

CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS PARA ARGAMASSA 3D: UMA REVISÃO

Raimara Araújo Lima (PUC-GO) E-mail: raimara.araujo1@gmail.com
Epaminondas Luiz Ferreira Jr (PUC-GO) E-mail: epaminondas@pucgoias.edu.br
Renata Araújo Lima (Faculdade Pitágoras) E-mail: renata.araujolima@hotmail.com
Marcos Lajovic Carneiro (PUC-GO) E-mail: mcarneiro@pucgoias.edu.br

Resumo: A manufatura aditiva tornou-se uma das tecnologia mais populares, por se tratar de uma inovação que imprime objetos tridimensionais do começo ao fim. Essa tecnologia também pode ser aplicada na construção civil por meio do método de extrusão de concreto/argamassa. Estudos sobre a aplicação da impressora 3D na construção têm crescido muito nos últimos anos devido as vantagens que o sistema proporciona, como: redução de custos, versatilidade, mínimo desperdício e inexistência de fôrmas. Entretanto, a aplicação dessa inovação apresenta alguns desafios, entre eles está a produção de uma argamassa que atenda parâmetros particulares para a construção digital. Em virtude da peculiaridade da argamassa impressa, este trabalho propõe apresentar uma revisão bibliográfica do tema nos últimos 5 anos, com o objetivo de identificar parâmetros primordiais para garantir a impressão da massa, além de, verificar os critérios específicos na composição, granulometria, no desempenho reológico e trabalhabilidade para que uma argamassa seja considerada aceitável para impressão 3D e sua metodologia de desenvolvimento. Conclui-se que características na preparação tais como, diferentes formas granulométricas, diferentes composições, assim como um alto teor de aditivos químicos podem interferir no desempenho da massa, desta forma é primordial a realização dos ensaios reológicos antes da impressão, para obter uma mistura de qualidade, estabilidade estrutural e que assegure uma boa construção digital.

Palavras-chave: Reologia da argamassa impressa, fluidez da argamassa 3D, composição da argamassa 3D.

RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS FOR 3D MORTAR: A REVIEW

Abstract: Additive manufacturing has become one of the most popular technologies, as it is an innovation that prints three-dimensional objects from beginning to end. This technology can also be applied in civil construction through the concrete/mortar extrusion method. Studies on the application of the 3D printer in construction have grown a lot in recent years due to the advantages that the system provides, such as: cost reduction, versatility, minimal waste and lack of forms. However, the application of this innovation presents some challenges, among them is the production of a mortar that meets particular parameters for digital construction. Due to the peculiarity of the printed mortar, this work proposes to present a bibliographic review of the subject in the last 5 years, with the objective of identifying primordial parameters to guarantee the printing of the mass, in addition to verifying the specific criteria in the composition, granulometry, in the performance rheological and workability for a mortar to be considered acceptable for 3D printing and its development methodology. It is concluded that characteristics in the preparation such as different granulometric shapes, different compositions, as well as a high content of chemical additives can interfere with the performance of the mass, in this way it is essential to carry out rheological tests before printing, to obtain a mixture of quality, structural stability and ensuring good digital construction.

Keywords: Printed mortar rheology, 3D mortar flowability, 3D mortar composition.

1. Introdução

A tecnologia da Manufatura Aditiva (MA) teve início na década de 1980 com o objetivo de produzir peças e modelos prototípicos em uma só etapa sem interrupções no processo construtivo. Uma de suas vantagens é a capacidade de criar qualquer forma projetada, por meio de um procedimento automatizado que imprime objetos tridimensionais

camada por camada, controlado por um modelo computacional (CAD). Essa inovação dispôs de um aumento excepcional nos últimos anos em função da sua versatilidade, rápida fabricação e baixo custo. Devida a sua grande gama de aplicação, vários estudos estão sendo realizados na aplicação dessa tecnologia na construção civil (WOLFS et al., 2018).

Atualmente já existe muitos produtos e processos resultantes do avanço de tecnologias na construção, auxiliando no desenvolvimento das edificações, e que, com o auxílio da automação tem proporcionalizado, agilidade, redução de desperdício, otimização, maior produtividade e redução de custos (RAHUL et al., 2019b). Particularmente na indústria da construção civil, a MA pode ser aplicada através do método da fabricação digital, por meio da impressão 3D de argamassa/concreto. Nesse processo, a argamassa é transportada em uma mangueira mediante um sistema de bombeamento até o bico da extrusora, onde então é impressa em “filamentos” contínuos (ZHANG et al., 2019).

Como o método de impressão de argamassa está em desenvolvimento, existem alguns desafios sobre sua utilização quanto a mistura da massa cimentícia, o atendimento do requisito das propriedades reológicas da argamassa, a trabalhabilidade da massa, bem como também os reforços utilizados durante ou depois da impressão (WOLFS et al., 2018). Zhang et al., (2019) afirmam que o principal desafio da impressão de argamassa é adotar uma mistura no qual tenha uma boa fluidez para que facilite o bombeamento e que seja capaz de manter sua forma depois de impressa, assim como ter a capacidade de suportar as camadas subsequentes sem colapso ou grandes deformações.

Neste contexto, o objetivo desse artigo é de verificar critérios no desempenho fresco da argamassa como: composição, granulometria, desempenho reológico e trabalhabilidade, além de, apresentar um conjunto de testes reológicos estudados e analisados na literatura, assim como mostrar a influência de adição de aditivos químicos usados para desenvolver e imprimir a massa cimentícia. A seção de ensaios para argamassa no estado fresco visa quantificar o padrão reológico na argamassa impressa, e que pode ser útil para os pesquisadores ao verificar as propriedades da mistura e então adaptar a reologia de acordo com os requisitos de extrusão para que a argamassa seja considerada aceitável para impressão 3D.

O artigo é organizado em 7 seções, onde a seção 2 apresenta a metodologia da revisão bibliográfica, a seção 3 apresenta os estágios do processo de impressão. Em seguida, na seção 4, discute as particularidades da argamassa 3D, no que tange as necessidades reológicas na mistura, agregados, composições e aditivos químicos para satisfazer o uso na impressão. Na seção 5 são tratados os ensaios no estado fresco da argamassa 3D encontrados nas publicações científicas. E finalmente a seção 6 apresenta as conclusões do trabalho e finalmente a seção 7 encerra com os agradecimentos.

2. Metodologia

Para ilustrar e identificar critérios da reologia e produção da argamassa para impressora 3D foi realizada uma análise das publicações disponíveis, em congressos e periódicos no período de 2017 a 2022. Esta pesquisa empregou como fonte, duas bases de dados, o Periódicos Capes e o Google Scholar. Foram buscados artigos com ênfase em ensaios experimentais de maior relevância na área, para isso utilizou-se os seguintes conjuntos de palavras-chaves para busca: Reologia da argamassa impressa, fluidez da argamassa 3D, composição da argamassa 3D. A Figura 1 ilustra o número de publicações distribuídas de cada grupo de palavras-chaves conforme a base de dados.

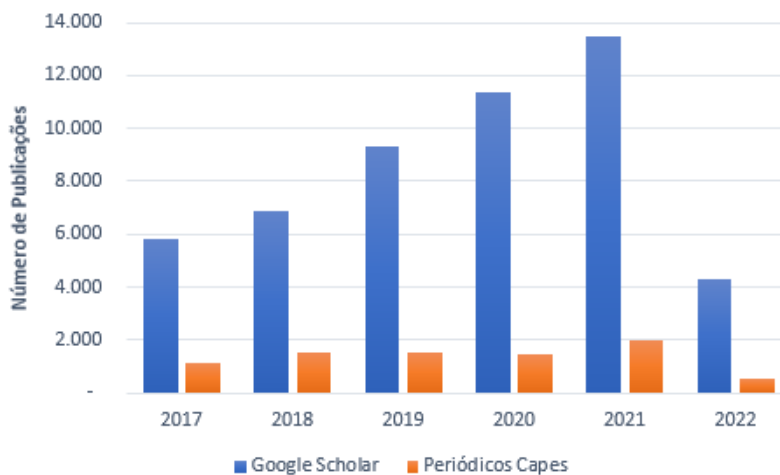


Figura 1 – Distribuição cronológica das publicações
Fonte: Próprio Autor

A Figura 1 aponta que o Google Scholar abrange mais artigos relacionados às palavras-chave em comparação ao Periódicos Capes. Ambas as bases de dados tiveram um acréscimo de publicações em 2021, sendo o termo de maior publicação nas fontes de busca “composição da argamassa 3D”. Entre os trabalhos encontrados, foram coletados 300 artigos mediante as palavras-chave. Dentre esses, foram selecionados os periódicos com maior associação ao tema, averiguando títulos e resumos (113 artigos). Posteriormente, foi realizada uma segunda análise mais detalhada com referência ao conteúdo, e assim foram descartados 71 trabalhos, restando 42, os quais foram utilizados para a produção dessa revisão.

3. Processo de impressão

O método de fabricação aditiva de argamassa mais popular na construção civil até o momento é a impressão baseada em extrusão, na qual o material cimentício é extrudado em um filamento contínuo por meio de um bocal em um sistema de direções cartesianas, cujos movimentos são controlados por computador (REHMAN & KIM, 2021). Nesta revisão, uma estrutura da mistura da massa até a construção do objeto é enfatizada, conforme ilustrado na Figura 2.

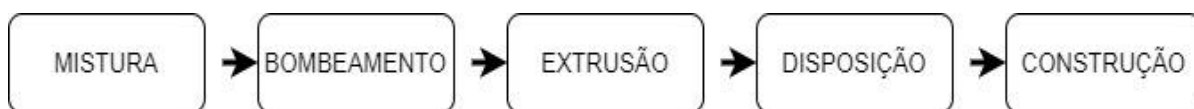


Figura 2 – Esquema do processo de impressão
Fonte: Próprio Autor

Nota-se que o seguimento de um processo de impressão consiste primeiramente em desenvolver uma mistura cimentícia e, posteriormente, colocá-la em um reservatório no qual será bombeada por meio de uma mangueira até o bico da extrusora. Em seguida, as camadas são extrudadas e depositadas uma após a outra, até finalizar a construção do objeto (REHMAN & KIM, 2021), como mostrado na Figura 3.

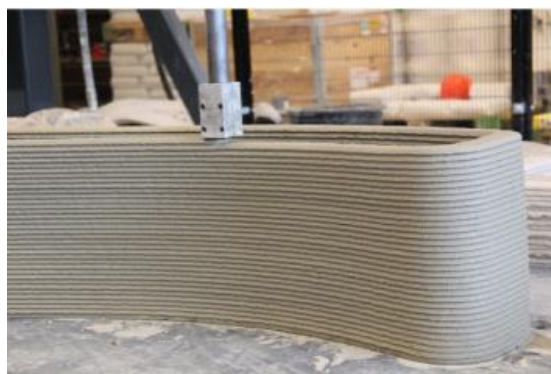


Figura 3 – Ilustração do bico da extrusora imprimindo argamassa
Fonte: Wolfs et al., (2019)

Nessa figura, observa-se o material sendo impresso pelo método de extrusão, normalmente montado em um pórtico ou braço robótico e imprimindo camadas sem utilização de qualquer fôrma. No entanto, as etapas do processo de impressão exigem características e parâmetros especiais da massa imprimível que atendam às necessidades particulares de impressão, e essas particularidades são discutidas nas sessões a seguir.

4. Particularidades da argamassa 3D

O método de construção digital difere significativamente dos métodos tradicionais, devido a importância das características reológicas da pasta, ou seja, do controle da viscosidade plástica e tensão de escoamento durante todo o período de impressão. Ademais, a ausência de fôrmas no processo requer a produção de um material que garanta a estabilidade estrutural durante a construção (PAUL et al., 2017).

Além desses dois quesitos: viscosidade plástica e tensão de escoamento, a fluidez adequada também é um parâmetro importante para garantir a impressão da argamassa, visto que essa deve ser fluida o suficiente para ser extrudada, mas em contrapartida, não pode ser fluida demais para que, ao ser impressa, consiga manter sua forma e suportar as demais camadas posteriores que se assentarão sobre ela (RAHUL et al., 2019a). A análise desses três parâmetros é obtida por meio da realização de ensaios preliminares no qual determinará as propriedades reológicas e mecânicas da argamassa a ser impressa, e verificará se a mistura preparada será capaz de ser bombeada e manter sua forma depois de extrudada (RAHUL et al., 2019b).

4.1. Reologia

Para uma impressão de qualidade é importante analisar as propriedades da massa no estado fresco, especialmente as características da reologia da argamassa, logo que, irão influenciar na capacidade de bombeamento e extrusão, bem como a capacidade de construção e adesão da camadas inferiores (BUSWELL et al., 2018). Jayathilakage et al., (2019) afirmam que os parâmetros mais importantes na reologia da massa cimentícia são a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, logo que, parâmetros específicos para impressão 3D como, a trabalhabilidade, extrusão da argamassa e capacidade de construção, são dependentes desses dois parâmetros reológicos.

Chen et al., (2021) definem a tensão de escoamento como a tensão de cisalhamento mínima necessária a ser aplicada na massa fresca para iniciar o escoamento, enquanto a viscosidade plástica é a resistência da massa ao escoamento após ser iniciado o escoamento.

Uma argamassa para ser impressa deve possuir baixo teor de viscosidade para permitir o fluxo durante a extrusão e um limite alto de elasticidade para evitar a deformação após a

deposição das camadas, bem como possuir alta tensões de rendimento para favorecer o bombeamento, além de possuir a capacidade de enrijecer rapidamente para suportar o peso das demais camadas subsequentes (WENG et al., 2018). Para atender tais requisitos no estado fresco é necessário a adição de aditivos químicos como aceleradores de pega, modificadores de viscosidade, dentre outros, que serão abordados na seção 4.4.

4.2. Composição

As composições usadas para a argamassa impressa tem sido um grande desafio para os pesquisadores para atender os parâmetros necessários para impressão como: fluidez, retração, tempo de pega, extrusão, ligação entre camadas, capacidade de construção, disposição camada por camada, bem como as propriedades mecânicas, e de encontrar um equilíbrio entre a capacidade de construção e a fluidez (SEPASGOZAR et al., 2020). Várias misturas têm sido desenvolvidas para compreender o comportamento dos materiais e com isso chegar à obtenção de uma massa apropriada para impressão. (ZOU et al., 2021).

Chen et al., (2019) verificaram o efeito do calcário e argila calcinada na extrudabilidade e reologia do concreto 3D, e concluíram que a adição desses, acelera consideravelmente a hidratação inicial do cimento, o que leva à um melhor desempenho mecânico nas fases iniciais. Zang et al., (2019) demonstraram que, ao substituir 2% de ligantes por sílica ativa, aumenta a construtibilidade da massa cimentícia em 117% em relação a massa controle. Isso se explica porque a sílica ativa contribui com um bom efeito na tixotropia e reologia, como afirmam também os autores Guo et al., (2020). Esses mesmos autores constataram que o pó de escória pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas do material. Contudo, o aumento ininterrupto do teor do pó, afeta as propriedades reológicas da argamassa e conseqüentemente aumenta o tempo de pega.

A pasta cimentícia não deve dispor de alto teor de areia, pois pode levar a segregação durante a extrusão e bloqueio da mangueira (REHMAN & KIM, 2021). Em contrapartida, Roussel (2018) afirmam que o acréscimo excessivo de areia na mistura, pode ocasionar o aumento das ligações físico-químicas entre as partículas cimentícias e dessa forma apresentar valores maiores de tensão de escoamento.

Atualmente, uma composição bastante utilizada pelos pesquisadores são os nanomateriais, com o intuito de modificar o comportamento da argamassa no estado fresco e facilitar a impressão (HONGWEI & LI, 2021). Como citado por Chougan et al., (2020), a adição de partículas de nano-atapulgit (argila) ocasiona um aumento significativo na tensão de escoamento, além de melhorar a capacidade de construção das camadas. Kruger et al., (2019) por sua vez, concluíram que 1% de nano-sílica é a dosagem ideal para melhorar a tixotropia da massa cimentícia.

Os nanomateriais como nanoargila e nanossílica têm demonstrado pertinentes para aprimorar a tensão de escoamento estática, funcionando como modificadores reológicos. Dessa forma, a bentonita (nanopartículas de argila montmorilonita) contribui significativamente com o aumento da tensão de escoamento e reduz a fluidez (VARELA et al., 2021). Segundo Soltan & Li (2018), a substituição da areia por nano-sílica na pasta cimentícia pode manter a fluidez, e de outra forma, a adição de nano-argila diminui o tempo de pega e a fluidez, contudo, melhorou significativamente a capacidade de construção.

Deve-se também atentar para o teor de água na mistura. A baixa proporção de água torna o material seco, com baixa viscosidade, e alta tensões de rendimento e conseqüentemente apresenta uma baixa aderência entre as camadas (ROUSSEL, 2018).

Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta algumas proporções e componentes da argamassa imprimível encontrados na literatura.

Tabela 1 – Proporções de componentes da massa cimentícia imprimível em 3D

Referência	Aglomerante					Cimento (Kg/m ³)	Nano- materiais (%)	Água (Kg/m ³)
	Cinza volante (Kg/m ³)	Sílica ativa (Kg/m ³)	Pó de calcário (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Escória de alto forno (Kg/m ³)			
Figueiredo et al., (2019)	496,8- 583,5	–	95,5- 888,9	94,4- 294,4	524,7- 622,2	224,9- 493,7	–	327,4- 449,7
Lee et al., (2019)	166	83	–	–	–	580	–	232
Joh et al., (2020)	172	79	–	1154	–	576	–	240
Zhang et al., (2021)	–	–	97	1258	–	600	–	270
Kazemian et al., (2021)	–	–	–	1379	–	600	0,3	244- 274

Fonte: Próprio Autor (2022)

Pode-se observar na Tabela 1 que a maioria dos autores optam pela adição de cinza volante na mistura, visto que essa adição melhora significativamente a propriedade de fluidez (RAHUL et al., 2019a), e apenas os autores Kazemian & Khoshnevis (2021) optam pelo uso de nanomaterial (nano-argila).

4.3. Granulometria

O ajuste granulométrico na composição da mistura também tem sido desafiador para os pesquisadores, devido à grande variedade de dimensões do bico de extrusora.

Segundo Liu et al., (2019), é fundamental caracterizar os agregados, determinando as suas dimensões máximas, visto que eles contribuem fortemente na bombeabilidade, trabalhabilidade, porosidade, desempenho mecânico, retração e durabilidade da edificação. Zareiyan & Khoshnevis (2017), afirmam que quanto menor o tamanho dos agregados na mistura, maior será a resistência a compressão. Panda et al., (2019), constataram em seus experimentos um aumento na tensão de escoamento e na construtibilidade das camadas, devido a granulometria mais fina da sílica ativa adicionada na mistura.

Segundo Yuan et al. (2019) e Jayathilakage et al., (2019), no que tange a granulometria, não é apropriado conter em sua mistura agregados graúdo, ou seja, dimensões acima de 4,75 mm, em razão de aumentar a distância entre as partículas de cimento, e por consequência provocar a redução da tensão de escoamento, o que levará a segregação da pasta na mangueira pelo qual é transportada e conseqüentemente pode ocasionar o bloqueio do bico da impressora. A Tabela 2 expõe as faixas de agregados e as

respectivas dimensões do bico mais utilizados na literatura.

Tabela 2 – Variações granulométrica

Referência	Tamanho do Agregado (mm)	Tamanho do Bico (mm)
Figueiredo et al., (2019)	0,5	40x10
Meurer & Classen, (2021)	4	Ø 45
Lee et al., (2019)	0,16- 0,2	Ø 25
Joh et al., (2020)	0,16- 0,2	Ø 40
Shakor et al., (2019)	0,3	Ø14, Ø20 e 35x10
Zahabizadeh et al., (2021)	1	60x12
Nerella t al., (2019)	0,06- 2	30x18,72
Ashraf et al., (2021)	1	Ø 24,5
Chen et al., (2021)	4,75- 20	55x55
Chen et al., (2020)	2	40x13,5

Fonte: Próprio Autor (2022)

Nota-se na Tabela 2 que há uma variabilidade granulométrica utilizada nas composições, em virtude da forma do bico da extrusora ser variável como: retangular, quadrada, circular ou ovalar (BUSWELL et al., 2018). Percebe-se que grande parte dos autores priorizam a utilização dos agregados miúdos, em função de obter um fácil escoamento sem que haja obstrução do bocal da extrusora (LEE et al., 2019). Dentre as dimensões listadas, apenas os autores Chen et al., (2021) utilizaram agregado graúdo, no qual foi empregado uma impressora 3D de grande porte para impressão de concreto, especificamente para construção de grande escala.

4.4. Aditivos químicos

Os aditivos químicos têm um efeito positivo para a construção digital, em consequência do seu efeito de dispersão das partículas do ligante, e dessa forma, reduz a tensão de escoamento e viscosidade plástica da argamassa (REHMAN & KIM, 2021). A adição de superplastificantes como naftaleno sulfonato formaldeído e policarboxilato éster, diminui o comportamento tixotrópico e a tensão de escoamento dinâmica do concreto, em virtude da dispersão criada por consequência da absorção sobre as partículas do ligante (QIAN & DE SCHUTTER, 2018).

Nesse mesmo sentido, pesquisadores também observaram que os agentes modificadores de viscosidade aumentam a viscosidade plástica, a tensão de escoamento e a capacidade de extrusão. No entanto, uma dosagem excessiva desse aditivo dificulta a hidratação da pasta cimentícia (CHEN et al., 2019), alterando significativamente o tempo de pega e a resistência inicial da argamassa.

Além dos superplastificantes e modificadores de viscosidade, os aceleradores de pega têm sido bastantes utilizados nas composições da argamassa 3D, a pretexto de ocasionar

um rápido aumento inicial da tensão de escoamento, no qual contribui com o processo de extrusão, assim como, na habilidade retardar o efeito de alguns aditivos, e desta forma, acelerando a hidratação do cimento. Ainda nesse contexto, aditivos redutores de água também são utilizados para regular as propriedades reológicas da massa de cimento (VARELA et al., 2021). A tabela 3 apresenta os tipos e teores de aditivos utilizados por alguns autores em suas pesquisas.

Tabela 3 – Proporções de aditivos químicos

Referência	Modificador de Viscosidade (Kg/m ³)	Acelerador de pega (ml)	Retardador de pega (ml)	Superplastificante
Figueiredo et al., (2019)	1,7- 7	–	–	6,6- 26,2 g
Lee et al., (2019)	1,66	–	–	8,29 kg/m ³
Shakor et al., (2019)	–	2,5 e 3,33	2 e 2,66	2,5 e 3,33 ml
Joh et al., (2020)	1,65	–	–	8,27 kg/m ³
Shakor et al., (2020)	–	33,75	27	25,31- 30 ml

Fonte: Próprio Autor (2022)

Observa-se que os aditivos superplastificantes foram empregados por todos os autores listados na Tabela 3, o que indica que esses aditivos químicos têm contribuído positivamente para a pasta digital. Por conseguinte, os agentes modificadores de viscosidade também são aditivos que favorecem a mistura pois, dispõem de particularidades que influenciam na capacidade de extrusão.

5. Ensaios para argamassa no estado fresco

Segundo Nerella et al., (2019), atualmente não existem padrões estabelecidos para realizar testes reológicos e mecânicos, nem mesmo diretrizes para estabelecer um traço apropriado ao uso de argamassa na construção digital, e atualmente vários métodos e equipamentos têm sido utilizados para avaliar a reologia e a fluidez da argamassa (VARELA et al., 2021). A viscosidade plástica e a tensão de escoamento podem ser examinadas utilizando equipamentos como os reômetros, e em alguns estudos a viscosidade também foi avaliada por meio de aferições do fluxo em funis em V (ROUSSEL et al., 2018). Para a análise da fluidez alguns autores empregam o método de teste de abatimento ou mesa de fluxo (Quadro 1). Contudo, o teste de mesa de fluxo é mais priorizado devido aos resultados destes se associarem bem com a tensão de escoamento e, por conseguinte, podem indicar se um concreto ou argamassa é capaz de ser extrudada ou não (MECHTCHERINE et al., 2018). O Quadro 1 ilustra os métodos e equipamentos comumente mais utilizados na literatura.

Quadro 1 – Equipamentos de testes

Ensaio	Referência	Equipamento
Reologia	Moeini et al., (2020)	Reômetro Anton Paar MCR 302
	Yuan et al., (2019)	Reômetro Rotacional
	Panda et al., (2017)	Viskomat XL
	Varela et al., (2021)	Reômetro modular
	Weng et al., (2018)	Viskomat XL
	Joh et al., (2020)	Reômetro (Brookfield DV-III)
	Ma et al., (2018)	Funil em V
Fluidez	Lee et al., (2019)	Mini cone
	Ma et al., (2018)	Mesa de fluxo e mini cone
	Ji et al., (2019)	Mini cone
	Rahul et al., (2019a)	Mesa de fluxo
	Joh et al., (2020)	Mesa de fluxo
	Ashrafi et al., (2021)	Mesa de fluxo

Fonte: Próprio Autor (2022)

Observa-se no Quadro 1 que, os autores investigaram o comportamento reológico da argamassa utilizando reômetros de diversos tipos, e apenas o autor Ma et al., (2018) optou por utilizar o funil em V para avaliar a viscosidade, realizando o ensaio teste do funil. A fluidez por sua vez, investigada com o ensaio de abatimento, utilizou-se o aparelho de teste mini cone, e já pelo método de consistência, empregando o equipamento mesa de fluxo. Após uma investigação criteriosa em ensaios especificamente para parametrizar a reologia e a fluidez, a Tabela 4 apresenta os resultados desses testes, contendo diferentes tipos de aditivos.

Tabela 4 – Resultados dos testes no estado fresco

Aditivos	Referências	Viscosidade	Tensão de	Fluidez
		Plástica (Pa.s)	Escoamento (Pa)	
Redutor de água	Lee et al., (2019)	21	420	145
	Rahul et al., (2019a)	-	1.500- 2.500	-
	Joh et al., (2020)	19,6	413	148
	Zhang et al., (2019)	3,8- 4,5	178,5- 359,8	192,5- 269
Ativador alcalino	Guo et al., (2020)	5,50- 8,80	6,76- 106,97	-
Pó de calcário	Ashrafi et al., (2021)	-	-	232,5

Fonte: Próprio Autor (2022)

Observa-se que os resultados de testes reológicos e fluidez contendo o mesmo tipo de aditivos na mistura obtiveram valores aproximados. Os resultados obtidos por Rahul et al., (2019a), são valores de maior tensão de escoamento do que os demais, isso consiste em um melhor desempenho da massa ao ser bombeada até o bico, assim como, atende aos requisitos de capacidade de construção. De outra forma os autores Zhang et al., (2019), alcançaram os menores valores de viscosidade plástica, para permitir o fluxo durante a impressão. Zhang et al., (2019) e Ashrafi et al., (2021), tiveram o maior diâmetro de espalhamento no teste de fluidez, e isso testifica uma massa fluida, de acordo com Alonso et al., (2017) quando estes declararam que valores maiores que 200 mm indica uma pasta de consistência fluida.

6. Conclusão

A construção digital tem sido um tema de grande interesse pelos pesquisadores, em razão de ser um método que conta com diversas vantagens no que se refere a edificação convencional, como rapidez de execução, não utilização de fôrmas e redução de custo. No entanto, a sua aplicação ainda carece de muitos estudos e desenvolvimento, seja pelas particularidades dos materiais, ou pelas características de bombeamento e extrusão.

Essa pesquisa mostrou que granulometrias menores melhoram a resistência à compressão no estágio fresco e mecânico, além de facilitar o processo de bombeamento, e que partículas graúdas aumentam a probabilidade de vazios na argamassa e consequentemente acarreta uma qualidade de impressão ruim.

Diversos autores demonstraram que as adições minerais como a cinza volante e sílica ativa, bem como, a adição de nanomateriais, além dos aditivos químicos são essenciais para melhorar a reologia e trabalhabilidade da mistura, tornando-a apropriada para impressão.

Considerando as peculiaridades da argamassa utilizada na MA, no que se refere a reologia e fluidez, que são considerados os parâmetros principais que influenciam no processo de impressão, é essencial realizar ensaios preliminares desses dois parâmetros (reologia e fluidez), para assegurar que a mistura esteja adequada ou não para ser utilizada na impressora 3D (SHAKOR et al., 2019).

Perante o exposto, essa revisão pode ser usada como material orientativo na fabricação de argamassa impressa, e por conseguinte comparar os resultados dos testes futuros, com resultados alcançados pelos pesquisadores.

6. Agradecimentos

A equipe de pesquisa agradece o financiamento pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- ALONSO, M. M. et al. *Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour*. Construction and Building Materials, Vol. 145, p. 576-587, 2017.
- ASHRAFI, N. et al. *Experimental prediction of material deformation in large-scale additive manufacturing of concrete*. Additive Manufacturing, Vol. 37, p. 101656, 2021.
- BUSWELL, R. A. et al. *3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research*. Cement and Concrete Research, Vol. 112, p. 37-49, 2018.
- CHEN, Y. 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, Vol. 12,

p. 1374, 2019.

CHEN, Y. et al. *Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study.* Construction and Building Materials, Vol. 262, p. 120094, 2020.

CHEN, Y. et al. *Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance.* Construction and Building Materials, Vol. 296, p. 123624, 2021.

CHOUGAN, M. et al. *Investigation of additive incorporation rheological, microstructural and mechanical properties of 3D printable alkali-activated materials.* Materials & Design, Vol. 202, 2021.

FIGUEIREDO, S. C. et al. *An approach to develop printable strain hardening cementitious composites.* Materials & Design, Vol. 169, p. 107651, 2019.

GUO, X.; YANG, J.; XIONG, G. *Influence of supplementary cementitious materials on rheological properties of 3D printed fly ash based geopolymer.* Cement and Concrete Composites, Vol. 114, p. 103820, 2020.

HONGWEI, C.; LI, X. *An overview on the rheology, mechanical properties, durability, 3D printing, and microstructural performance of nanomaterials in cementitious composites.* Materials, Vol. 14, p. 2950, 2021.

JAYATHILAKAGE, R.; SANJAYAN, J.; RAJEEV, P. *Direct shear test for the assessment of rheological parameters of concrete for 3D printing applications.* Materials and Structures, Vol. 52, p. 1-13, 2019.

JL, G. et al. *A 3D Printed ready-mixed concrete power distribution substation: Materials and construction technology.* Materials, Vol. 12, p. 1540, 2019.

JOH, C. et al. *Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete.* Materials, Vol. 13, p. 4919, 2020.

KAZEMIAN, A.; KHOSHNEVIS, B. *Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3D printing.* Construction and Building Materials, Vol. 303, p. 124520, 2021.

KRUGER, J.; ZERANKA, S.; VAN ZIJL, G. *An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete.* Construction and Building Materials, Vol. 224, p. 372-386, 2019.

LEE, H. et al. *Evaluation of the mechanical properties of a 3D-printed mortar.* Materials, Vol. 12, p. 4104, 2019.

LIU, Z. et al. *Mixture Design Approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing.* Construction and Building Materials, Vol. 198, p. 245-255, 2019.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. *Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing.* Construction and building materials, Vol. 162, p. 613-627, 2018.

MECHTCHERINE, V. et al. *3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction—Manufacture, mechanical properties and bond behaviour.* Construction and Building Materials, Vol. 179, p. 125-137, 2018.

MEURER, M.; CLASSEN, M. *Mechanical properties of hardened 3D printed concretes and mortars—Development of a consistent experimental characterization strategy.* Materials, Vol. 14, p. 752, 2021.

MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. *Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing.* Construction and Building Materials, Vol. 257, p. 119551, 2020.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. *Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing.* Construction and Building Materials, Vol. 205, p. 586-601, 2019.

PANDA, B. et al. *Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment.* Journal of cleaner production, Vol. 167, p. 281-288, 2017.

PANDA, B.; TAN, M. J. *Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application.* Materials Letters, Vol. 237, p. 348-351, 2019.

- QIAN, Y.; DE SCHUTTER, G.** *Different effects of NSF and PCE superplasticizer on adsorption, dynamic yield stress and thixotropy of cement pastes.* *Materials*, Vol. 11, p. 695, 2018.
- RAHUL, A. V. et al.** *3D printable concrete: Mixture design and test methods.* *Cement and Concrete Composites*, Vol. 97, p. 13-23, 2019a.
- RAHUL, A. V. et al.** *Mechanical characterization of 3D printable concrete.* *Construction and Building Materials*, Vol. 227, p. 116710, 2019b.
- REHMAN, A. U.; KIM, J.-H.** *3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics.* *Materials*, Vol. 14, p. 3800, 2021.
- ROUSSEL, N.** *Rheological requirements for printable concretes.* *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, p. 76-85, 2018.
- SEPASGOZAR, S. M. E. et al.** *Additive manufacturing applications for industry 4.0: A systematic critical review.* *Buildings*, Vol. 10, p. 231, 2020.
- SHAKOR, P. et al.** *Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar.* *Additive Manufacturing*, Vol. 32, p. 101069, 2020.
- SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G.** *A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar.* *Materials*, Vol. 12, p. 1708, 2019.
- SOLTAN, D. G.; LI, V. C.** *A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing.* *Cement and Concrete Composites*, Vol. 90, p. 1-13, 2018.
- VARELA, H. et al.** *Synergies on rheology and structural build-up of fresh cement pastes with nanoclays, nanosilica and viscosity modifying admixtures.* *Construction and Building Materials*, Vol. 308, p. 12509, 2021.
- WENG, Y. et al.** *Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model.* *Construction and Building Materials*, Vol. 163, p. 600-610, 2018.
- WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M.** *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing.* *Cement and Concrete Research*, Vol. 106, p. 103-116, 2018.
- YUAN, Q. et al.** *A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar.* *Construction and Building Materials*, Vol. 227, p. 116600, 2019.
- ZAHABIZADEH, B. et al.** *Influence of the printing direction and age on the mechanical properties of 3D printed concrete.* *Materials and Structures*, Vol. 54, p. 1-22, 2021.
- ZAREIYAN, B.; KHOSHNEVIS, B.** *Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting-Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness.* *Automation in Construction*, Vol. 81, p. 112-121, 2017.
- ZHANG, Y. et al.** *Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete.* *Construction and Building Materials*, Vol. 201, p. 278-285, 2019.
- ZHANG, Y. et al.** *Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials.* *Materials and Structures*, Vol. 54, p. 1-14, 2021.
- ZOU, S. et al.** *Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand.* *Construction and Building Materials*, Vol. 273, p. 121699, 2021.