

Elementos de concretos produzidos por impressão 3D com foco na aderência entre camadas: uma revisão

Concrete elements produced by 3D printing with a focus on adhesion between layers: a review

Monique de Brito Filgueiras, Mestranda, Universidade Estadual de Londrina

monique.filgueiras@uel.br

Lívia Fernanda Silva, Doutoranda, Universidade Estadual de Londrina

livia_fernanda5@hotmail.com

Berenice Martins Toralles, Dra, Universidade Estadual de Londrina

toralles@uel.br

Resumo

A impressão 3D de elementos de concreto é o processo construtivo mais inovador e promissor da atualidade. Além de representar inúmeros benefícios na indústria da construção civil, como redução de desperdícios e produção de materiais duráveis e mais sustentáveis, essa nova proposta de construção apresenta vários desafios para a engenharia do ponto de vista do material. Este artigo revisa os principais processos de impressão 3D de concretos, bem como as principais propriedades que determinam a aderência entre as camadas, fator fundamental para uma boa impressão. Para este estudo, foram levantados resultados de testes de aderência por meio de MEV e difração de raios-X e também ensaios de aderência em que o destacamento entre as camadas foi induzido. Concluindo que a identificação das principais propriedades do material é um dos fatores mais importantes para a determinação dos materiais e misturas que irão condicionar a melhor aderência entre as camadas.

Palavras-chave: Impressão de concreto 3D; Aderência intercamada; Propriedades mecânicas.

Abstract

3D printing of concrete elements is the most innovative and promising construction process today. In addition to representing numerous benefits in the construction industry, such as waste reduction and production of durable and more sustainable materials, this new construction proposal presents several challenges for engineering from the point of view of the material. This article reviews the main 3D concrete printing processes, as well as the main properties that determine the adhesion between the layers, a fundamental factor for a good impression. For this study, results were obtained from adhesion tests by means of SEM and X-ray diffraction and also adhesion tests in which detachment between layers was induced. Concluding that the identification of the main properties of the material is one of the most important factors for determining the materials and mixtures that will condition the best adhesion between the layers.

Keywords: 3D concrete printing; Adhesion between layers; Mechanical properties.

1. Introdução

Com a robotização dos processos industriais, tudo o que representa a tecnologia e automatização é símbolo de progresso e inovação e visto que a indústria da construção civil é uma das mais atrasadas em termos de desenvolvimento tecnológico (WITZKE et al., 2019), se faz indispensável a inserção destes mecanismos visando a inovação e produtividade. Essa necessidade é evidenciada com um contrato assinado pela Nasa com o objetivo de construir uma base lunar com o uso de impressoras 3D para abrigar astronautas em futuras viagens ao espaço, criando uma tecnologia de proteção contra condições adversas, como temperaturas extremas, radiação e chuva de micrometeoritos (NOGUEIRA, 2020).

O alto grau de liberdade que a impressão 3D de concreto proporciona faz com que o uso desse processo de manufatura aditivo (AM), assim definido pela ASTM por ser o processo de juntar materiais para fazer objetos a partir de dados do modelo 3D, camada sobre camada (BAZ et al., 2020) na construção civil ganhe cada vez mais atenção, sendo uma das tecnologias com maior crescimento atualmente. Porém em decorrência da extrusão do concreto livre de formas e processo de vibração definidos, se faz necessário o estabelecimento de normas de impressão por meio de estudos que apontem tendências de comportamento da composição de concreto com melhor trabalhabilidade e combinação de partículas que possibilitem a extrusão do material sem perda de suas características.

As principais propriedades mecânicas requeridas por elementos de concreto produzidos por impressão 3D ainda são pouco exploradas. O presente trabalho tem como objetivo revisar composições de concreto adequadas para o processo de impressão 3D baseado em extrusão e estudar possíveis métodos de estudo e ensaio de aderência entre camadas, visando diminuir a alta variabilidade de resultados obtidos na literatura com o método da ASTM D724-12. Foram encontrados estudos sobre a caracterização da microestrutura de concretos impressos em 3D no que diz respeito a interface intercamada, estes obtém seus resultados por meio de imagens de raios-X, técnicas de espectroscopia, difração de raios-X de alta pressão e in-situ e nanotomografia (NERELLA et al., 2019; HAMBACH & VOLKMER, 2017; Bong et al., 2020).

2. Processo de impressão 3D em concretos

Com potencial para automação, redução do custo da construção, tempo, desperdício de material e energia e fabricação de estruturas geométricas complexas, a impressão 3D aplicada aos materiais de construção é uma alternativa atraente e inovadora quando comparada aos métodos construtivos convencionais (Li et al., 2020.).

O desenvolvimento de materiais duráveis e sustentáveis para a impressão 3D em escala de construção deve reduzir significativamente a emissão de CO_2 e a substituição parcial do cimento por adições minerais, como cinza volante, além de possibilitar uma distribuição maior do tamanho das partículas, possibilita que a mistura atinja uma boa fluidez atrelada à questão ambiental (VAN et al., 2016). Os projetos que envolvem a impressão 3D de concretos, resultam em uma construção mais sustentável também por serem mais eficientes depositando material apenas onde é necessário, reduzindo a geração de resíduos, fôrmas e todo o potencial de desperdícios em uma construção (WANGLER et al., 2016).

A tecnologia utilizada para a impressão de concretos e na construção civil é principalmente com base em pó e extrusão, de acordo com Zareiyan & Khoshnevis, (2017) e Xia & Sanjayan, 2016 e Li et al, (2020). D-shape é a empresa que forneceu o método de

impressão em pó, que possui como vantagens a alta resolução de impressão e grande liberdade geométrica, porém por construir suas camadas em uma velocidade mais lenta, deve ser utilizado em obras menores e fora do local de construção (Zareiyan & Khoshnevis, 2017; Xia & Sanjayan, 2016), sendo mais explorado e mais viável para fabricação em larga escala, a tecnologia de impressão de concreto por extrusão, método Fused Deposition Modeling (FDM), consistindo na extrusão do material cimentício por um bocal geralente montado em um pórtico, guindaste ou braço robótico, que imprime camada por camada da estrutura (SANJAYAN *et al.*, 2018).

Foram feitos protótipos para impressoras 3D em concretos de grande escala implantáveis em campo pelo laboratório de pesquisa em Engenharia de Construção do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), juntamente com o National Aeronautics and Space Administration (NASA). O protótipo é chamado de Sistema de Construção automatizada de Estruturas Expedicionárias (ACES), que possui um pórtico robótico móvel e um sistema automatizado de deposição de material (MDS), unindo materiais secos e fluidos, sendo projetado para campo e com um tempo curto de configuração, de acordo com Muller *et al.* (2018), a ACES foi eficaz na impressão de um quartel de concreto usando agregado de 10 mm para concreto de alta resistência.

Diferente dos sistemas de pórticos, pesquisadores do Oak Ridge National Laboratory's, (Tennessee, EUA), estão desenvolvendo um sistema de deposição em larga escala controlado por cabos visando permitir a construção automatizada de edifícios, sistema conhecido como SkyBAAM sendo conduzido por cabos por quatro estações base e suspenso de um único guindaste, sendo configurado rapidamente com preparação mínima do local (CHEESSER *et al.*, 2018).

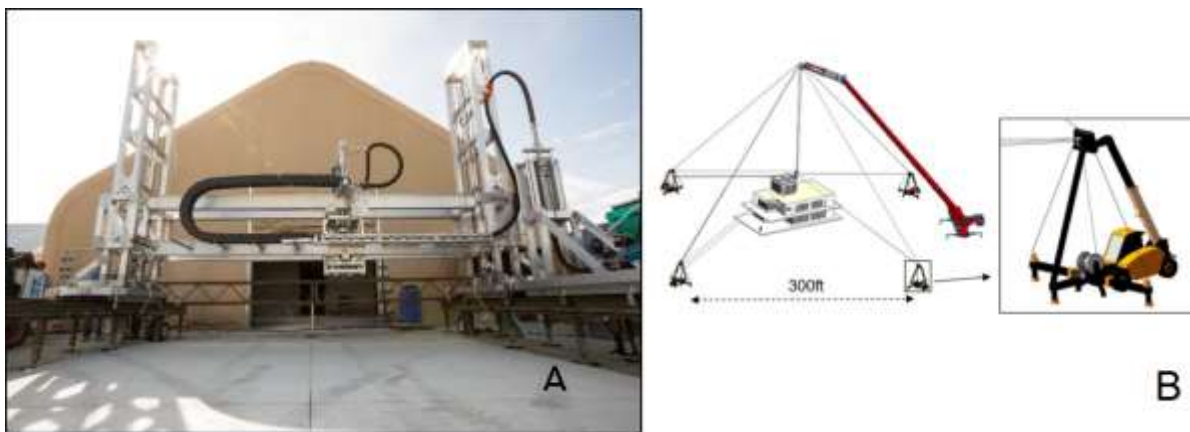


Figura 1: Sistema de construção automatizada de Estruturas Expedicionárias (ACES) (A) e conceito da impressora SkyBAAM da ORNL (B). Fonte: Adaptado de Muller *et al.* (2018) e Cheesser (2018).

4. Propriedades do concreto impresso

Os materiais cimentícios impressos em 3D devem ser rígidos o suficiente para manter geometrias estáveis impressas. Novas propriedades de materiais cimentícios devem ser consideradas devido à grande diferença entre os métodos convencionais de construção e o novo processo de impressão surgido, sendo as principais observadas para o estado fresco a fluidabilidade, extrudabilidade e a trabalhabilidade, e para o estado endurecido, densidade,

força compressiva, força de flexão, força de tração, retração e fissuras (Zhanzhao *et al.*, 2020).

A fluidabilidade é uma propriedade crítica que avalia o comportamento de fluxo de materiais frescos no sistema de bombeamento, é o que permite o transporte suave dos materiais desde o motor até o bocal de impressão (Lim *et al.*, 2012). De acordo com Le *et al.* (2012), a extrudabilidade dos materiais impressos é a capacidade da pasta fresca passar pelo bocal de impressão como um filamento contínuo e intacto para se garantir a extrusão desejada. A trabalhabilidade diz respeito à resistência do material impresso à deformação sob carga, como não existem formas, os materiais frescos devem ter capacidade de construção suficiente para serem rígidos após extrudados sustentando seu auto-peso, peso das camadas superiores e a pressão da extrusão (MURTAGH *et al.*, 2020).

Sem o processo de adensamento ou compactação adequado pela impressão ser livre de formas e vibradores, pequenos vazios lineares estão sujeitos a se formarem entre filamentos extrudados devido ao método de extrusão por camadas, o que resulta em um comportamento anisotrópico (PANDA *et al.*, 2017). Deste modo, as principais propriedades endurecidas do material, que condicionam os forças mecânicas correspondem a densidade, força de compressão, força de tração e flexão. A densidade pode ser influenciada pela pressão da bomba, velocidade e design do caminho de impressão, de acordo com Le *et al.* (2012), as amostras bem impressas apresentam menor teor de vazios e maior densidade do que as moldadas.

Com o teste de compressão de Koker e Van (2004) foi verificado que a pressão do bombeamento não é dominante, sendo a geometria e qualidade do material impresso fatores mais importantes para uma melhor resistência à compressão. Em relação à influência da diferença de tempo de impressão Sanjayan *et al.* (2016) observam que a força de flexão das amostras impressas tem inicialmente um aumento e depois uma diminuição à medida que a lacuna de tempo de impressão aumenta, seguindo o mesmo padrão das forças compressivas, já o vínculo de tração diminui com o aumento da diferença de tempo de impressão. A Figura 2 mostra o fluxograma de como proceder de acordo com cada propriedade do material

observada

ao

longo

das

impressão

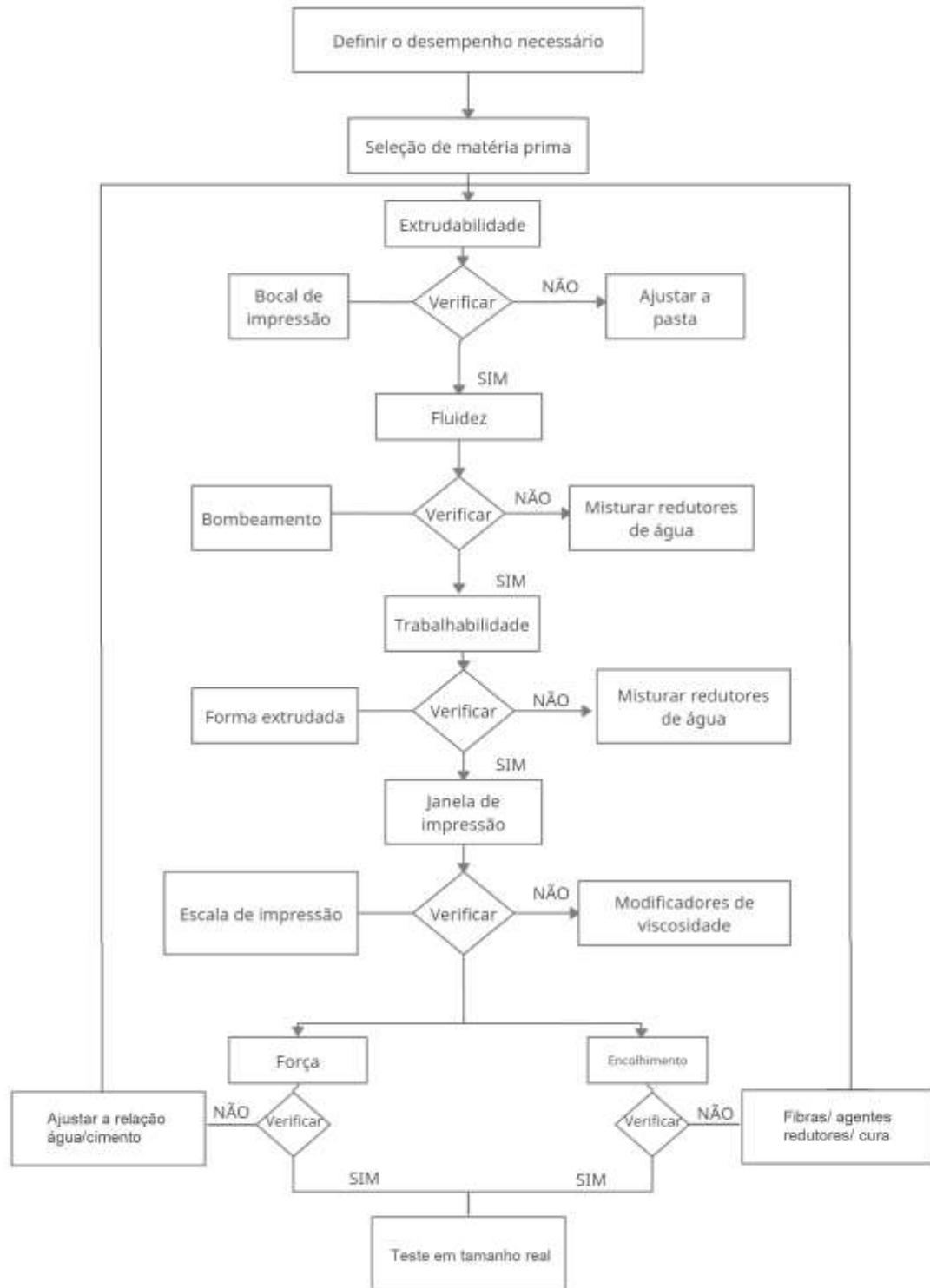


Figura 2: Procedimento de projeto de mistura para materiais cimentícios imprimíveis em 3D. Fonte: Adaptado de Zhanzhao et al (2020).

5. Materiais e misturas

Os principais pilares para o sucesso da impressão 3D de concretos se constituem dos materiais que irão compor a tinta de impressão (KHAN *et al.*, 2020). O cimento deve constituir uma pasta com fluidez adequada, extrudibilidade e trabalhabilidade que possam ser rapidamente configurados para atender aos requisitos do processo de impressão (ROUSSEL, 2005), o melhor tipo de composição cimentícia para cada objetivo de construção é a questão das pesquisas de impressão 3D atualmente com foco no controle da taxa de estruturação do material garantindo a estabilidade e adesão das camadas impressas e empilhadas já que o produto é livre de fôrmas.

De acordo com Khan (2020), grande parte das pesquisas teve como foco a impressão de materiais baseados em cimento Portland comum. A adição de misturas minerais como cinza volante e escórias também foram utilizadas com a finalidade de controlar a fluidez da pasta devido ao tamanho das partículas, forma e natureza pozolânica, sendo uma proporção adequada de agregados, cimentos e minerais, estratégia para uma melhor distribuição do tamanho das partículas propiciando a ideal trabalhabilidade (NERELLA *et. al.*, 2019; MARCHMENT *et. al.*, 2019). A Tabela 1 mostra algumas composições de misturas e tipos de cimento utilizados pelos autores.

ARTIGOS	AUTOR	ANO	TIPO DE CIMENTO	ADIÇÕES
3-D printing of concrete: Beyond horizons	Mohammad S. Khan, Florença Sanchez	2020	Portland comum Cimentos à base de enxofre, cimentos de argila calcinado calcário, cimento de fosfato de cálcio de magnésio com cinza volante	Cinza volante (60%), materiais reciclados
Properties of 3D Printable Concrete	Van Zijl, Gideon P. A. G.; Paul, Suvash Chandra; Tan, Ming Jen	2016	CAC em substituição ao Cimento portland comum	Cinzas volantes e escória como substituição (50%)
Rheology and printability of engineered cementitious composites - a literature review	Weng, Yiwei; Lu, Bing; Qian, Shunzhi; Tan, Ming Je	2016		Escória como substituição (15%), fibra de PVA, cinzas volantes, metacaulim, sílica ativa
Mix suitable for concrete 3D printing: A review.	M.A. Khan	2020	Cimento Portland comum	Cinzas volantes classe F e cinza volante classe C, sílica ativa, escória (adição em algumas misturas específicas)
Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review.	Zhazhao Li, Maryam Hojati, Zhengyu Wu, Jonathon Piasente, Negar Ashrafi,	2020		Cinzas volantes, sílica ativa, escória, e argila e fibras de reforço.

Tabela 1: Materiais para concreto impresso. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os esforços no desenvolvimento de materiais propícios à impressão de concretos também visam melhorar a capacidade de construção e aderência entre camadas impressas, uma vez que durante a deposição, a mistura e ligação entre as camadas se dão pela composição do cimento, a umidade dos compostos extrudados, o tempo entre a deposição dos filamentos e o ambiente circundante do material durante a cura, que pode levar à secagem, retração autógena e carbonatação do concreto afetando a ligação (aderência) entre as camadas depositadas.

De acordo com Zhijian Li *et al.*, (2018), é interessante o uso de agente modificador de viscosidade como superplastificantes para melhorar a integridade estrutural, aumentando a força de contato entre as camadas extrudadas adjacentes. Para que o aditivo modifique o comportamento de contato de duas camadas é necessário que se atinja na medida exata do seu potencial de retenção de água e redução da tensão superficial, sem diminuir a fluidez do material fresco.

Os resultados observados por Ma *et al.*, (2018) indicam que quanto maior o teor do agente modificador de viscosidade, mais viscoso e menos fluida se torna a pasta e a quantidade ideal do aditivo melhora as propriedades de ligação das camadas extrudadas. Foi investigado o comportamento de dobra das amostras, resultando em um aumento da força de flexão com 1,5% de aditivo, sendo 26% maior do que a força verificada sem a adição.

A pesquisa de Zhijian Li *et al.*, (2018) ainda destaca que o uso de aditivos modificadores de viscosidade com sua ação de retenção de água reduz o segregamento das pastas de cimento, o que contribui para o contato de camadas impressas e, portanto, diminui as fraturas entre elas, aumentando o desempenho estrutural desejado. Assim como Weng *et al.* (2020), que concluiu que 10% de sílica tem sido eficaz para ajustar a reologia para impressão 3D e cinza volante (60% de substituição na formulação de cimento) para aumentar a trabalhabilidade de materiais de endurecimento rápido.

6. Aderência entre camadas

A adesão entre si das camadas de concreto impresso é fundamental para uma boa impressão, deste modo, experimentos sobre esse processo são muito importantes e mostram a vulnerabilidade das estruturas devido à baixa resistência das interfaces de ligação. Um dos maiores desafios da impressão 3D é o desenvolvimento de técnicas que aderem a camadas extrudadas para alcançar uma estrutura homogênea e resistente (ZAREIYAN & KHOSHNEVIS, 2017).

Um dos problemas da impressão 3D de concretos é a fraca ligação devido ao excesso de água superficial no processo de extrusão. Nesse sentido Ma *et al.* (2020) propõe uma argamassa aditiva à base de cimento sulfoaluminado de cálcio (CSA), fibra de celulose e enchimento de calcário para a aplicação entre as camadas impressas, o que permite a extensão do intervalo de tempo de impressão e também aumenta a ligação entre as camadas.

Os resultados mostram que a argamassa proposta utiliza água para a cura interna obtendo hidratação precoce do concreto e combate a retração, gerando uma ligação mecânica adicional, a resistência entre à tração intercamada foi aumentada em cerca de 2 MPa para um intervalo de impressão de 60 minutos. O estudo ainda conclui que o material pode reduzir vazios e falhas longitudinais entre as camadas e aumenta a durabilidade e é fácil de fabricar e obter porque sua matéria prima é abundante, barata e ecologicamente correta.

A análise da força entre as camadas de concreto pode ser feita através da investigação micro e macroestrutural. Na escala macro, as propriedades mecânicas (por exemplo, deformação) e as configurações de camadas como entrelaçamento e rugosidade são responsáveis pela aderência, sendo o teste de aderência pela investigação da macroestrutura do concreto feita através do ensaio definido pela ASTM D7234-12; Sanjayan *et al.* (2018).

E na micro escala têm-se a compatibilidade química dos materiais influenciando a força na interface, a investigação da microestrutura das interfaces do concreto pode ser feita por meio da microscopia eletrônica de varredura assim como na pesquisa de Mendoza Reales *et al.*, (2019), a micro tomografia de raios – X de alta resolução também tem sido utilizada para

caracterizar a microestrutura por meio da investigação da fração de volume e distribuição do tamanho de grãos de cimento e distribuição granulométrica e assim é possível avaliar como essas propriedades irão interferir nas propriedades mecânicas do material (KHAN *et al.*, 2020).

6.1 Microestrutura das camadas do concreto impresso

Nerella *et al.* (2019), investigaram a região entre duas camadas por meio da microscopia eletrônica de varredura comparando um ponto de referência no núcleo de uma camada com a microestrutura da interface de duas camadas impressas. Concluíram que as misturas com maior homogeneidade microestrutural no núcleo também apresentaram maior homogeneidade nas interfaces contribuindo com uma ligação mais forte de camadas do material e com menor volume de vazios.

Para que haja uma maior ligação entre as camadas de concreto impresso, podem ser necessárias alterações no processamento e nas superfícies superiores da camada, promovendo mais vínculos e controlando as condições externas. O maior objetivo deve ser alcançar propriedades homogêneas de microestrutura e conseqüentemente um material isotrópico. Além disso, Nerella *et al.* (2019), observou que o crescimento retardado de outros produtos de hidratação, principalmente o hidróxido de cálcio em vazios maiores, também foi identificado.

Ma *et al.* (2020), investigou as microestruturas das camadas por meio da microscopia eletrônica de varredura e os resultados sugeriram que com uma argamassa aditiva à base de cimento sulfoaluminoso de cálcio (CSA), houve uma melhora na hidratação precoce com a produção de etringita para combater a retração gerando uma ligação mecânica adicional entre as camadas impressas. A resistência à tração intercamada foi aumentada em 1,91 MPa para intervalo de tempo de 60 minutos, concluindo que o composto pode ser utilizado entre cada camada regularmente a fim de melhorar o processo de depósito e empilhamento de filamentos, reduzindo vazios e falhas longitudinais.

Ainda para as investigações em microescala do material com a finalidade de obter a evolução da química do concreto nas primeiras horas de hidratação, bem como o efeito de misturas e como elas interferem na superfície das camadas, pode ser utilizado o estudo com difração de raios-X. A ênfase pode ser na morfologia, cristalização e composição elementar de produtos de hidratação de cimento que influenciam a força, dureza ou outras propriedades da matriz.

Monteiro *et al.*, (2019), por meio do teste, estudou a montagem das fases e sua evolução durante a hidratação e conclui que deve-se tomar cuidado com amostras com superplastificantes que podem apresentar picos mais altos distorcendo os resultados. Têm-se ainda que a adição de nanomateriais em sistemas cimentícios modifica a microestrutura da matriz promovendo interações eficazes entre partículas C-S-H precipitadas, passo importante para compreender o mecanismo de densidade de empacotamento em concretos impressos.

6.2 Macroestrutura das camadas do concreto impresso

Atualmente, não existe uma abordagem padrão para teste de força entre as camadas de concreto produto de impressão 3D LI *et al.*, (2018). Os métodos são adaptados de testes como o de Li *et al.* (2018), o teste compressivo uniaxial usando amostras cruzadas (que elimina a excentricidade) que consiste em uma máquina de teste mecânico universal com uma velocidade de 0,5 mm/min, a máquina é encaixada de modo a prender a peça

perpendicular e puxá-la na velocidade mencionada. A resistência à tração intercamadas é calculada pela equação:

$$\sigma = \frac{P_c}{A} \quad (1)$$

Onde P_c é a carga crítica para o destacamento e A é a área ligada.

A Figura 2 ilustra de forma esquemática a configuração do teste para a resistência à tração intercamadas (A) e a força da cruzada intercamadas (B).

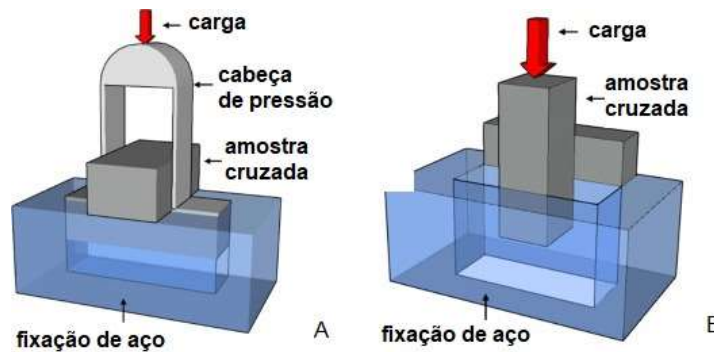


Figura 3: Esquema de teste para resistência à tração e força da tesoura intercamada. Fonte: Adaptado de Li et al (2018).

De acordo com Li et al (2018) esse teste de força é perpendicular é mais prático porque está diretamente relacionada à estabilidade da estrutura.

Sanjayan *et al.* (2018) propuseram ainda um método de ensaio de tração, que consiste em fixar as camadas na extremidade da prensa e aplicação de uma força contrária a compressão para determinar a aderência entre as camadas de concreto impresso sobrepostas, que corresponde a impressão de duas camadas. Quando eles atingem uma resistência final são seccionados em corpos de prova de cerca de 6 cm de comprimento e são abertos pequenos chanfros para induzir a ruptura na interface e estes são aderidos à dois dispositivos auxiliares de tração por cola do tipo epóxi e assim submetidos ao ensaio conforme representado na Figura 3.

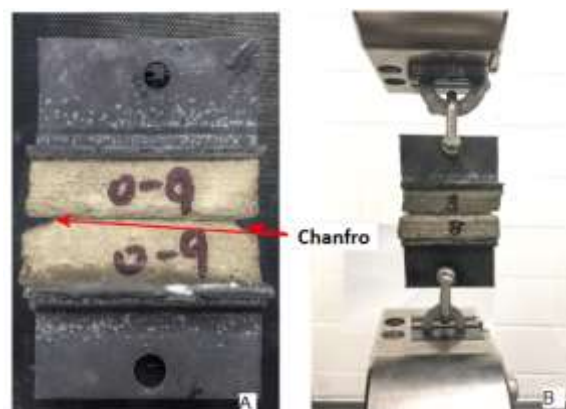


Figura 4: Ensaio da aderência entre camadas. Fonte: Adaptado de Sanjayan (2018).

Ainda, de acordo com Zucchetto (2020), é válido calcular a resistência à tração entre as camadas com base no ensaio *Pull-Off* especificado pela ASTM D7234-12 adaptando para os equipamentos utilizados por Sanjayan *et al.* (2018), sendo dois dispositivos metálicos

auxiliares colocados na face superior e inferior do corpo de prova confeccionados especialmente para esse tipo de ensaio com as regularizações de superfície adequadas.

Sobre o sentido das camadas impressas para os ensaios, Panda *et al.*, (2018) afirmam que o carregamento das camadas na direção longitudinal permite a melhor transferência de tensão, enquanto que o carregamento nas direções perpendiculares ou laterais leva ao deslizamento interfacial entre os filamentos, que é explicado mais por micromecânica da transferência de tensão do que no grau de compactação.

7 Conclusão

Por meio deste estudo é possível concluir que os fatores mais importantes a serem verificados para o processo de impressão de concretos é a identificação da modelagem do material impresso, bem como o desenvolvimento de materiais com propriedades reológicas adequadas a garantir as melhores propriedades do material fresco e endurecido e modelar a deformação dos materiais extrudados para o caminho de impressão garantindo precisão das formas da estrutura impressa.

Entre os fatores que influenciam no processo de impressão 3D de concretos como propriedades do material, intervalo de tempo, parâmetros do processo de impressão, a interface de camadas pode ser foco de grande instabilidade. A fraca ou deficiente ligação é uma das maiores limitações dessa nova tecnologia que pode prejudicar os desempenhos, durabilidade e a força da própria estrutura, foi verificado que materiais como agente modificador de viscosidade e superplastificantes podem fazer uma “ponte” entre as camadas até certo ponto ao mesmo tempo que aumenta-se a hidratação.

O uso de materiais alternativos, principalmente a substituição do aglomerante, se mostrou eficaz com a análise das pesquisas, a argamassa analisada atingiu valores semelhantes de características reológicas, com o uso de cimento, cinza volante, hidróxido de cálcio, areia e aditivo superplastificante. Witzke (2018) conclui que o rejeito de cinza volante em substituição parcial do cimento Portland se mostrou eficaz do ponto de vista técnico econômico e sustentável, motivando a ampliação por parte da indústria da construção civil da sua utilização e como componente de concretos estruturais.

A verificação da aderência entre camadas pode ser feita de maneiras distintas sendo as mais utilizadas na bibliografia a investigação por meio da microscopia eletrônica de varredura em que é analisada a microestrutura da ligação e o teste de *Pull-Off*, em que as duas extremidades da camada são forçadas a se destacarem. A orientação das camadas a serem estudadas pode variar de acordo com a finalidade da pesquisa, mas o fator determinante para a melhor aderência e resistência é o equilíbrio entre a manutenção de extrudabilidade, deixando os materiais suficientemente lubrificados e ao mesmo tempo com rigidez suficiente para suportar seu próprio peso e o do restante da estrutura.

Espera-se que a impressão 3D resulte, no futuro, em uma construção mais sustentável porque produzirá projetos mais eficientes com a deposição de material apenas nos locais pré estabelecidos, reduzindo a geração de resíduos, principalmente fôrmas e desperdícios que são constantes nos canteiros de obras. Sugere-se a execução dos experimentos, com a implementação dos materiais sugeridos como elaboração de pasta para a impressão 3D e assim provar por meio dos testes os resultados dos autores, obtendo proporções melhores e mais satisfatórias para a sustentabilidade.

Referências

- BAZ, B., AOUAD, G., & REMOND, S. (2020). **Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3D printed elements.** *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117002>
- BONG, S. H., NEMATOLLAHI, B., XIA, M., NAZARI, A., SANJAYAN, J., & Pan, J. (2020). **Properties of 3D-Printable Ductile Fibre-Reinforced Geopolymer Composite for Digital Construction Applications.** In *RILEM Bookseries*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7_42
- CHESSER, PHILLIP C., POST, Brian K., ROSCHLI, ALEX C., LIND, RANDALL F., BOULGER, ALEX M., LONNIE J., and Gaul, Katherine T. *Fieldable Platform for Large-Scale Deposition of Concrete Structures*. United States: N. p., 2018.
- DE KOKER, D.; VAN ZIJL, G. **Extrusão de Material Composto Baseado em Cimento Projetado.** Em Processo do 6º Simpósio RILEM sobre Concreto Reforçado com Fibra (FRC)-BEFIB, Verenna, Itália, 20-22 de Setembro de 2004; pp. 1301-1310.
- HAMBACH, M., & VOLKMER, D. (2017). **Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste.** *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>
- KHAN, M. S., SANCHEZ, F., & ZHOU, H. (2020). **3-D printing of concrete: Beyond horizons.** In *Cement and Concrete Research* (Vol. 133). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070>
- LI, ZHANZHAO, HOJATI, M., WU, Z., PIASENTE, J., ASHRAFI, N., DUARTE, J. P., NAZARIAN, S., BILÉN, S. G., MEMARI, A. M., & RADLÍ NSKA, A. (n.d.). *Sustainability Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review*. <https://doi.org/10.3390/su12145628>
- LI, ZHIJIAN, WANG, L., & MA, G. (2018). **Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of 3D Printable Tailing Mortar.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1).
- LIM, S., BUSWELL, R. A., LE, T. T., AUSTIN, S. A., GIBB, A. G. F., & THORPE, T. (2012). **Developments in construction-scale additive manufacturing processes.** *Automation in Construction*, 21(1), 262–268.
- LE, T.T.; AUSTIN, S.; LIM, S.; BUSWELL, R.A.; GIBB, A.G.F.; THORPE, T. **MIX Design e propriedades frescas para concreto de impressão de alto desempenho.** *Mater, mater. Struct.* 2012, 45, 1221-1232.
- MA, G., LI, Z., & WANG, L. (2018). **Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing.** *Construction and Building Materials*, 162, 613–627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- MA, G., SALMAN, N. M., WANG, L., & WANG, F. (2020). **A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing.** *Construction and Building Materials*.
- MENDOZA REALES, O. A., DUDA, P., SILVA, E. C. C. M., PAIVA, M. D. M., & FILHO, R. D. T. (2019). **Nanosilica particles as structural buildup agents for 3D printing with Portland cement pastes.** *Construction and Building Materials*.
- MONTEIRO, P. J. M., GENG, G., MARCHON, D., LI, J., ALAPATI, P., KURTIS, K.

- E., & QOMI, M. J. A. (2019). **Advances in characterizing and understanding the microstructure of cementitious materials.** In *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105806>
- MURTAGH, N., SCOTT, L., & FAN, J. (2020). **Sustainable and resilient construction: Current status and future challenges.** *Journal of Cleaner Production*, 268, 122264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122264>
- NERELLA, V. N., HEMPEL, S., & MECHTCHERINE, V. (2019). **Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing.** *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>
- PANDA, B., CHANDRA PAUL, S., & JEN TAN, M. (2017). **Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material.** *Materials Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
- PANDA, B., UNLUER, C., & TAN, M. J. (2018). **Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing.** *Cement and Concrete Composites*, 94(October), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002>
- ROUSSEL, N. (2005). **Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes.** *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.001>
- R.P. MUELLER, I.I. TOWNSEND, G.J. TAMASY, C.J. EVERS, L.J. SIBILLE, J.E. EDMUNSON, M.R. FISKE, J.C. FIKES, M. **Construção aditiva com colocação móvel (ACME)/construção automatizada do sistema de entrega de materiais de estruturas expedicionárias (ACES) (MDS)(2018).**
- SANJAYAN, J. G.; NEMATOLLAHI, B.; XIA, M.; MARCHMENT, T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 172, p.468-475, maio 2018.
- T. MARCHMENT, J. SANJAYAN, M. XIA **Método de aumentar a força do vínculo intercamado na impressão 3D em escala de construção com argamassa por amplificação eficaz da área de ligação.** *Mater. Des.*, 169 (2019)
- VAN ZIJL, G. P. A. G., PAUL, S. C., & TAN, M. J. (2016). **Properties of 3D printable concrete.** *Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing*.
- WITZKE, F. B., CORREIA, S. L., & MEDEIROS, R. A. (2019). **Abrasão superficial de concretos contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland.** <https://doi.org/10.4322/2526-7248.056>
- XIA, M., & SANJAYAN, J. (2016). **Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications.** *Materials and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.136>
- Y. WENG, S. RUAN, M. LI, L. MO, C. UNLUER, M.J. TAN, S. QIAN. **Estudo de viabilidade sobre pasta de cimento fosfato de potássio de magnésio sustentável para impressão 3D** *Constr. Build. Mater.*, 221 (2019), pp. 595-603
- ZAREIYAN, B., & KHOSHNEVIS, B. (2017). **Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete.** *Automation in Construction*, 83, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.019>

