



REOLOGIA DA ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Resumo: A impressão 3D tem ganhado espaço na engenharia civil como ferramenta promissora para o desenvolvimento e automação da construção. Entre os benefícios estão a redução de custos e desperdícios, diminuição de riscos de acidentes e maior liberdade arquitetônica. A argamassa, amplamente utilizada na construção, tem sido adaptada à impressão 3D, exigindo propriedades reológicas específicas. Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura nas bases Science Direct, Scopus e Web of Science, visando discutir os aspectos reológicos das argamassas para essa tecnologia. Observou-se que a reologia é fortemente influenciada pela composição do material e impacta diretamente sua extrudabilidade, estabilidade e acabamento. Conclui-se que a manufatura aditiva com argamassas é viável, sendo aprimorada continuamente pelas contribuições científicas.

Palavras-chave: Reologia. Argamassa. Manufatura aditiva. Sistemas de impressão.

1. Introdução

O setor da construção civil se apresenta como agente do desenvolvimento socioeconômico, posição essa decorrente das suas atribuições, capaz de gerar emprego e renda, bem como fortalecer outras estruturas de mercado dependentes. Entre suas atividades destaca-se a produção produtos cimentícios como concretos e argamassas, materiais mais consumidos pela construção, fato que pode ser explicado pelas propriedades oferecidas pela mesma, desde a disponibilidade, usabilidade, custo, entre outras características físicas e mecânicas.

Sendo esses compostos cimentícios os materiais mais predominantes nas construções atuais em suas diferentes abordagens tecnológicas e construtivas, não se observando mudanças bruscas dessa realidade a curto prazo, a automatização e utilização de ferramentas digitais no emprego desse material são projetadas como avanços próximos nas áreas da engenharia civil. Assim como ocorreu nos processos de planejamento e gerenciamento de projetos, com a associação de dispositivos computacionais que ganham o mercado e estão difundidas nas práticas dos profissionais. Além disso, existem diversas motivações que levam a automação da construção tais como, o aumento da complexidade arquitetônica permitida, redução de custos, entre eles as relacionadas ao uso de formas, e do tempo de produção, condições ligadas a segurança dos trabalhadores, além de fatores de sustentabilidade como a diminuição de desperdícios (MECHTCHERINE et al., 2020; SCHUTTER et al., 2018; MECHTCHERINE et al., 2019; WU; WANG; WANG, 2016).

Na perspectiva da automação da construção a manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, vem ganhando espaço e se tornando uma ferramenta intensificadora nos avanços da indústria da construção civil. Essa tecnologia está baseada na junção de materiais para o desenvolvimento de uma estrutura tridimensional a partir de um modelo digital projetado. Sua utilização



vem se consolidando em diversos seguimentos como o campo das artes, aeroespacial, automotivo, biomédicos, entre outros. Essa ampla aplicação é resultado das possibilidades e capacidades que a MA oferece, principalmente ligadas a precisão geométrica e o controle computadorizado de sua execução, respondendo algumas das demandas impostas por esses setores incluindo a engenharia civil (ALBAR et al., 2020; MANIKANDAN et al., 2020; ASPRONE et al., 2018).

Independente da área de aplicação e do método de MA tratado, a construção de um objeto impresso tem sua origem no desenvolvimento de um arquivo gráfico a partir de programas assistidos por computadores (CAD), do inglês *Computer-Aided Design*, armazenado em uma extensão SLT, referência ao termo *Standard Triangle Language*, que é então segmentado em planos bidimensionais utilizados pelos softwares do sistema de impressão para produzir as camadas e a estrutura final. Nesse estágio diferentes processos e misturas são utilizados de acordo com o resultado esperado, sendo capazes de influenciar diretamente nas características e no comportamento do produto (KHAN, 2020; DIGGS-MCGEE et al., 2019; ALBAR et al., 2020).

Uma propriedade importante que deve ser levada em consideração ao se trabalhar com a tecnologia da impressão de materiais, como a argamassa, é a reologia. A mesma está relacionada ao estudo do escoamento dos materiais, sendo possível saber seu comportamento ao longo do fluxo ou quando submetido a determinadas pressões. O conhecimento desses aspectos é importante a fim de que se possa garantir ao material de impressão 3D, adequada capacidade de extrudabilidade, de construção, de estabilidade da forma, de adesão entre as camadas e de resistência mecânica (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020; JAYATHILAKAGE; SANJAYAN; RAJEEV, 2019).

Vários são os fatores que influenciam na reologia das argamassas, dentre esses destacam-se, as características das composições da mistura (teor de água, tipo de agregado, cimento e adição de aditivos) e as condições experimentais que foram realizadas as misturas. A depender do tamanho e a geometria das partículas que constituem a mistura, por exemplo, é possível controlar a viscosidade aparente, facilitando o seu escoamento. Já a quantidade de água tem por finalidade promover as reações de hidratação e facilitar as ligações das partículas de cimento e dos agregados (CARDOSO et al., 2015).

A argamassa, assim como outros materiais constituídos por partículas sólidas em suspensão apresenta um comportamento reológico em que a viscosidade varia com o tempo. Nesse grupo de materiais encontram-se os tixotrópicos que tem sua viscosidade reduzida com o tempo de aplicação da taxa de cisalhamento, voltando a ficar mais viscoso quando esta cessa (CARDOSO et al., 2015; SILVA, 2020).

Segundo Mewis e Wanger (2009), o comportamento de materiais tixotrópicos pode ser entendido com base em sua microestrutura que também depende do histórico de cisalhamento. As partículas desses materiais frequentemente se atraem, mas de uma maneira relativamente fraca. Elas causarão a formação de agregados, ou flocos, que normalmente evoluem para uma rede de partículas



que preenche o espaço, mas como as ligações são fracas, uma força externa pode ocasionar a quebra desses agregados durante o fluxo imposto no material. O resultado é que, durante o fluxo, a rede se decompõe em agregados menores, que diminuem ainda mais quando com o aumento da taxa de cisalhamento. Tal característica reológica, bem como o controle da mesma, através de vários fatores, é imprescindível para que argamassa seja desenvolvida em uma tecnologia de impressão 3D.

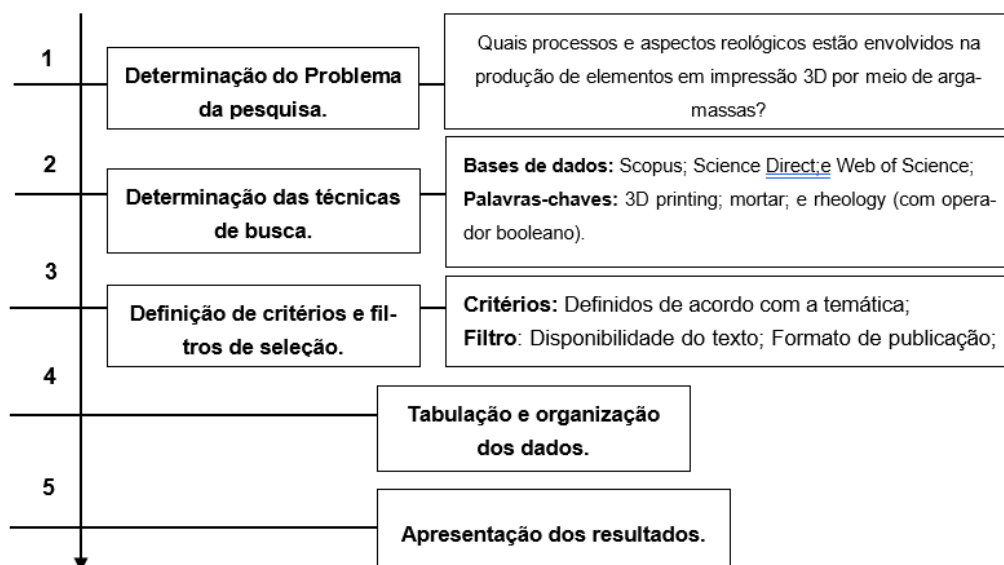
2. Objetivo

O presente estudo busca, a partir de uma revisão sistemática em bases de dados científicos, levantar e discutir as questões que envolve a reologia das argamassas destinadas a tecnologia de impressão 3D, avaliando as principais características delas, bem como identificando a relação de fatores como a composição e os modelos reológicos utilizados com a capacidade de fluência do material.

3. Metodologia

Trata-se de uma revisão sistemática da literatura, um método que auxilia a formular explicações abrangentes do fenômeno observado a partir de diferentes abordagens metodológicas. Para tanto, foi estabelecido um protocolo para o levantamento de pesquisas científicas em bases de dados selecionadas, apresentado na Figura 1. Além disso, como forma de aumentar a qualidade do processo da revisão esses estudos foram organizados e sumarizados com auxílio da ferramenta livre StArt (State of the Art by Systematic Review) do LaPES- UfScar.

Figura 1 - Protocolo para realização da revisão sistemática.



A pesquisa tem como problema norteador o entendimento das questões que envolve a reologia das argamassas destinadas a tecnologia de impressão 3D, voltadas a construção civil, observando sua influência no comportamento dos elementos produzidos e como essas podem ser alteradas na busca de alcançar parâmetros desejados, além de avaliar as metodologias utilizada para quantificar esse parâmetro. Na tentativa de promover um esclarecimento da questão levantada foram selecionadas três bases de dados eletrônicas de literaturas, considerando seu impacto e abrangência no meio científico e na área das engenharias, sendo essas: ScienceDirect, Scopus e Web of Science.

Inicialmente a busca por estudos foi restringida as bases selecionadas, no entanto uma posterior inserção de trabalhos foi realizada por meio do método snowball. No primeiro momento para o levantamento dos estudos foram definidas as palavras-chaves “3D printing”, “mortar” e “rheology”, que associadas aos operadores “AND” e “OR” compuseram a string de busca: 3D AND printing AND mortar AND rheology.

Para esta revisão sistemática apenas artigos disponíveis na integra, com contribuição na área da engenharia civil e em inglês foram selecionados, devendo esses possuírem o formato de publicação em periódico, congresso ou livros, com uma extensão temporal de divulgação até agosto de 2024, sem restrição de início. Além desses outros critérios de inclusão foram utilizados na seleção dos documentos, sendo: apresentar características do processo de medição das propriedades reológicas; tratar da composição e das propriedades das misturas empregadas; e/ou relatar as principais dificuldades que envolvem os pontos anteriores.

4. Resultados

No tocante às características gerais da busca, um total de 47 publicações foram retornadas pelas bases, sendo esse montante levado posteriormente para rastreabilidade de duplicatas e análise pelos critérios de seleção, como apresentado em resumo na Tabela 1.



Tabela 1 - Triagem dos estudos encontrados nas bases.

Etapa	Quantidade de trabalhos por bases		
	<i>ScienceDirect</i>	<i>Scopus</i>	<i>Web of Science</i>
Valor final de estudos como resposta a string definida.	11	30	6
Observação de relevância na área da engenharia civil e do formato do estudo.	5	16	4
Retirada de trabalhos duplicados.	0	5	0
Aplicação dos critérios de seleção específicos do tema com a leitura dos títulos e resumos.	5	11	4
Total de estudos para discussões		20	

No primeiro momento foram retirados trabalhos que não possuíam relação com a área em estudo, seja por meio de filtros disponíveis ou por uma leitura prévia dos títulos, como aqueles que apresentavam em sua totalidade as palavras-chaves, mas tinham foco em áreas da arquitetura, design, pedagogia, saúde, computação, entre outras, que continham termos isolados da pesquisa mesmo com a utilização de operadores booleanos, além de trabalhos que não fizessem parte do formato estabelecido.

Retiradas as duplicações de estudos entre as bases, com auxílio do Software StArt, e após uma leitura dos títulos e resumos de forma a observar os critérios específicos estabelecidos no protocolo da pesquisa, um total de 20 trabalhos foram selecionados na triagem para posterior sumarização.

4.1 Influência da reologia na impressão 3D

Para a impressão 3D é necessário que a argamassa apresente propriedades reológicas adequadas a fim de que sejam garantidas a extrudabilidade, a capacidade de construção, a estabilidade da forma, a adesão entre as camadas e a resistência mecânica (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020; PANDA et al., 2019).

A extrudabilidade pode ser definida como a capacidade do material ser bombeado suavemente através de uma extrusora sem qualquer interrupção/obstrução no fluxo da tubulação. Argamassas que possuem tensão de escoamento muito altas são difíceis de extrudar e podem resultar em descontinuidade durante o processo de extrusão (ZHANG et al., 2020; PANDA et al., 2019; MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020). Argamassas com alguns tipos de geopolímeros, por exemplo, não se apresentam extrudáveis, devido à alta tensão de escoamento estática, causando obstrução na saída do tubo, enquanto outras de menor tensão proporcionam um correto efeito de extrusão (ZHANG et al., 2020). Muito se deve também à composição do material como um todo, o tipo de agregado e aglomerante utilizados.



Como verificado por Vergara e Colorado (2021), a adição de caulim na mistura de argamassa aumentou a viscosidade, aumentando a suspensão e evitando a segregação. Já o carbonato de cálcio aumentou a fluidez da pasta, melhorando a resistência à compressão da argamassa e diminuindo a porosidade. Assim, os autores constataram que para que a argamassa tivesse uma boa extrudabilidade, foi necessária uma quantidade de cerca de 10% de massa de areia como agregado miúdo, a fim da mistura não ser tão viscosa nem tão fluida, tendo em vista que a granulometria dos grãos afeta sua reologia e consequentemente a extrudabilidade da mesma.

Uma redução na quantidade de areia na argamassa também foi constatada por Moeini, Hosseinpour e Yahia (2020) como uma boa solução a fim de garantir a extrudabilidade correta do material. Além disso, verificou-se que misturas com maior viscosidade tiveram desempenho inferior na extrudabilidade, comparadas às de menor viscosidade, apesar de aquela não ter causado obstrução no equipamento. Porém essa última apresentou uma superfície mais uniforme, sem fissuras.

Na impressão 3D, um material é mais benéfico quando consegue recuperar rapidamente a sua viscosidade original após a extrusão e, dependendo do tempo de impressão, pode acelerar a taxa de endurecimento (estruturação), antes que as camadas subsequentes sejam colocadas sobre ele (ZHANG et al., 2020; PANDA et al., 2019). Esse fato está relacionado à capacidade de construção da argamassa, que consiste em uma propriedade caracterizada pelo fato de o material conseguir reter a forma dada sob seu peso próprio e sob o peso das camadas sobrepostas (IUBIN; ZAKREVSKAYA, 2020; LONG et al., 2020).

A capacidade de estruturação está relacionada ao aspecto de estabilidade da forma, que, de maneira semelhante àquela, depende de maiores taxas de rigidez e da tensão de escoamento do material, valores estes que resultam em índices de estabilidades mais elevados, refletindo uma menor deformação (ZHANG et al., 2020; MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2020). Segundo os mesmos autores, no entanto, é possível verificar também que para maiores taxas de rigidez, há mais fissuras nas superfícies dos filamentos das argamassas, sendo necessário alcançar um equilíbrio entre ambas as características.

Outro ponto fundamental para a impressão 3D está relacionado à adesão entre as camadas do material. A principal dificuldade se dá pela criação das juntas frias entre as camadas quando o tempo entre a impressão de uma camada e outra é muito grande, embora outros efeitos, como a composição e o tamanho das partículas de agregado, também possam afetar adesão das camadas (PANDA et al., 2019). Além disso, a fraca ligação entre as camadas pode estar ainda associada ao encolhimento ou carbonatação do material e pode ainda ser temporária, caso a força de adesão entre as camadas aumente à medida que ocorre a hidratação do cimento.

4.2 Influência das Adições na Reologia

A impressão 3D, tendo aspecto de produção automatizada, não se isenta do desenvolvimento de um planejamento e seleção dos processos e materiais utilizados na composição do produto impresso. As etapas devem ser



cuidadosamente previstas, uma vez que podem comprometer o desempenho do produto.

Diversos fatores afetam a qualidade da estrutura impressa, não sendo diferente para os materiais que integram a mistura. Com base nos resultados observados na busca das bases científicas, muitos trabalhos estão direcionados a compreender a influência das adições/aditivos na mistura de argamassas em relação às propriedades finais da estrutura impressa.

Existem propriedades que são modificadas com a presença dessas adições, como exemplo a reologia, que se refere à avaliação da tensão de escoamento, viscosidade plástica e tixotropia de um material para atingir os níveis desejados de capacidade de impressão, capacidade de construção e resistência à segregação. Os requisitos de viscosidade e tensão de escoamento para impressão 3D são diferentes; os materiais requerem uma tensão de escoamento adequada e boa fluidez do cilindro de carga para o bico da impressora, e a argamassa fresca após a impressão deve possuir uma alta viscosidade e tensão de escoamento para manter a forma desejada (IUBIN; ZAKREVSKAYA, 2020). A seguir são mostradas as principais adições encontradas e alguns dos seus impactos em relação à reologia para aplicação em impressão 3D.

Vergara e Colorado (2021) utilizaram um total de 15 amostras com misturas utilizando caulim, areia e carbonato de cálcio para obter pastas com diferentes tipos de comportamento. A estabilidade geométrica dos materiais impressos indicava se essas pastas poderiam ou não ser usadas no processo de impressão. Logo, essas adições foram utilizadas com o intuito de melhorar o processo de extrusão. Desta forma, ao que se refere à reologia, o incremento do caulim na mistura aumentou a viscosidade, o que por sua vez resultou em melhor suspensão e evitou segregação. Já o carbonato de cálcio aumentou a fluidez da pasta, melhorando a resistência à compressão da argamassa. No entanto, os autores concluíram que nenhuma das formulações adequadas para impressão 3D estavam dentro das faixas de aceitabilidade da Norma ASTM para produção de argamassas.

Outro estudo que retrata a influência do uso de adições foi realizado por Panda e Tan (2021), no qual observaram o comportamento reológico de misturas de cinzas volantes de alto volume contendo microsilica para uso em concreto, e obtiveram que a microadição de sílica aumentou a capacidade de impressão da mistura ternária, em termos de tensão de escoamento e capacidade de construção, tornando-se assim uma tixotropia ideal para aplicação de impressão em concreto.

Zhang et al. (2020) retrataram em seu estudo a influência do agregado sobre a mistura, a relação entre a fluidez da pasta e o teor dos grãos na argamassa imprimível. Foi utilizada uma mistura com cimento Portland, modificadores reológicos (sílica ativa, nanossílica e argila micro-atapulgita) e três tipos de areias de maneira independente: areia natural de diâmetro máximo 4,75 mm com módulo de finura de 2,61; a areia com diâmetro máximo 1,18 mm com módulo de finura de 2,02; e a areia de diâmetro máximo 2,36 mm com módulo de finura de 2,33. Os autores observaram diferenças significativas para os comportamentos na capacidade de construção e reologia nas diferentes faixas,



sendo que as argamassas contendo mais finos apresentaram uma tensão de escoamento maior e uma melhor construtibilidade. Todas as amostras se mostraram aceitáveis para impressão, com a necessidade de modificadores reológicos para a mistura de 4,75 mm ser aplicada.

5. Conclusão

A manufatura aditiva aplicada na construção, relacionada a impressão de misturas cimentícias a partir de um modelo tridimensional, mostra-se com grande potencial de aplicação, principalmente no enfrentamento e mitigação de problemas como custo atrelados a formas, desperdícios, escassez de mão de obra qualificada, entre outros. Em tese, as diferentes técnicas e abordagem que foram levantadas na busca e discutidas ao longo desse artigo vão de encontro a essa afirmativa da crescente associação desses processos as práticas da engenharia civil.

O controle dos parâmetros reológicos se mostra cruciais para se obter as características desejadas do produto, que podem influenciar diversos fatores como o fluxo do material, que irá refletir sobre a geometria do extrudado, na integridade do filamento impresso e na ligação entre as interfaces das camadas. Sendo assim, o seu controle pode melhorar a qualidade da estrutura construída e alcançar o desempenho no qual foi projetada.

Os materiais empregados nas misturas são fundamentais para alcançar as propriedades reológicas para o bom funcionamento dos equipamentos que estão envolvidos no processo de impressão, como também na construção, estabilidade, estética e desempenho da estrutura final. Os componentes de uma mistura necessitam proporcionar ainda no estado fresco um comportamento fluido o suficiente para que possa ser transportado pelos condutos do sistema e ao ser extrudado e depositado sobre os demais filamentos devem possuir uma estabilidade com nível de deformação mínima, sem comprometer a coesão entre as camadas e o desempenho do composto endurecido.

6. Referências

- ALBAR, A. et al. *3D printing in construction: Current status, applications, and challenges*. Journal of Building Engineering, v. 32, p. 101660, 2020.
- ASPRONE, D. et al. *A concept for an additive manufacturing construction process based on structural prefabricated components*. Automation in Construction, v. 89, p. 154–162, 2018.
- CARDOSO, F. A. et al. *Rheological behavior of mortars in fresh state*. Revista Matéria, v. 20, n. 3, p. 734–743, 2015.
- DIGGS-MCGEE, M. et al. *Investigating performance characteristics of 3D printable concrete using a rotational rheometer*. Construction and Building Materials, v. 213, p. 595–604, 2019.
- IUBIN, A.; ZAKREVSKAYA, L. *Optimization of printable concrete mixture based on the structural build-up of cement paste*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 753, p. 042004, 2020.



- JAYATHILAKAGE, R.; SANJAYAN, J.; RAJEEV, P. *Yield stress-based thixotropic model to simulate 3D concrete printing*. Cement and Concrete Research, v. 120, p. 1–9, 2019.
- KHAN, M. S. *3D printing in civil engineering: A state of the art review*. Materials Today: Proceedings, v. 26, p. 2418–2423, 2020.
- LONG, W. J. et al. *A study on formulating extrudable 3D printing cementitious materials*. Construction and Building Materials, v. 245, p. 118414, 2020.
- MANIKANDAN, K. et al. *3D printing of building components: An overview*. Materials Today: Proceedings, v. 37, p. 2662–2665, 2020.
- MECHTCHERINE, V. 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, V. et al. *State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious materials*. RILEM Technical Letters, v. 3, p. 1–5, 2019.
- MOEINI, M.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. *A comprehensive approach for rheological characterization of 3D printable cementitious materials*. Construction and Building Materials, v. 248, p. 118676, 2020.
- Mewis, J.; Wagner, N. J. *Thixotropy*. Advances in Colloid and Interface Science, v. 147–148, p. 214–227, 2009.
- PANDA, B.; TAN, M. J. *Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing*. Ceramics International, v. 47, n. 3, p. 4073–4085, 2021.
- PANDA, B. et al. *Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing*. Ceramics International, v. 45, n. 3, p. 2793–2801, 2019.
- SCHUTTER, G. et al. *Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials*. Cement and Concrete Research, v. 112, p. 25–36, 2018.
- SILVA, A. R. da. *Relação entre as propriedades reológicas de argamassas e seu desempenho no estado fresco e endurecido*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- VERGARA, J. M.; COLORADO, H. A. *Design of 3D printable mortars using kaolinite and calcium carbonate: Rheology and printability*. Construction and Building Materials, v. 288, p. 123055, 2021.
- WU, P.; WANG, J.; WANG, X. *A critical review of the use of 3D printing in the construction industry*. Automation in Construction, v. 68, p. 21–31, 2016.
- ZHANG, J. et al. *3D printing geopolymer mortar containing recycled sand and fly ash: Flow behavior, printability and buildability*. Journal of Cleaner Production, v. 244, p. 118610, 2020.