Very high	
Development of Cementitious Mortars for Aerial Additive Man...	Dams, B.; Chen, B.; Shepherd, P.; Ball, R.J.	2023	Rejected	Low	
Magneto-rheology control in 3D concrete printing: A rheologic...	Jiao, D.; Shi, C.; De Schutter, G.	2022	Rejected	Low	
Filament geometry control in extrusion-based additive manuf...	Wolfs, R.J.M.; Salet, T.A.M.; Roussel, N.	2021	Rejected	Low	
Examining layer height effects on the flexural and fracture re...	Nair, S.A.O.; Tripati, A.; Neithalath, N.	2021	Rejected	Low	
Rheological characterization of 3D printable geopolymers	Ranjbar, N.; Mehrali, M.; Kuenzel, C.; Gundlach, C.; Peders...	2021	Rejected	Low	
Numerical simulation of multi-layer 3D concrete printing	Spangenberg, J.; da Silva, W.R.L.; Comminal, R.; Mollah, M...	2021	Rejected	Low	
Technological equipment management for 3d additive printin...	Ivanova, O.V.; Khalikov, R.M.; Salov, A.S.; Nizamutdinov, M...	2021	Rejected	Low	
Fused filament fabrication printer modified to dispense cemen...	Jones, S.Z.	2021	Rejected	Low	
Clay in situ resource utilization with Mars global simulant slur...	Karl, D.; Duminy, T.; Lima, P.; Kamutzki, F.; Gili, A.; Zocca...	2020	Rejected	Low	
Numerical simulations of concrete processing: From standard...	Roussel, N.; Spangenberg, J.; Wallevik, J.; Wolfs, R.	2020	Rejected	Low	
Effective extrusion-based 3D printing system design for ceme...	Albar, A.; Chougan, M.; Al-Kheetan, M.J.; Swash, M.R.; G...	2020	Rejected	Low	
Nailing of layers: A promising way to reinforce concrete 3D pri...	Perrot, A.; Jacquet, Y.; Rangeard, D.; Courteille, E.; Sonebi...	2020	Rejected	Low	
Synthesis and characterization of one-part geopolymers for e...	Panda, B.; Singh, G.B.; Unluer, C.; Tan, M.J.	2019	Rejected	Low	
Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete	Tay, Y.W.D.; Ting, G.H.A.; Qian, Y.; Panda, B.; He, L.; Tan...	2019	Rejected	Low	
Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopoly...	Nematollahi, B.; Vijay, P.; Sanjayan, J.; Nazari, A.; Xia, M. ...	2018	Rejected	Low	
Extrusion of cementitious-based materials 3D printing: An overview	Perrot, A.; Rangeard, D.; Nerella, V.H.; Mechtcherine, V.	2018	Rejected	Low	
Digital concrete: Opportunities and challenges	Wangler, T.; Lloret, E.; Reiter, L.; Hack, N.; Gromazio, F.; ...	2016	Rejected	Low	
3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix de...	Rehman, A.U.; Kim, J.-H.	2021	Duplicated	Low	

Fonte: Software StArt (2023)

Figura 18 – Tela de Execução da ferramenta StArt para a base Web of Science

General information					
String: ("cement mixtures" OR "cementitious materials" OR concrete OR mortar) AND (3D OR "additive manufacturing") AND (rheology OR "fresh properties" OR dosage) AND (extrusion)					
Search machine:	Web of Science	Number of papers:	59	Date of the search:	03/18/2023
Observations:					
<input type="checkbox"/> ID Paper <input checked="" type="checkbox"/> Title <input checked="" type="checkbox"/> Author <input checked="" type="checkbox"/> Status/Selection <input type="checkbox"/> Status/Extraction <input checked="" type="checkbox"/> Priority Reading <input checked="" type="checkbox"/> Score					
Title	Author	Year	Status/Selection	Reading Pri...	
Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3...	Shakor, P.; Nejadi, S.; Paul, G.; Malek, S	2019	Accepted	High	
Additive Manufacturing of Sustainable Construction Materials ...	Liu, J.L.; Nguyen-Van, V.; Panda, B.; Fox, K.; du Plessis, A.; Tr...	2022	Accepted	Very high	
Fresh and Rheological Performances of Air-Entrained 3D Print...	Tarhan, Y.; Sahin, R	2021	Accepted	Low	
Effects of Early-Age Rheology and printing time interval on Lat...	Wu, YC; Li, M	2022	Accepted	High	
The effects of nanosilica on the fresh and hardened properti...	Sikora, P.; Chung, S.Y.; Liard, M.; Lootens, D.; Dorn, T.; Kam...	2021	Accepted	High	
Insights into material design, extrusion rheology, and properti...	Alghamdi, H.; Nair, S.A.O.; Neithalath, N.	2019	Accepted	High	
Factors Influencing the Properties of Extrusion-Based 3D-Print...	Yuan, Q.; Gao, C.; Huang, T.J.; Zuo, SH; Yao, H; Zhang, K; ...	2022	Accepted	Very high	
Effect of polyacrylamide on the workability and interlayer inte...	Yuan, Q.; Xie, ZL; Yao, H.; Huang, T.J.; Li, ZM; Zheng, XG	2022	Accepted	High	
An approach to develop printable strain hardening cementitio...	Figueiredo, S.C.; Rodriguez, CR; Ahmed, ZY; Bos, DH; Xu, Y...	2019	Accepted	High	
3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix ...	Rehman, AU; Kim, JH	2021	Accepted	High	
Effects of layer-interface properties on mechanical performan...	Nerella, VN; Hempel, S; Mechtcherine, V	2019	Accepted	Low	
The Effect of Accelerator Dosage on Fresh Concrete Properti...	Dressler, I.; Freund, N.; Lowke, D	2020	Accepted	High	
Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious...	Chen, Y.; Li, ZM; Figueiredo, S.C.; Copuroglu, O.; Veer, F.; S...	2019	Accepted	High	
D-optimal design of experiments applied to 3D high-performa...	Sergis, V.; Ouellet-Plamondon, CM	2022	Accepted	Low	
Rheological behaviors and structure build-up of 3D printed po...	Chen, MX; Yang, L.; Zheng, Y.; Li, LB; Wang, SD; Huang, YB...	2021	Accepted	Low	
Effect of Tartaric Acid on the Printable, Rheological and Mech...	Chen, MX; Guo, XY; Zheng, Y.; Li, LB; Yan, Z; Zhao, PQ; L...	2018	Accepted	High	
Experimental Approach for Printability Assessment: Toward a...	Lefhaj, Z.; Rabenantoandro, AZ; el Moussaoui, S.; Dakhi, Z; ...	2019	Rejected	Low	
Extrusion and rheology characterization of geopolymer nano...	Panda, B.; Unluer, C.; Tan, MJ	2019	Rejected	Low	
Extrusion-based additive manufacturing with cement-based ...	Mechtcherine, V.; Bos, FP; Perrot, A.; da Silva, WRL; Nerella...	2020	Rejected	Low	
3D printing geopolymers: A review	Zhong, H; Zhang, MZ	2022	Rejected	Low	
Investigation of the properties of alkali-activated slag mixes l...	Panda, B.; Ruan, SQ; Unluer, C.; Tan, MJ	2020	Rejected	Low	
A chemical process engineering look at digital concrete proce...	Wangler, T.; Pileggi, R.; Gurel, S.; Flatt, RJ	2022	Rejected	Low	
3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing br...	Pasupathy, K.; Ramakrishnan, S.; Sanjayan, J	2023	Rejected	Low	
3D printing of earth-based materials: Processing aspects	Perrot, A.; Rangeard, D.; Courteille, E	2018	Rejected	Low	
Shaping of geopolymer composites by 3D printing	Archez, J.; Tezier-Mandoki, N.; Bourbon, X.; Caron, JF; Rossi...	2021	Rejected	Low	
Artificial reefs built by 3D printing: Systematisation in the desi...	Yoris-Nobile, AJ.; Slobi-Acevedo, CJ; Lizasoain-Arteaga, E.; In...	2023	Rejected	Low	
Synthesis and characterization of 3D-printable geopolymeric f...	Alghamdi, H.; Neithalath, N	2019	Rejected	Low	
A process classification framework for defining and describin...	Buswell, RA; da Silva, WRL; Bos, FP; Schipper, HR; Lowke, ...	2020	Rejected	Low	
On sustainability and digital fabrication with concrete	Flatt, RJ; Wangler, T	2022	Rejected	Low	
3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties	Jackson, RJ; Wojcik, A.; Miodownik, M	2018	Rejected	Low	
Setting on demand for digital concrete - Principles, measure...	Reiter, L.; Wangler, T.; Anton, A.; Flatt, RJ	2020	Rejected	Low	
Method of Optimisation for Ambient Temperature Cured Sust...	Bong, SH; Nematollahi, B.; Nazari, A.; Xia, M.; Sanjayan, J	2019	Rejected	Low	
Effect of natural and calcined halloysite clay minerals as low...	Chougan, M.; Ghaffar, SH; Nematollahi, B.; Sikora, P.; Dorn, ...	2022	Rejected	Low	
Development of Cementitious Mortars for Aerial Additive Man...	Dams, B.; Chen, BL; Shepherd, P.; Ball, RJ	2023	Duplicated	Low	
Filament geometry control in extrusion-based additive manuf...	Wolfs, RJM; Salet, TAM; Roussel, N	2021	Duplicated	Low	
A review of printing strategies, sustainable cementitious mat...	Chen, Y.; He, S.; Gan, YD.; Copuroglu, O.; Veer, F.; Schlange...	2022	Duplicated	Low	
Comparison between methods for indirect assessment of buil...	Ivanova, I.; Ivaniuk, E.; Bisetti, S.; Nerella, VN; Mechtcherine, V	2022	Duplicated	Low	

Fonte: Software StArt (2023)

Com os 97 artigos pré-selecionados exportados na ferramenta foi identificada a existência de 28 artigos duplicados. Em seguida, foi iniciada a primeira etapa do processo: leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos 69 artigos restantes. Em paralelo às leituras, foram feitas a classificação, de aceitação ou rejeição dos artigos, de acordo com os critérios de inclusão e exclusão determinados na “Fase de Entrada”. Com isso, foram aceitos 35 artigos que seguiram para a segunda etapa da “Fase de Processamento” da RLS. Destaca-se que a maior parte dos artigos que foram rejeitados nesta etapa não envolvia materiais cimentícios, e os demais não abordavam o campo experimental. A Tabela 1 apresenta o resumo quantitativo das etapas descritas.

**Tabela 1** – Resumo quantitativo das primeiras etapas da “Fase de Processamento” da RSL

BASE DE DADOS	ARTIGOS PRÉ - SELECIONADOS	ARTIGOS PRÉ - SELECIONADOS	ARTIGOS DUPLI.	TOTAL DE ART.	PRIMEIRA ETAPA ACEIT.	REJEIT.
Scopus	38					
Web of Science	59	97	28	69	35	34

Fonte: Autor (2023)

Na segunda etapa do processo: leitura da introdução e conclusão dos 35 artigos aceitos na primeira etapa; foram reaplicados os mesmos critérios de inclusão e exclusão. A partir disso, 12 artigos seguiram para a fase de leitura completa, no *software* StArt esses artigos foram elencados com prioridade “muito alta”, Figura 19.

**Figura 19** – Tela da extração final da segunda etapa do processo na ferramenta StArt

All Papers (Extraction)						
ID Paper	Title	Author	Status/Selection	Status/Extraction	Reading Priority	Score
455	Early-age rheology and hydration control of ternary binders for ...	Das, A.; Reiter, L.; Mantellato, S.; Flatt, R.J.	Accepted	Accepted	Very high	33
459	Printable and Mechanical Performance of 3D Printed Concrete E...	Wang, B.; Zhai, M.; Yao, X.; Wu, Q.; Yang, ...	Accepted	Accepted	Very high	42
462	Eco-Friendly, Set-on-Demand Digital Concrete	Boscaro, F.; Quadranti, E.; Wangler, T.; Man...	Accepted	Accepted	Very high	37
463	A review of printing strategies: sustainable cementitious materi...	Chen, Y.; He, S.; Gan, Y.; ÁtopuroÁyü, Q.; ...	Accepted	Accepted	Very high	79
470	Use of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement mixes in 3D...	Panda, B.; Sonal, C.; Yang, E-H.; Tan, M.J. ...	Accepted	Accepted	Very high	28
478	Improving printability of limestone-calcined clay-based cementiti...	Chen, Y.; Chaves Figueiredo, S.; Li, Z.; Chan...	Accepted	Accepted	Very high	44
481	Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste ...	Chaves Figueiredo, S.; ÁtopuroÁyü, O.; Schl...	Accepted	Accepted	Very high	30
486	The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability ...	Chen, Y.; Figueiredo, S.C.; YalÁsinkaya, ÁF.; ...	Accepted	Accepted	Very high	65
496	Additive Manufacturing of Sustainable Construction Materials an...	Liu, J.; Nguyen-Van, V.; Panda, B.; Fox, K.; du...	Accepted	Accepted	Very high	51
508	The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties ...	Sikora, P.; Chung, S.Y.; Liard, M.; Lootens, D.; ...	Accepted	Accepted	Very high	33
511	Insights into material design, extrusion rheology, and properties...	Alghamdi, H.; Nair, S.A.O.; Neithalath, N	Accepted	Accepted	Very high	46
528	Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious M...	Chen, Y.; Li, Z.M.; Figueiredo, S.C.; Copuroglu, ...	Accepted	Accepted	Very high	34
456	Effects of rheological properties and printing speed on molding ...	Zhao, Y.; Yang, G.; Zhu, L.; Ding, Y.; Guan, ...	Accepted	Rejected	Low	57
457	Rheometry for Concrete 3D Printing: A Review and an Experimen...	Jayathilake, B.; Rajeev, P.; Sanjayan, J	Accepted	Rejected	Low	63
458	Comparison between methods for indirect assessment of builda...	Ivanova, I.; Ivanuk, E.; Bisetti, S.; Nerella, V. ...	Accepted	Rejected	Low	60
460	Numerical Predictions of Bottom Layer Stability in Material Extr...	Mollah, M.T.; Comminal, R.; Serdeczny, M.P. ...	Accepted	Rejected	Low	44
468	Juxtaposing fresh material characterisation methods for buildabi...	Bos, F.P.; Kruger, P.J.; Lucas, S.S.; van Zijl, ...	Accepted	Rejected	Low	46
471	Assessment of asymmetrical rheological behavior of cementitious...	Jacquet, Y.; Perrot, A.; Picandet, V.	Accepted	Rejected	Low	40
474	Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinfo...	Arunothayan, A.R.; Nematollahi, B.; Ranade, ...	Accepted	Rejected	Low	43
480	Effects of volume fraction and surface area of aggregates on th...	Ivanova, I.; Mechtcherine, V.	Accepted	Rejected	Low	41
482	The effect of material fresh properties and process parameters ...	Panda, B.; Mohamed, N.A.N.; Paul, S.C.; Sin...	Accepted	Rejected	Low	45
488	3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research	Buswell, R.A.; Leal de Silva, W.R.; Jones, S.Z. ...	Accepted	Rejected	Low	48
491	Mix design and fresh properties for high-performance printing c...	Le, T.T.; Austin, S.A.; Lim, S.; Buswell, R.A. ...	Accepted	Rejected	Low	49
492	Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3D ...	Shakor, P.; Hejazi, S.; Paul, G.; Malek, S	Accepted	Rejected	Low	51
504	Fresh and Rheological Performances of Air-Entrained 3D Printab...	Tarhan, Y.; Sahin, R	Accepted	Rejected	Low	41
505	Effects of Early-Age rheology and printing time interval on Late...	Wu, Y.C.; Li, M	Accepted	Rejected	Low	79
512	Factors Influencing the Properties of Extrusion-Based 3D-Printed...	Yuan, Q.; Gao, C.; Huang, T.J.; Zuo, S.H.; Yao, ...	Accepted	Rejected	Low	38
518	Effect of polyacrylamide on the workability and interlayer interfa...	Yuan, Q.; Xie, Z.L.; Yao, H.; Huang, T.J.; Li, ZM ...	Accepted	Rejected	Low	35
518	An approach to develop printable strain hardening cementitious ...	Figueiredo, S.C.; Rodriguez, C.R.; Ahmed, ZY.; ...	Accepted	Rejected	Low	30
520	3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix De...	Rehman, A.U.; Kim, J.H	Accepted	Rejected	Low	65
521	Effects of layer-interface properties on mechanical performance...	Nerella, V.N.; Hempel, S.; Mechtcherine, V	Accepted	Rejected	Low	39
524	The Effect of Accelerator Dosage on Fresh Concrete Properties ...	Dressler, I.; Freund, N.; Lowke, D	Accepted	Rejected	Low	48
536	D-optimal design of experiments applied to 3D high-performanc...	Sergits, V.; Quellet-Plamondon, CM	Accepted	Rejected	Low	36
548	Rheological behaviors and structure build-up of 3D printed poly...	Chen, M.X.; Yang, L.; Zheng, Y.; Li, L.B.; Wang, ...	Accepted	Rejected	Low	23
549	Effect of Tartaric Acid on the Printable, Rheological and Mechani...	Chen, M.X.; Guo, X.Y.; Zheng, Y.; Li, L.B.; Yan, Z. ...	Accepted	Rejected	Low	26

Fonte: *Software* StArt (2023)

### **3.3 Mapeamento dos anais da Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital - *Digital Concrete***

Em 2018, na cidade de Zurique na Suíça, ocorreu a Primeira Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital, também conhecido como Concreto Digital (*Digital Concrete* 2018). A conferência surgiu como produto dos trabalhos do RILEM Comitê Técnico de Fabricação Digital com Materiais à Base de Cimento, em 2016, devido ao crescente interesse nas técnicas de fabricação digital e sua aplicação para materiais à base de cimento, como concreto (Wangler; Flatt, 2018).

A conferência, que já está em sua terceira edição, ocorre de forma bienal e reúne especialistas globais de diversas áreas, como: Engenharia Civil, Arquitetura, Design, Ciência da Computação, entre outros. Os estudos apresentados no evento, em formato de pesquisas e projetos, exploram o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes em termos de custo e sustentabilidade, a partir das possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais, em materiais cimentícios.

Com isso, para a terceira etapa desta pesquisa foi realizado um mapeamento quantitativo dos estudos que compõem os anais das três edições do *Digital Concrete*: 2018, 2020 e 2022.

Na Primeira Conferência, em 2018, foram publicados 30 trabalhos divididos em três grandes áreas: Materiais e Processamento (10 artigos); Mecânica e Estrutura (14 artigos); e Aplicações e Outros Tópicos (6 artigos). A primeira grande área contemplou o campo das propriedades dos materiais no estado fresco atentando para controle e evolução (reologia). Em consonância, a segunda grande área abarcou as propriedades endurecidas e desempenho estrutural (engenharia estrutural e durabilidade) dos materiais cimentícios para impressão. Por fim, a terceira visou abranger estudos de viabilidade e desafios voltados às tecnologias digitais à base de cimento (Wangler; Flatt, 2018).

Na segunda edição da Conferência, em 2020, os anais contam com 111 artigos divididos em 7 grandes áreas: Projeto de Mistura, Aditivos e Aglutinante Alternativo (17 artigos); Reologia e Comportamento no Estado Fresco (22 artigos); Desempenho Mecânico (19 artigos); Engenharia Estrutural e Reforço (15 artigos); Design digital, tecnologias e industrialização (25 artigos); Sustentabilidade, Avaliação do Ciclo de Vida

(ACV) e Análises Econômicas (3 artigos); e Aplicações e Estudos de Caso (10 artigos). Além do aumento do número de estudos publicados nos mesmos temas, em relação ao ano de 2018, houve novas colaborações associadas ao campo da fabricação digital à base de cimento, o que implicou na ramificação das grandes áreas. Os novos estudos abrangeram sobre as aplicações e os impactos dessas tecnologias, bem como a ACV e análises econômicas. Além disso, vale destacar que o *Digital Concrete 2020* ocorreu em formato remoto devido à pandemia do novo Coronavírus (COVID-19) (Bos *et al.*, 2020).

Mais recentemente, a terceira edição do *Digital Concrete*, em 2022, que ocorreu na Universidade de Loughborough, no Reino Unido, teve 68 artigos completos publicados divididos em 14 sessões: Processos Alternativos (4 artigos); Projeto Estrutural e Otimização (4 artigos); Aglutinantes e Agregados 1: Agregados (4 artigos); Aglutinantes e Agregados 2: Aglutinantes Alternativos (5 artigos); Aglutinantes e Agregados 3: Materiais de Encruamento (5 artigos); Design e Fluxo de Trabalho Digital (3 artigos); Durabilidade (5 artigos); Heterogeneidades e Defeitos (6 artigos); Jateamento de Materiais (4 artigos); Ligação de Leito de Partículas (4 artigos); Capacidade de Impressão e Controle de Configuração (7 artigos); Controle de Processo, Percurso e Inspeção (4 artigos); Reforço (9 artigos); e Controle de Propriedade de Material Úmido (4 artigos) (Buswell *et al.*, 2022).

Diferente das outras duas edições do evento, houve uma ramificação maior das sessões, onde cada uma foi composta por uma quantidade menor de trabalhos. Os estudos das sessões abordam controle de qualidade e testes sobre as propriedades úmidas do material cimentício em tecnologias de extrusão. Além disso, destaca-se a inserção dos estudos sobre agregados, materiais de encruamento e aglutinantes alternativos visando discutir a sustentabilidade associada às tecnologias à base de cimento. Outro destaque são os tópicos relacionados às propriedades do material em estado endurecido como: reforço, design estrutural/otimização, durabilidade, heterogeneidades e defeitos, que abrangem os estudos voltados a tornar os materiais produzidos competentes, ao longo da sua vida útil. Por fim, outras abordagens de fabricação digital são exploradas, aspectos digitais do projeto e controle de processo e inovações em design, fluxo de trabalho digital e controle de processo (Buswell *et al.*, 2022).

Assim, a partir do panorama geral dos trabalhos, os artigos publicados nos anais do *Digital Concrete 2022* foram selecionados para uma análise quantitativa/qualitativa mais aprofundada. É importante ressaltar que a escolha se deu devido ao evento ser o mais recente. Com isso, foi possível obter resultados e realizar discussões acerca das tendências e dos avanços das tecnologias digitais aplicadas aos materiais cimentícios.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo foi construído a partir dos resultados obtidos através da metodologia, descrita no capítulo anterior, aplicada nesta pesquisa. Os tópicos são compostos pela análise e discussão dos artigos selecionados na etapa de Revisão Sistemática, bem como dos artigos publicados nos anais do *Digital Concrete 2022*.

### 4.1 Quantificação da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e dos anais da Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital - *Digital Concrete*

#### 4.1.1. Revisão Sistemática de Literatura (RSL)

O Quadro 3 apresenta os 12 artigos que seguiram para leitura na íntegra a partir das etapas seguidas na Revisão Sistemática. Os artigos contribuíram para a construção dos tópicos de análise e discussão, relacionados aos materiais constituintes das misturas cimentícias para 3DCP, deste trabalho.

**Quadro 3** – Artigos selecionados para leitura completa a partir da RSL

Nº	ANO	TÍTULO	AUTORES	BASE DE DADOS
1	2022	<i>Additive Manufacturing of Sustainable Construction Materials and Form-finding Structures: A Review on Recent Progresses</i>	Liu <i>et al.</i> (2022)	Web of Science
2	2022	<i>A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing</i>	Chen <i>et al.</i> (2022)	Scopus
3	2022	<i>Early-age rheology and hydration control of ternary binders for 3D printing applications</i>	Das <i>et al.</i> (2022)	Scopus
4	2022	<i>Eco-Friendly, Set-on-Demand Digital Concrete</i>	Boscaro <i>et al.</i> (2022)	Scopus
5	2022	<i>Printable and Mechanical Performance of 3D Printed Concrete Employing Multiple Industrial Wastes</i>	Wang <i>et al.</i> (2022)	Scopus
6	2021	<i>The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars</i>	Sikora <i>et al.</i> (2021)	Web of Science
7	2021	<i>Use of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement mixes in 3D printing applications</i>	Panda <i>et al.</i> (2021)	Scopus
8	2020	<i>Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture</i>	Chen <i>et al.</i> (2020)	Scopus

Nº	ANO	TÍTULO	AUTORES	BASE DE DADOS
9	2019	<i>The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing</i>	Chen <i>et al.</i> (2019a)	Scopus
10	2019	<i>Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure</i>	Figueiredo, Çopuroğlu e Schlangen (2019)	Scopus
11	2019	<i>Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders</i>	Alghamdi, Nair e Neithalath (2019)	Web of Science
12	2019	<i>Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development</i>	Chen <i>et al.</i> (2019b)	Web of Science

Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.2. Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital - *Digital Concrete*

Como primeiro resultado da análise dos artigos publicados nos anais do *Digital Concrete 2022* obteve-se um cenário dos países que apresentaram o desenvolvimento de seus estudos na Conferência. A Tabela 2 apresenta, em ordem de maior para menor frequência, os países representados.

**Tabela 2** – Países que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no *Digital Concrete 2022*

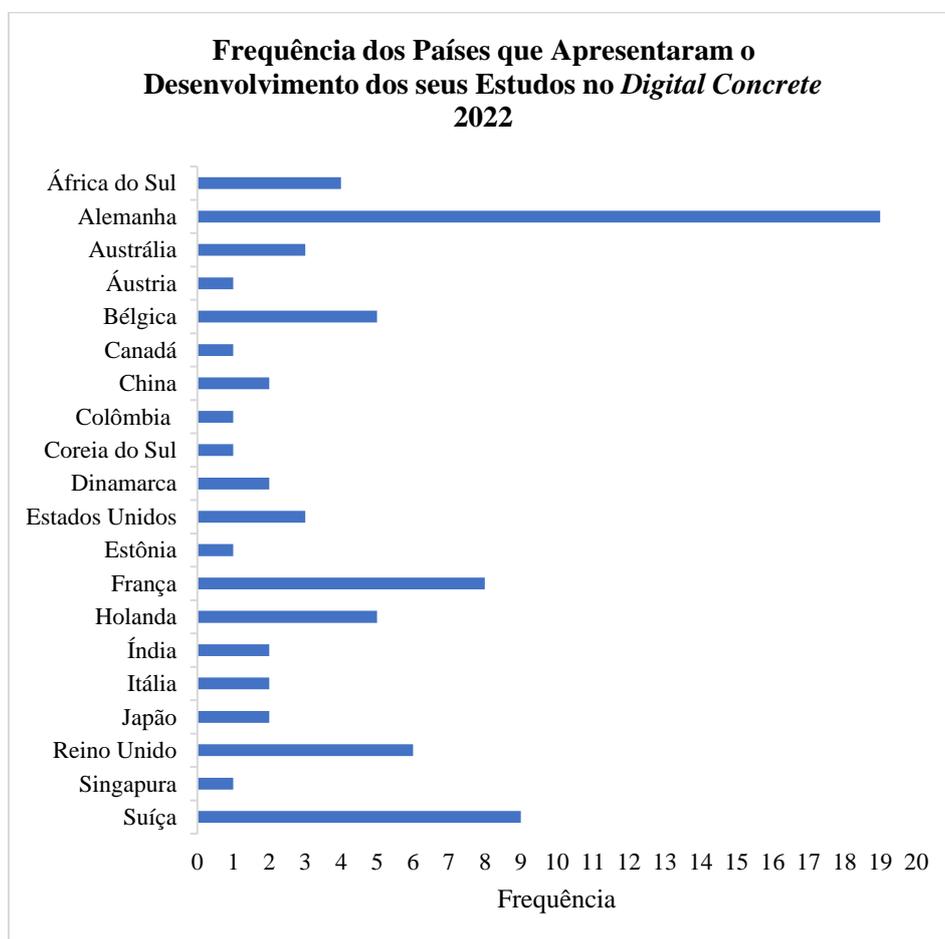
PAÍS	FREQUÊNCIA
Alemanha	19
Suíça	9
França	8
Reino Unido	6
Bélgica	5
Holanda	5
África do Sul	4
Austrália	3
Estados Unidos	3
China	2
Dinamarca	2
Índia	2
Itália	2
Japão	2
Áustria	1

PAÍS	FREQUÊNCIA
Canadá	1
Colômbia	1
Coreia do Sul	1
Estônia	1
Singapura	1
<b>TOTAL</b>	<b>78</b>

Fonte: Autor (2023)

Além disso, para melhor análise e visualização desses resultados foi gerado o gráfico da Figura 20 com os países e suas determinadas frequências de aparições.

**Figura 20** – Gráfico da representação dos países que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no *Digital Concrete 2022*



Fonte: Autor (2023)

Diante dos resultados expostos, é perceptível o grande interesse e investimento da Alemanha nos estudos associados ao desenvolvimento das possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais à base de cimento. Apesar da grande concentração de estudos no país,

a partir do mapeamento, pode-se observar a dispersão dos trabalhos nas diversas Universidades/Institutos de ensino da Alemanha. Outro fator de destaque está ligado aos trabalhos explorarem a investigação de diferentes áreas das sessões do evento, Quadro 4. É importante ressaltar que a Suíça, a França, o Reino Unido, a Bélgica e a Holanda também estão entre os países de destaque nos desenvolvimentos destas tecnologias.

**Quadro 4** – Quadro das Universidades/Institutos de ensino da Alemanha e suas respectivas áreas de pesquisa no *Digital Concrete 2022*

<b>ÁREA</b>	<b>UNIVERSIDADE/INSTITUTO</b>
Processos alternativos	Universidade de Stuttgart
	Universidade Leibniz Hannover
	Universidade Técnica de Munique
Projeto Estrutural e Otimização	Universidade Técnica de Braunschweig
Aglutinantes e Agregados 1: Agregados	Universidade Técnica de Dresden – TU Dresden
Aglutinantes e Agregados 3: Materiais de Encruamento	Universidade Técnica de Dresden – TU Dresden
Design e Fluxo de Trabalho Digital	IAB Weimar – Instituto Weimar de Pesquisa Aplicada à Construção
	Universidade Técnica de Dresden – TU Dresden
Jateamento de Materiais	Universidade Técnica de Braunschweig
	Universidade Leibniz Hannover
Ligação de Leito de Partículas	Universidade Técnica de Braunschweig
	Universidade Técnica de Braunschweig
	Universidade Técnica de Munique
Capacidade de Impressão e Controle de Configuração	Instituto Federal de Pesquisa de Materiais (BAM)
Controle de Processo, Percurso e Inspeção	Universidade Técnica de Braunschweig
	Universidade Leibniz Hannover
	Universidade de Arte de Berlim
	Universidade Técnica de Braunschweig
	Universidade Técnica de Braunschweig
Reforço	Universidade Técnica de Braunschweig
	Universidade Técnica de Dresden – TU Dresden
Controle de Propriedade de Material Úmido	Universidade Técnica de Dresden – TU Dresden
	Universidade Técnica de Dresden – TU Dresden

**Fonte:** Autor (2023)

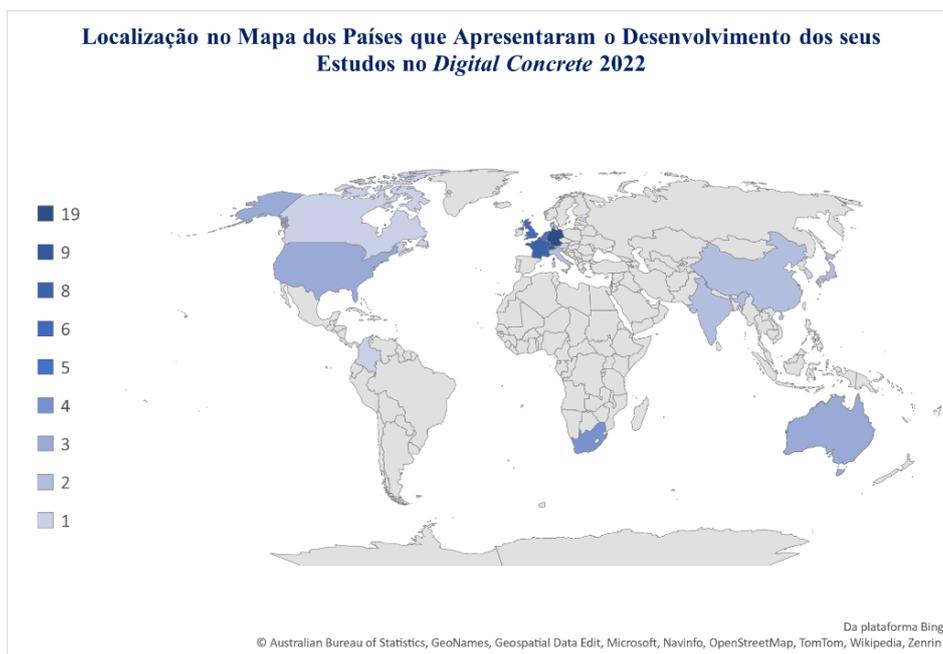
Em relação ao Quadro 4, a repetição das Universidades/Institutos mostra que uma mesma academia explora mais de uma área, além de mais de uma abordagem metodológica de pesquisa.

Apesar dos anais da Terceira Conferência Internacional RILEM sobre Concreto e Fabricação Digital serem compostos por 68 artigos completos, nota-se que o somatório total das frequências de aparições dos países representados no evento é 78. Logo, outro aspecto relevante para análise é o fato de que os trabalhos são desenvolvidos em parcerias. As colaborações identificadas são caracterizadas por Universidade/Institutos de um mesmo país, entre Universidades/Institutos de países distintos, bem como entre Universidade/Institutos e empresas nos setores de engenharia civil, arquitetura, computação e design.

No caso da Alemanha, as parcerias foram principalmente entre Universidades/Institutos do próprio país (Dielemans *et al.*, 2022; Krenzer *et al.*, 2022; Böhler *et al.*, 2022; Lachmayer, *et al.*, 2022). Os artigos resultantes das colaborações estão inseridos nas sessões Procedimentos Alternativos, Design e Fluxo de Trabalho Digital, Jateamento de Materiais e Controle de Processo, Percurso e Inspeção, respectivamente. Além disso, o trabalho intitulado: “*Generative Structural Design: A Cross-Platform Design and Optimization Workflow for Additive Manufacturing*” de Aziz *et al.* (2022) marca uma parceria entre a Universidade de Arte de Berlim, a Universidade Técnica de Berlim e a Universidade de Seoul na Coreia do Sul.

A partir das análises dos dados é evidente que o campo da fabricação digital associado aos materiais cimentícios está sendo explorado por países em diferentes continentes. O mapa representado na Figura 21 foi plotado visando auxiliar na visualização da distribuição dos países com pesquisas em desenvolvimento na área no mundo.

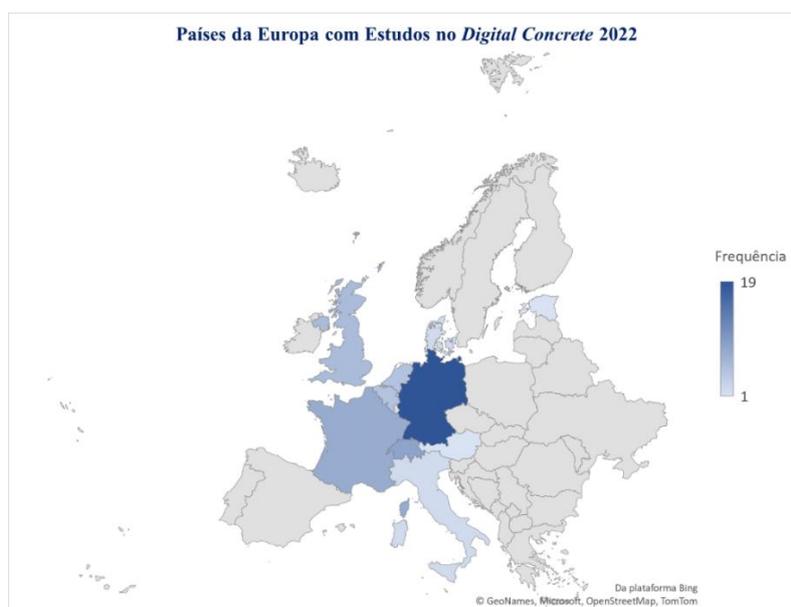
**Figura 21** – Mapa de localização dos países que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no *Digital Concrete 2022*



**Fonte:** Autor (2023)

Embora, a disseminação das pesquisas esteja sendo globalmente ampliada, de acordo com o mapeamento baseado no *Digital Concrete 2022*, a maior concentração das explorações está nos países da Europa, Figura 22.

**Figura 22** – Mapa dos países da Europa que apresentaram o desenvolvimento dos seus estudos no *Digital Concrete 2022*



**Fonte:** Autor (2023)

Tendo em vista a crescente exploração associada aos materiais cimentícios para a manufatura aditiva, nos próximos tópicos serão apresentadas e discutidas as influências dos materiais constituintes das misturas cimentícias para a tecnologia 3DCP, encontradas a partir da Revisão Sistemática de Literatura (RSL). Além disso, visando ampliar à perspectiva associada à tecnologia 3DCP, será feita uma breve análise aos componentes das misturas cimentícias encontradas no mercado.

## **4.2 Misturas com Cimento Portland (CP) para extrusão**

Segundo Liu *et al.* (2022), as misturas cimentícias com Cimento Portland (CP) continuam populares entre os materiais empregados no processo 3DCP. Entretanto, o processo de fabricação do CP gera grandes cargas de gases de efeito estufa, além de largo consumo de recurso e energia (Chen; Veer; Copuroglu, 2017). Com isso, a estratégia de substituir parcialmente o CP por diferentes tipos de resíduos estabelece a base de materiais de construção sustentáveis no campo da tecnologia por extrusão (Liu *et al.*, 2022).

### **4.2.1. Materiais Cimentícios Suplementares (SCM) ou adições minerais**

Com base nos estudos levantados a partir da metodologia desta pesquisa, nota-se um interesse em investigar as propriedades das misturas cimentícias para MA em que o CP é parcialmente substituído por Material Cimentício Suplementar (SCM), também conhecidos como adições minerais.

Segundo Chen *et al.* (2022), os principais SCM para o processo 3DCP incluem Cinzas Volantes (CV), Sílica Ativa (SA) e Escória Granulada de Alto-forno (EGAF). A adição de SCM pode melhorar a densidade do empacotamento, a coesão e a consistência do fluxo da mistura à base de cimento (Chen *et al.*, 2022). Com isso, além de impactar na redução de Cimento Portland, as adições influenciam na adaptação da mistura, no estado fresco, aos parâmetros requeridos no processo 3DCP. Somado a isso, o progresso contínuo da pesquisa com misturas cimentícias com CP, para extrusão, mostra que a mistura contendo SCM influencia significativamente nos parâmetros de capacidade de extrusão e capacidade de construção (Liu *et al.*, 2022).

Os pesquisadores Chen *et al.* (2022) apresentam os diferentes impactos dos SCM nas misturas, no estado fresco. As características físicas e químicas aliadas às proporções

desses materiais suplementares nas misturas revelam diferentes efeitos que podem tornar o processo de impressão viável, Quadro 5.

**Quadro 5** – Características e efeitos dos diferentes SCM nas misturas para 3DCP

SCM	Cinza Volante (CV)	Sílica Ativa (SA)	Escória Granulada de Alto-forno (EGAF)
<b>MORFOLOGIA</b>	Partícula redonda e superfície lisa	Partícula redonda	Partícula finamente granular e superfície lisa
<b>QUÍMICA</b>	Si–Al–O	Si–O	Ca–Si–Al–Mg–O
<b>(% EM MASSA) MÁX. CP SUBSTITUÍDO</b>	80	20	85
<b>PRINCIPAIS EFEITOS</b>	Efeito do rolamento de esferas	Preencher espaços entre outras partículas de cimento para aumentar a densidade de empacotamento e melhorar a coesão	Efeito de micro preenchimento
	Efeito da diluição na floculação do cimento	Aumento na floculação do cimento	Área de superfície específica relativamente alta e baixa reatividade química
<b>COMPORT. REOLÓGICO</b>	Melhorar a fluidez; reduzir a tensão de escoamento e a viscosidade plástica	Aumentar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica	Melhorar a trabalhabilidade; reduzir a viscosidade plástica e/ou tensão de escoamento
	Menor resistência inicial; reduzir tempo de pega	Maior resistência inicial; aumento do tempo de pega	
<b>INFLUÊNCIA NO PARÂMETRO DE IMPRESSÃO</b>	Contribuir para o bombeamento	Afetar adversamente o bombeamento	Contribuir para capacidade de extrusão
	Afetar adversamente a capacidade de construção	Contribuir para a capacidade de construção	Afetar adversamente o bombeamento Aumento das demandas de água e superplastificantes

Fonte: Adaptada de Chen *et al.* (2022)

A partir das análises da literatura, nota-se que a proporção máxima de CP substituída, em massa, por cinza volante e por escória granulada de alto-forno em misturas para 3DCP são encontradas em teores bem mais elevados que os de sílica ativa.

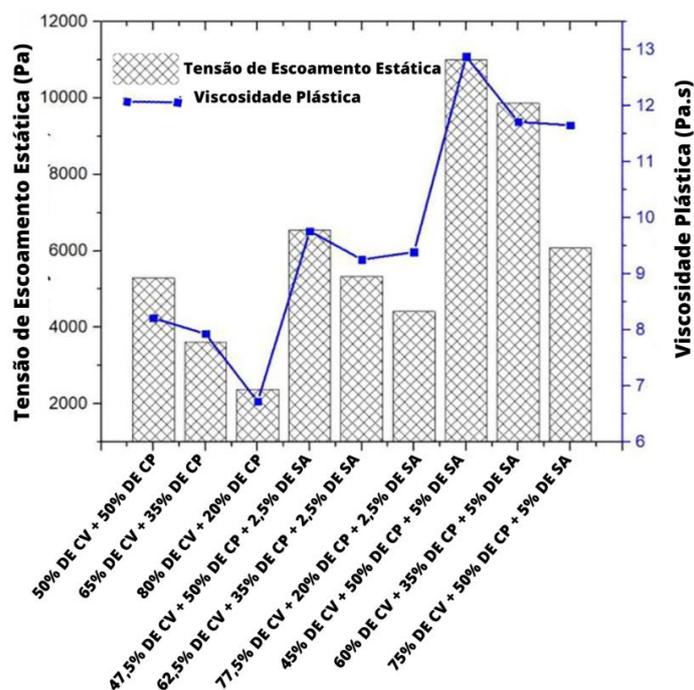
Nesse sentido, em relação às CV, Chen *et al.* (2022) destacam que para a tecnologia digital de extrusão são usadas, principalmente, as cinzas de Classe F. As cinzas volantes de Classe C apresentam melhor reatividade, em comparação as cinzas volantes

de Classe F, devido à presença de cálcio. Entretanto, os componentes de cálcio podem estar presentes nas cinzas volantes em várias composições e propriedades implicando em cuidados específicos e pesquisas aprofundadas para uso com alto teor associado ao cimento (Wilińska; Pacewska, 2018).

A porcentagem de substituição de 80% de CP, em massa, por cinza volante é proveniente dos estudos publicados por Panda e Tan (2019). Os autores avaliaram misturas cimentícias para 3DCP contendo alto volume de cinza volante Classe F, variando a proporção de substituição entre 50 e 80%. Liu *et al.* (2022) ressaltam que, na prática, a adição de CV é comumente realizada pela substituição de massa de cimento, o que resulta em alteração no volume da pasta. Com isso, as mudanças no comportamento reológico da mistura dependerão tanto das propriedades da cinza volante quanto da fração variável do volume da pasta.

Em suas observações, Panda e Tan (2019) verificaram que ocorreu a redução da tensão de escoamento estática e da viscosidade plástica nas misturas, à medida que foram sendo analisadas as produções com maiores teores de substituição de CP por CV, Figura 23.

**Figura 23** – Comportamento reológico das misturas cimentícias com SCM



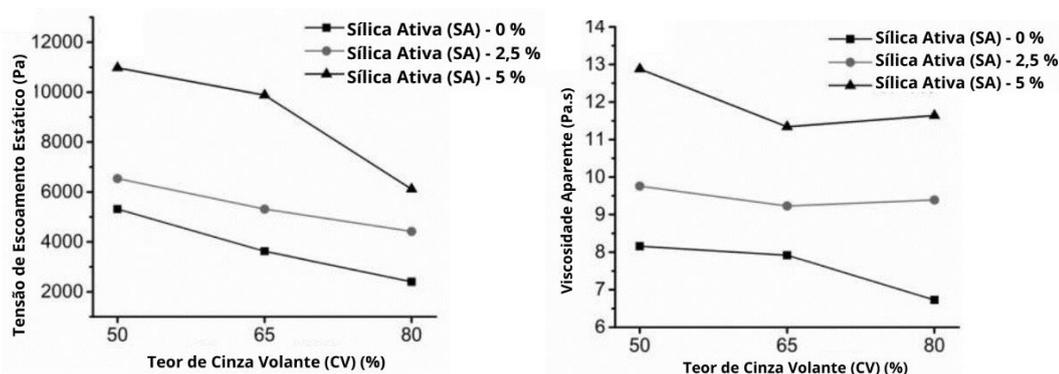
Fonte: Adaptada de Panda e Tan (2019)

Ao realizar a caracterização física do cimento e da cinza volante pode-se constatar que as partículas são angulares e esféricas, respectivamente. Logo, a redução da tensão de escoamento e da viscosidade pode ser relacionada ao “efeito do rolamento de esferas”, fenômeno intrínseco às partículas esféricas com textura de superfície lisa, que contribui para melhor fluidez da mistura cimentícia fresca (Jiao *et al.*, 2017). Para a tecnologia 3DCP, esse efeito pode influenciar positivamente o parâmetro da capacidade de bombeamento.

Por outro lado, a substituição do CP pela mesma massa de cinza volante aumenta o volume da pasta, diminui proporcionalmente a concentração de cimento na pasta e, portanto, reduz o número de ligações flocculantes entre partículas de cimento, sendo chamado de “efeito de diluição” (Jiao *et al.*, 2017). Logo, Chen *et al.* (2022) ressalta que o alto volume de CV no ligante pode resultar em um efeito de diluição significativo, retardando a pega inicial e a hidratação precoce. Com isso, a alta proporção de cinza volante afeta adversamente o parâmetro do acúmulo estrutural na tecnologia de manufatura aditiva com materiais à base de cimento.

Liu *et al.* (2022) destacam que a influência adversa da cinza volante à capacidade de construção, devido à diminuição da tensão de escoamento estática e da viscosidade da mistura, pode ser contornada quando associada à adição de sílica ativa, Figura 24.

**Figura 24** – Efeito da associação de CV e SA na tensão de escoamento estática e na viscosidade aparente da mistura



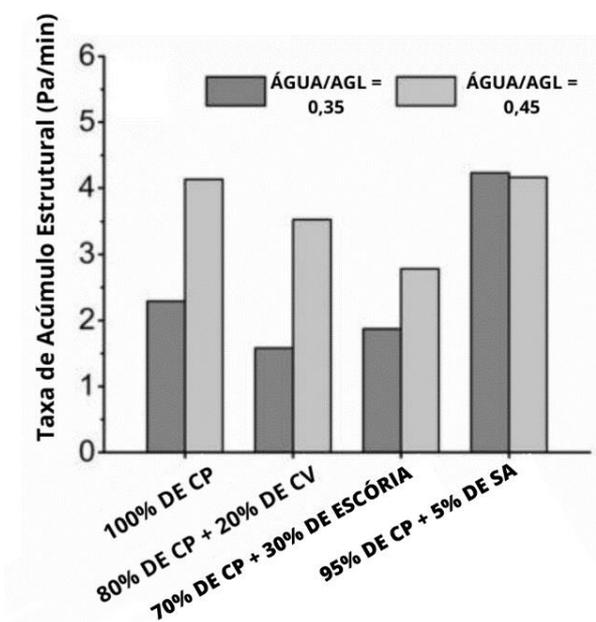
Fonte: Adaptada de Liu *et al.* (2022)

Nesse contexto, Paul *et al.* (2018) realizou estudos com materiais cimentícios para 3DCP com 40% de substituição, em massa, de CP por cinza volante e 20% de sílica ativa em uma mesma mistura. O autor constatou que a produção obteve uma consistência ideal

de fluxo para extrusão, bem como atendeu ao parâmetro de capacidade de construção necessária à tecnologia utilizada no experimento.

Entretanto, Liu *et al.* (2022) mostram que a mistura com CP e sílica apresentam uma alta taxa de acúmulo estrutural. Segundo Yuan *et al.* (2018), a alta taxa de acúmulo estrutural reduz a força de ligação entre as camadas extrudadas. Com isso, de acordo com os estudos levantados por Liu *et al.* (2022), a incorporação de cinza volante e escória granulada de alto-forno podem reduzir a alta taxa influenciada pelo CP e a sílica ativa, Figura 25.

**Figura 25** – Efeito da associação das SCM ao CP na taxa de acúmulo estrutural da mistura de acordo com a relação água/aglomerante



Fonte: Adaptada de Liu *et al.* (2022)

Com isso, a partir das observações dos efeitos dos SCM percebe-se que cada material suplementar terá influências que contribuem ou afetam adversamente os parâmetros requeridos para o processo de impressão. Então, para alcançar uma dosagem com comportamento ideal, em relação às adições de SCM, os estudos da literatura propõem misturas desses materiais em proporções e combinações diferentes para uma mesma produção.

#### 4.2.2. Argila Calcificada de Calcário (LC<sup>3</sup>)

Chen *et al.* (2022) destacam que, a longo prazo, o principal desafio em relação ao uso dos SCM comuns é a redução gradual de produção e disponibilidade destes materiais. Logo, a argila calcificada e o calcário, devido à abundância em todo o mundo, destacam-se como alternativas ideais para substituição parcial do CP nas misturas para impressão.

Como para os SCM apresentados no tópico anterior, os autores apresentam os diferentes efeitos e impactos do calcário e da argila calcificada, em forma de Metacaulim (MK) como fase principal, nas misturas no estado fresco (Quadro 6).

**Quadro 6** – Características e efeitos do calcário e da argila calcificada, em forma de Metacaulim (MK) como fase principal, nas misturas para impressão

SCM	Calcário	Argila calcificada, em forma de Metacaulim (MK)
<b>MORFOLOGIA</b>	Forma irregular e superfície áspera	Estrutura em camadas e superfície áspera
<b>QUÍMICA</b>	CaCO <sub>3</sub>	Si–Al–O
<b>(% EM MASSA) MÁX. CP SUBSTITUÍDO</b>	55	40
<b>PRINCIPAIS EFEITOS</b>	Efeito de micro preenchimento (tamanho de partícula mais grosso ou semelhante em comparação)	Argila Calcificada de Alto Teor (HCC) ~ 75% de MK
	Efeito de micro preenchimento e aceleração da hidratação precoce (calcário ultrafino)	Argila Calcificada de Baixo Teor (LCC) ~ 40 a 50% de MK
<b>COMPORT. REOLÓGICO</b>	Aumentar a trabalhabilidade; reduzir a tensão de escoamento e a viscosidade plástica	Reduzir a trabalhabilidade; aumentar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica; reduzir do tempo de pega; aumentar a taxa de acúmulo estrutural
	Reduzir a trabalhabilidade; aumentar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica	
<b>INFLUÊNCIA NO PARÂMETRO DE IMPRESSÃO</b>	Contribuir para a bombeabilidade	Afetar adversamente a bombeabilidade
	Afetar adversamente a bombeabilidade	Contribuir para a capacidade de construção

Fonte: Adaptada de Chen *et al.* (2022)

Apesar do potencial da LC<sup>3</sup> como material cimentício alternativo para extrusão, a implementação ainda é limitada (Chen *et al.*, 2022). Com base nas pesquisas analisadas por Chen *et al.* (2022), nota-se que a depender do tipo de argila calcificada fornecida o

material pode apresentar várias características químicas e físicas distintas, o que impacta na reologia da mistura fresca.

### 4.3 Influência dos agregados nas misturas para extrusão

De acordo com Chen *et al.* (2022), para reduzir o teor de Cimento Portland na mistura para 3DCP, além da estratégia de substituir parte do CP por Materiais Cimentícios Suplementares ou por outros tipos de cimento de baixo carbono, o teor também é estrategicamente reduzido aumentando-se a proporção de agregado.

Segundo estudos levantados por Chen *et al.* (2022), a relação entre massa de agregado e ligante é menor que 2 na maioria das misturas produzidas para a tecnologia 3DCP. A Tabela 3 apresenta um resumo das proporções encontradas na literatura.

**Tabela 3** – Misturas para tecnologia 3DCP associando as proporções agregado/ligante

MISTURAS	TAMANHO DO AGREGADO	RELAÇÃO AGREGADO/AGLUTINANTE	REFERÊNCIA
à base de cimento Portland	0 – 0,1 mm	1,00	Perrot, Rangeard e Pierre (2016)
	0 – 2 mm	2,00	Lu <i>et al.</i> (2020)
	0 – 1,2 mm	1,00	Xu <i>et al.</i> (2019)
	0 – 2 mm	1,70	SChröfl, Nerella e Mechtcherine (2019)
	0 – 1,2 mm	1,00	Ding <i>et al.</i> (2020)
	0 – 2 mm	1,50	Marchment, Sanjayan e Xia (2019)
	0 – 2 mm	1,18	Khalil <i>et al.</i> (2017)
à base de cimento Portland + Materiais Cimentícios Suplementares	0,16 – 0,2 mm	1,38	Lee <i>et al.</i> (2019)
	0 – 2 mm	1,50	Le <i>et al.</i> (2012)
	0 – 2 mm	1,54	Nerella <i>et al.</i> (2019)
	0 – 1 mm	1,00	Zhang <i>et al.</i> (2019)
	0,06 – 8 mm	2,50	Mechtcherine <i>et al.</i> (2019)
	0 – 2,36 mm	2,30	Kazemian <i>et al.</i> (2017)

**Fonte:** Adaptado de Rehman e Kim (2021)

Partindo das pesquisas levantadas por Rehman e Kim (2021), os agregados têm impacto significativo na reologia das misturas cimentícios destinados ao processo 3DCP.

Zhang *et al.* (2019) destacam que o teor e a distribuição dos agregados nas misturas afetam diretamente a viscosidade do material. Agregados bem distribuídos podem aumentar a viscosidade, tornando a mistura mais resistente ao escoamento e à deformação durante a extrusão. Além disso, a proporção, o tipo, o formato e o tamanho dos agregados influenciam a trabalhabilidade da mistura, afetando sua capacidade de ser manipulada e o processo de deposição de camadas.

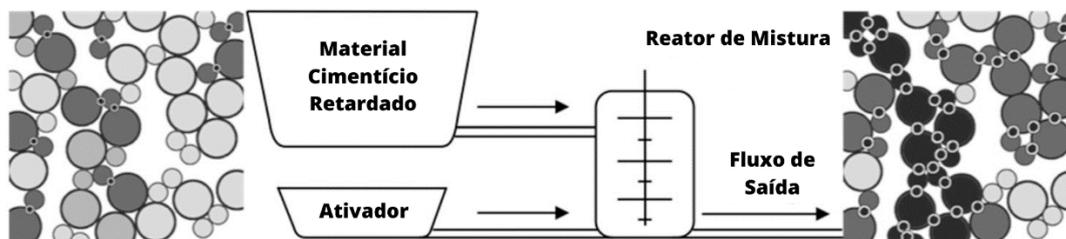
A distribuição uniforme dos agregados pode melhorar a fluidez, garantindo uma deposição mais uniforme das camadas. Agregados bem distribuídos e devidamente selecionados podem melhorar a estabilidade estrutural das peças impressas, proporcionando uma distribuição uniforme de carga e resistência ao cisalhamento (Rehman e Kim, 2021).

#### **4.4 Influência dos aditivos químicos nas misturas para extrusão**

No processo 3DCP com materiais à base de cimento, os aditivos químicos são fortes aliados para obter-se o controle da hidratação do material durante o processo. Para Wangler *et al.* (2022), o maior desafio para implementação efetiva dos aditivos químicos nas misturas cimentícias no processo 3DCP envolve a precisão em quando e onde adicioná-los ao processo. Somado a isso, Reiter *et al.* (2020) destaca que para que processo atenda simultaneamente um rápido desenvolvimento de resistência do material após o depósito, mas uma taxa de construção lenta antes desse momento, o acúmulo estrutural controlado é um requisito importante para a tecnologia. Com isso, o autor complementa que para atender a essas necessidades contraditórias, pode-se empregar a ativação controlada da hidratação pouco antes do posicionamento do material, conhecida como abordagem "*set-on-demand*".

O conceito "*set-on-demand*" refere-se à capacidade de controlar o processo de hidratação do material cimentício de forma específica e sob demanda durante o processo de extrusão. A Figura 26 ilustra o conceito para processamento de uma mistura em um sistema "*set-on-demand*". Um lote de mistura cimentícia retardada é bombeada para um reator de mistura, onde um ativador é misturado antes do escoamento e deposição do material. Esse sistema permite o controle oportuno da reologia do material, permitindo o acúmulo estrutural adequado para o sucesso do processo (Reiter *et al.*, 2020).

**Figura 26** – Conceito “*set-on-demand*”: uma mistura cimentícia inicialmente retardada é ativada, ainda no reator de mistura, antes da deposição final



Fonte: Reiter *et al.* (2020)

#### 4.5 Componentes das misturas cimentícias para extrusão no mercado

No cenário do mercado da construção, os fabricantes das impressoras 3D para construção em larga escala estão desenvolvendo seu próprio material à base de cimento. Nesse viés, as misturas utilizadas são otimizadas para suas impressoras, ou para seus parceiros imediatos, normalmente compostas por cimento Portland, agregados locais e uma mistura de aditivos de baixo custo disponíveis comercialmente (Kauppila, 2023).

Kauppila (2023) aponta que de modo geral, os materiais para a tecnologia 3DCP devem ter capacidade de extrusão e retenção de forma. Logo, para comercialização, as empresas voltadas para produção das misturas desenvolvem misturas cimentícias secas que atendem todos os parâmetros requeridos para a tecnologia.

No Quadro 7 foram sintetizadas as principais empresas, que atualmente se destacam no setor da tecnologia 3DCP, associadas à composição das misturas bem como à tecnologia compatível com o produto que são produzidas para o mercado.

**Quadro 7** – Associação das principais empresas às composições e as tecnologias compatíveis com as misturas cimentícias produzidas para o mercado

EMPRESA	MATERIAL	TIPOS DE TECNOLOGIA
CyBe	CyBe <i>Mortar</i>	CyBe
CEMEX	D.fab	Cobod
Sika	Sikacrete-751 3D / Sikacrete-752 3D	Todas
	Sikacrete-7100 3D	Sika

Fonte: Autor (2024)

A *CyBe Construction*, empresa holandesa de construção aditiva, desenvolve soluções tecnológicas com o intuito de permitir que a manufatura aditiva com material cimentício seja acessível ao mercado. Do ponto de vista do material, a empresa fabrica a

argamassa ecológica de alto desempenho - *CyBe Mortar* - especificamente para impressão em tecnologia criadas pela própria marca, Figura 27.

**Figura 27** – Ensaio com a *CyBe Mortar*, material cimentício produzido pela empresa CyBe



Fonte: CyBe (2024)

Segundo a empresa, a *CyBe Mortar* incorpora materiais de construção ecológicos, como agregados reciclados e materiais cimentícios complementares, que contribuem para uma menor pegada de carbono em comparação com as composições de argamassa tradicionais, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> em 32% quando comparado ao cimento Portland. Além disso, a CyBe afirma que, a deposição precisa e controlada das camadas da argamassa, quando utilizada com impressoras CyBe, otimizam a integridade estrutural, eliminando a necessidade de reforços ou estruturas de suporte excessivos (CyBe, 2024).

Voltado ao mercado dos aditivos, a Cemex, uma das maiores produtoras de cimento do mundo, em parceria com a Cobod, empresa dinamarquesa de robótica e automação no setor construção, lançaram uma família de aditivos para manufatura aditiva com materiais cimentícios. Nomeada D. fab, a solução transforma o concreto convencional em um material versátil para a tecnologia 3DCP. As empresas destacam que, além do concreto convencional tornar-se mais fluido e maleável, o que contribui positivamente para a capacidade de bombeamento e extrusão do material, em combinação

com a tecnologia desenvolvida pela empresa Cobod, o aditivo permite que o concreto ganhe forma instantaneamente (CEMEX, 2024).

Em 2021, a Cobod aplicou pela primeira vez a nova solução no subúrbio de Luanda, capital da Angola, em parceria com a construtora *Power2Build*, Figuras 28 e 29.

**Figura 28** – Processo de construção aplicando as tecnologias das empresas Cemex e Cobod em Luanda, na África



**Fonte:** Power2build (2021)

**Figura 29** – Construção finalizada pela empresa *Power2build* aplicando as tecnologias das empresas Cemex e Cobod em Luanda, na África



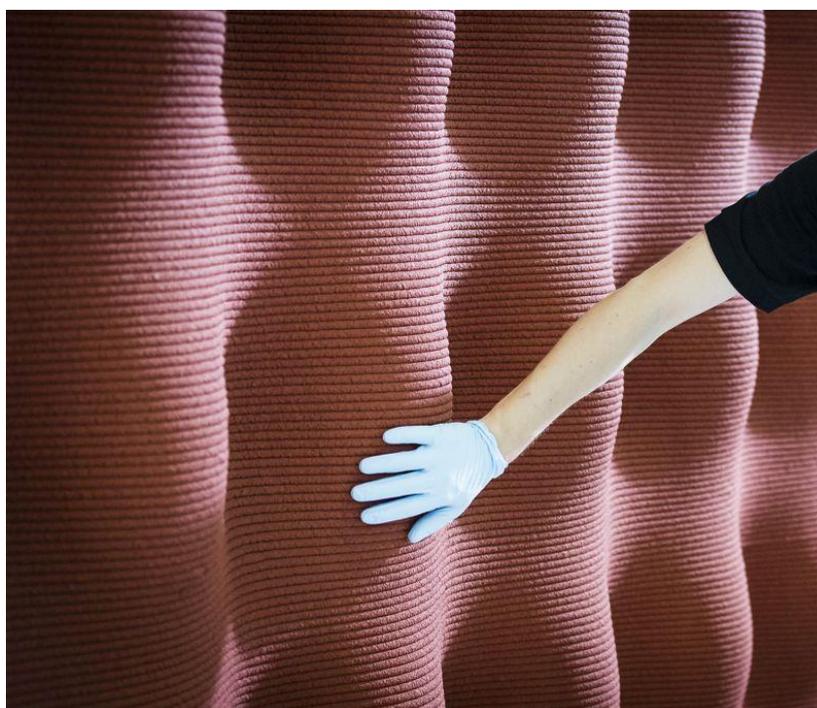
**Fonte:** Power2build (2021)

Além da possibilidade de utilizar o concreto convencional, foi possível utilizar materiais locais. Logo, as empresas concluíram que com a diversidade de materiais locais que podem ser utilizados, a solução permite uma redução de tempo e custo significativos em comparação com a construção tradicional e outros métodos de impressão 3D (Power2build, 2024).

Por fim, outra grande empresa que vem ganhando destaque no desenvolvimento de materiais cimentícios para a tecnologia 3DCP é a Sika. O Sikacrete-751 3D e o Sikacrete-752 3D são materiais cimentícios desenvolvidos para utilização em qualquer equipamento, com a garantia de que a tecnologia e o material trabalhem juntos, de acordo com as especificações do produto. A empresa destaca que os produtos são monocomponentes que precisam ser misturados com água. Além disso, o material apresenta consistência ajustável, elevada consistência tixotrópica para manter a forma após a extrusão, rápido tempo de pega inicial, rápido desenvolvimento de resistências, baixa retração, para reduzir o potencial de fissuração, granulometria fina e curva granulométrica otimizada (Sika, 2024).

A Sika, também disponibiliza no mercado o Sikacrete-7100 3D, material cimentício com compatibilidade para o equipamento de pórtico 3DCP da marca, que consiste em um pó cimentício com fibras e polímero líquido que é combinado com água na estação de mistura, Figura 30. O material é indicado para altas velocidades de impressão e impressão em ângulos. Além disso, apresenta alta resistência à compressão e longo tempo aberto (Sika, 2024).

**Figura 30** – Paredes fabricadas com tecnologia 3DCP utilizando o Sikacrete-7100 3D



Fonte: Sika (2023)

Somado a isso, a Sika ainda produz uma gama de produtos compatíveis para aprimora todo o seu projeto com tecnologia 3DCP, incluindo aditivos, enchimento, vedação, reforço e fixação (Sika, 2024).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado proporcionou uma análise detalhada e sistemática das características das misturas cimentícias destinadas à manufatura aditiva na era digital, com foco na técnica de extrusão. Tendo em vista o panorama geral dos estudos associados ao campo da 3DCP, é possível concluir que o processo é uma alternativa revolucionária para aumento de produtividade e inserção de novos materiais na indústria da construção. Entretanto, a ferramenta enfrenta diversos desafios impostos pela complexidade tecnológica do processo.

A revisão da literatura revelou um notável progresso nas investigações voltadas para o processo de manufatura aditiva de concreto (3DCP), refletindo uma rápida evolução na compreensão dos materiais e técnicas envolvidos. A abordagem sistemática adotada permitiu identificar lacunas e tendências emergentes na pesquisa, destacando a importância de analisar o comportamento do material no estado fresco e explorar alternativas para reduzir o volume de cimento Portland nas misturas. Somado a isso, torna-se essencial compreender o comportamento reológico dos materiais cimentícios durante os estágios críticos do processo.

Além disso, a complementação da revisão sistemática com o mapeamento de estudos apresentados em conferências relevantes proporcionou uma visão abrangente das iniciativas e avanços no campo da manufatura aditiva com materiais cimentícios.

É evidente que o desenvolvimento de materiais cimentícios para a tecnologia vai além do ambiente acadêmico, com o mercado da construção investindo estrategicamente em produtos inovadores e sustentáveis. A busca por alternativas que reduzam parcialmente o uso de cimento Portland, incorporando diferentes tipos de resíduos, é uma tendência crescente que visa tornar a manufatura aditiva competitiva com o mercado convencional.

No entanto, ainda há desafios a serem enfrentados e áreas a serem exploradas em pesquisas futuras. Questões como a otimização da resistência e durabilidade do material, o aprimoramento das técnicas de controle de processo e a viabilidade econômica da manufatura aditiva continuam a ser alvos importantes para investigações adicionais.

Em suma, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre as características das misturas cimentícias para manufatura aditiva na era digital, destacando o potencial dessa tecnologia inovadora para transformar a indústria da construção e impulsionar a sustentabilidade no setor.

### **5.1 Sugestão para trabalhos futuros**

É importante destacar que este estudo realiza uma análise abrangente das características das misturas cimentícias para manufatura aditiva. Com isso, nota-se que existe um leque de potenciais explorações associadas à tecnologia 3DCP. Vale ressaltar que por se tratar de uma área disruptiva e inovadora, que nos últimos anos destacou-se com crescentes investigações, ainda é necessário o preenchimento de várias lacunas associadas à área.

Com isso, sugere-se para trabalhos futuros no campo da tecnologia 3DCP por extrusão:

- Analisar, a partir da literatura, os ensaios para os materiais cimentícios no estado fresco e endurecido;
- Analisar produções das misturas, na prática, a partir das proporções ideais proposta na literatura;
- Realizar investigações mais aprofundadas relacionadas aos agregados utilizados nas misturas, que contribuam para redução do teor de cimento Portland;
- Realizar investigações sobre o impacto do tamanho e da granulometria dos agregados na capacidade de impressão, na qualidade das camadas depositadas e na resistência final das estruturas extrudadas;
- Realizar investigações mais aprofundadas relacionadas aos aditivos químicos que contribuam para os parâmetros de capacidade de construção;
- Realizar investigações e análises relacionadas à busca por patentes no cenário da manufatura aditiva com materiais cimentícios.

## REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 9935**: Agregados: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- AHARI, Reza Saleh; ERDEM, Tahir Kemal; RAMYAR, Kambiz. Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 26-37, 2015.
- AHMED, Sara; YEHIA, Sherif. Evaluation of Workability and Structuration Rate of Locally Developed 3D Printing Concrete Using Conventional Methods. **Materials**, v. 15, n. 3, p. 1243, 2022.
- ALGHAMDI, Hussam; NAIR, Sooraj AO; NEITHALATH, Narayanan. Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders. **Materials & Design**, v. 167, p. 107634, 2019.
- ANTON, Ana *et al.* A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. **Automation in Construction**, v. 122, p. 103467, 2021.
- ASTM, C. 618. **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**, **Annual Book of ASTM Standards**, 2003.
- AZIZ, Saqib *et al.* Generative Structural Design: A Cross-Platform Design and Optimization Workflow for Additive Manufacturing. In: **Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 357-363.
- BARBOSA, Filipe Timothy *et al.* Reinventing construction through a productivity revolution. **McKinsey**, 2017. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>>. Acesso em: 26 de jun. de 2022.
- BARBOSA, Marcella de Sena. **Desenvolvimento de compósitos para impressão 3D com consumo de cimento reduzido por meio de adições minerais**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BÖHLER, David *et al.* Influence of Material and Process Parameters on Hardened State Properties of Shotcrete 3D-Printed Elements. In: **Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 255-260.
- BOS, Freek P. *et al.* (Ed.). **Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2020**. Springer Nature, 2020.

- BOSCARO, Federica *et al.* Eco-friendly, set-on-demand digital concrete. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 9, n. 1, p. 3-11, 2022.
- BUSWELL, Richard A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37-49, 2018.
- BUSWELL, Richard A. *et al.* A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 134, p. 106068, 2020.
- BUSWELL, Richard *et al.* (Ed.). **Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022**. Springer Nature, 2022.
- CEMEX. CEMEX and COBOD collaborate on 3D concrete printing system. Disponível em: <https://www.cemexventures.com/cemex-and-cobod-3d-printing-system/>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- CHEN, Wai-Fah; LIEW, JY Richard. **The civil engineering handbook**. Crc Press, 2002.
- CHEN, Yu *et al.* A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103599, 2022.
- CHEN, Yu *et al.* Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106040, 2020.
- CHEN, Yu *et al.* Limestone and calcined clay-based sustainable cementitious materials for 3D concrete printing: a fundamental study of extrudability and early-age strength development. **Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1809, 2019b.
- CHEN, Yu *et al.* The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing. **Materials**, v. 12, n. 9, p. 1374, 2019a.
- CHEN, Yu; VEER, Fred; COPUROGLU, Oguzhan. A critical review of 3D concrete printing as a low CO2 concrete approach. **Heron**, v. 62, n. 3, p. 167-194, 2017.
- CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, SL da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **Trabalho apresentado**, v. 8, 2011.
- COOK, R.; LAKE, L. W.; MITCHELL, R.F. **Cementing. Petroleum handbook, drilling engineering**. Volume 2. Richardson, Texas. Estados Unidos da América, SPE, 2006.
- CYBE. Mortar: our eco friendly building material. Disponível em: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/cybe-mortar/eco-friendly-material/>. Acesso em: 10 de mar. de 2024.

DAS, Arnesh *et al.* Early-age rheology and hydration control of ternary binders for 3D printing applications. **Cement and Concrete Research**, v. 162, p. 107004, 2022.

DIAS, Leonardo de Souza. **Metodologia de dosagem com base em relações constitutivas básicas de misturas para impressão 3d em concreto (3DCP)**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

DIELEMANS, Gido *et al.* Mobile Additive Manufacturing: A Case Study of Clay Formwork for Bespoke in Situ Concrete Construction. In: **Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 15-21.

DING, Tao *et al.* Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103724, 2020.

DORIS. 3D Concrete Printing Market to Reach \$56.4 Million by 2021. **3PRINTR**, 2016. Disponível em: <<https://www.3printr.com/3d-concrete-printing-market-reach-56-4-million-2021-1239664/>>. Acesso em: 02 de jul. de 2022.

ELKASEER, Ahmed *et al.* Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. **Additive Manufacturing**, p. 103270, 2022.

FERRARIS, Chiara F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. **Journal of research of the national institute of standards and technology**, v. 104, n. 5, p. 461, 1999.

FIGUEIREDO, Stefan Chaves; ÇOPUROĞLU, Oğuzhan; SCHLANGEN, Erik. Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 818-840, 2019.

FLATT, Robert J.; WANGLER, Timothy. On sustainability and digital fabrication with concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 106837, 2022.

FLORÊNCIO, E. Q. **A impressão 3D em concreto e seu impacto na produção da arquitetura: o futuro da construção civil?**. 157p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2019.

GELARDI, G. *et al.* Chemistry of chemical admixtures. In: **Science and technology of concrete admixtures**. Woodhead Publishing, 2016. p. 149-218.

GERSHENFELD, Neil. How to make almost anything: The digital fabrication revolution. **Foreign Aff.**, v. 91, p. 43, 2012.

GIERGICZNY, Zbigniew. Fly ash and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105826, 2019.

HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. Dosagem dos concretos de cimento Portland. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 439-471, 2005.

HERMANN, A. *et al.* Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 9, p. 48-65, 2016.

JIAO, Dengwu *et al.* Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and concrete composites**, v. 83, p. 146-159, 2017.

JUENGER, Maria CG; SNELLINGS, Ruben; BERNAL, Susan A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257-273, 2019.

KASEMAN, Keith; GRASER, Konrad. Digital fabrication in the construction sector. In: **Construction 4.0**. Routledge, 2020. p. 188-208.

KAUPPILA, Ille. 3D Concrete Printing – The Ultimate Guide. **All3dp**, 2023. Disponível em: < <https://all3dp.com/1/3d-concrete-printing-guide/#:~:text=3D%20Printable%20Concrete%20Materials,-The%20WASP%20BigDelta&text=Most%20often%2C%203D%20printable%20concrete,are%20more%20like%20a%20mortar>>. Acesso 20 de out. de 2023

KAZEMIAN, Ali *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639-647, 2017.

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.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. **Automation in construction**, v. 13, n. 1, p. 5-19, 2004.

KHOSHNEVIS, Behrokh; DUTTON, Rosanne. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. **Materials Technology**, v. 13, n. 2, p. 53-56, 1998.

KOLAREVIC, Branko. **Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age**. 2001.

KRENZER, Knut *et al.* Simulation of 3D Concrete Printing Using Discrete Element Method. In: **Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 161-166.

KRUGER, Jacques *et al.* 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, p. 107660, 2020.

LACHMAYER, Lukas *et al.* Process Control for Additive Manufacturing of Concrete Components. In: **Third RILEM International Conference on Concrete and Digital**

**Fabrication: Digital Concrete 2022.** Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 351-356.

LE, Thanh T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and structures**, v. 45, n. 8, p. 1221-1232, 2012.

LEAKE, James M.; BORGERSON, Jacob L. Manual de desenho técnico para engenharia: Desenho, modelagem e visualização. **Rio de Janeiro: LTC Editora**, 2015.

LEE, Hojae *et al.* Evaluation of the mechanical properties of a 3D-printed mortar. **Materials**, v. 12, n. 24, p. 4104, 2019.

LEVY, Yair; ELLIS, Timothy J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science**, v. 9, 2006.

LIU, Junli *et al.* Additive manufacturing of sustainable construction materials and form-finding structures: a review on recent progresses. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 9, n. 1, p. 12-34, 2022.

LOWKE, Dirk *et al.* Particle-bed 3D printing in concrete construction—possibilities and challenges. **Cement and concrete research**, v. 112, p. 50-65, 2018.

LU, Bing *et al.* Study of MgO-activated slag as a cementless material for sustainable spray-based 3D printing. **Journal of cleaner production**, v. 258, p. 120671, 2020.

LYU, Fuyan *et al.* Overview of the development of 3D-Printing concrete: A review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, p. 9822, 2021.

MARCHON, Delphine *et al.* Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 96-110, 2018.

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.

MECHTCHERINE, Viktor *et al.* Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials—production steps, processes, and their underlying physics: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106037, 2020.

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.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestruturas, propriedades e materiais. 2.ed. São Paulo: Editora Nicole Pagan Hasparyk, Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2014.

NERELLA, V. N. *et al.* Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 260-270, 2019.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 9, p. 1481-1486, 2003.

PANDA, Biranchi *et al.* Use of magnesium-silicate-hydrate (MSH) cement mixes in 3D printing applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 117, p. 103901, 2021.

PANDA, Biranchi; LIM, Jian Hui; TAN, Ming Jen. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. **Composites Part B: Engineering**, v. 165, p. 563-571, 2019.

PANDA, Biranchi; TAN, Ming Jen. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. **Ceramics International**, v. 44, n. 9, p. 10258-10265, 2018.

PANDA, Biranchi; TAN, Ming Jen. Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application. **Materials Letters**, v. 237, p. 348-351, 2019.

PAUL, Suvash Chandra *et al.* Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 18, p. 311-319, 2018.

PERROT, Arnaud; RANGEARD, Damien; PIERRE, Alexandre. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. **Materials and Structures**, v. 49, p. 1213-1220, 2016.

PORTAL DO CONCRETO. Aditivos para concreto. Disponível em: <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/aditivo.html>. Acesso em: 06 jul. 2022.

POWER2BUILD. Africa's first 3D printed house is Angolan. Disponível em: <https://power2build.co.ao/en/news/view/africas-first-3d-printed-house-is-angolan>. Acesso em: 10 de mar. de 2024.

REHMAN, Atta Ur; KIM, Jung-Hoon. 3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 3800, 2021.

REITER, Lex *et al.* Setting on demand for digital concrete—Principles, measurements, chemistry, validation. **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106047, 2020.

RIBEIRO, C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. *Materiais de construção civil*. 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

RILEM. DFC (Digital Fabrication with Cement-Based Materials). Disponível em: <https://www.rilem.net/groupe/276-dfc-digital-fabrication-with-cement-based-materials-351/page/presentation>. Acesso em: 2 mai. 2023.

ROUSSEL, Nicolas. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. **Cement and concrete research**, v. 36, n. 10, p. 1797-1806, 2006.

ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 76-85, 2018.

SCHRÖFL, Christof; NERELLA, Venkatesh Naidu; MECHTCHERINE, Viktor. Capillary water intake by 3D-printed concrete visualised and quantified by neutron radiography. In: **First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication–Digital Concrete 2018**. Springer International Publishing, 2019. p. 217-224.

SIKA. 3D Concrete Printing. Disponível em: <<https://www.sika.com/en/knowledge-hub/3d-concrete-printin>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SIKORA, Pawel *et al.* The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122574, 2021.

TAYLOR, H. J. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. Londres: Academic Press, 1997.

VALLURUPALLI, Kavya; FARZADNIA, Nima; KHAYAT, Kamal H. Effect of flow behavior and process-induced variations on shape stability of 3D printed elements–A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, p. 103952, 2021.

WANG, Bolin *et al.* Printable and Mechanical Performance of 3D Printed Concrete Employing Multiple Industrial Wastes. **Buildings**, v. 12, n. 3, p. 374, 2022.

WANGLER, Timothy *et al.* Digital concrete: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 123, p. 105780, 2019.

WANGLER, Timothy *et al.* Printable Cement-Based Materials: Fresh Properties Measurements and Control. **Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC**, p. 99-136, 2022.

WANGLER, Timothy. Digital concrete processing: A review. In: **1st International Conference on 3D Construction Printing (3DCP 2018)**. 2018.

WANGLER, Timothy; FLATT, Robert J. (Ed.). **First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication–Digital Concrete 2018**. Springer, 2018.

WILIŃSKA, Iwona; PACEWSKA, Barbara. Influence of selected activating methods on hydration processes of mixtures containing high and very high amount of fly ash: a review. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 133, p. 823-843, 2018.

XU, Jie *et al.* Volume-forming 3D concrete printing using a variable-size square nozzle. **Automation in construction**, v. 104, p. 95-106, 2019.

YAO, Zhi Tong *et al.* A comprehensive review on the applications of coal fly ash. **Earth-science reviews**, v. 141, p. 105-121, 2015.

YU, Shiwei; DU, Hongjian; SANJAYAN, Jay. Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder. **Cement and Concrete Research**, v. 136, p. 106169, 2020.

YUAN, Qiang *et al.* Effect of mineral admixtures on the structural build-up of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 117-126, 2018.

ZHANG, Chao *et al.* Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104155, 2021.

ZHANG, Yu *et al.* Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 278-285, 2019.