

Influência da razão água/cimento na capacidade de suporte de carga de pastas cimentícias projetadas para impressão 3D

Influence of the water/cement ratio on the load bearing capacity of cementitious pastes designed for 3D printing

DOI:10.34117/bjdv9n5-020

Recebimento dos originais: 04/04/2023

Aceitação para publicação: 04/05/2023

Jairon Gomes da Silveira Junior

Graduando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Endereço: Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho,

Ilhéus - BA, CEP: 45662-900

E-mail: jgsilveira.egc@uesc.br

Kevin de Moura Cerqueira

Graduando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Endereço: Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho,

Ilhéus - BA, CEP: 45662-900

E-mail: kmcerqueira.egc@uesc.br

Ruan Carlos de Araújo Moura

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Endereço: Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho,

Ilhéus - BA, CEP: 45662-900

E-mail: rcamoura@uesc.br

Raimundo Alves Lima Sobrinho

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Endereço: Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho,

Ilhéus - BA, CEP: 45662-900

E-mail: ralsobrinho@uesc.br

Lucas Onghero

Doutor em Engenharia Civil

Pós-doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC)

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Endereço: R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n, Trindade,

Florianópolis – SC, CEP: 88040-900

E-mail: lucasjba@gmail.com

José Renato Castro Pessôa

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Endereço: Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho,

Ilhéus - BA, CEP: 45662-900

E-mail: jrcessoa@uesc.br

Marcelo Tramontin Souza

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

Endereço: Campus Soane Nazaré de Andrade, Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho,

Ilhéus - BA, CEP: 45662-900

E-mail: mtsouza@uesc.br

RESUMO

O princípio da impressão 3D é a construção de estruturas camada por camada a partir de um modelo digital. Os fatores de influência relacionados a viabilidade desta são, basicamente: as propriedades reológicas da mistura no estado fresco e a resistência mecânica no estado endurecido. Este estudo foca na reologia e capacidade de sobreposição de camadas de pastas cimentícias com diferentes teores de água. Pastas com razões de água/cimento (a/c) entre 0,28 e 0,32 foram testadas sobrepondo filamentos em camadas com um molde, e por ensaio de espalhamento (*flow table*). Os resultados mostram que as misturas com razão a/c de 0,28 apresentaram as propriedades reológicas aprimoradas para impressão. A capacidade de suporte de carga pode ser associada a um espalhamento na *flow table* inferior a 115 mm.

Palavras-chave: manufatura aditiva, reologia, sobreposição de camadas, flow table.

ABSTRACT

The principle of 3D printing is the construction of structures layer by layer from a digital model. The influencing factors related to its viability are basically: the rheological properties of the mixture in the fresh state and the mechanical strength in the hardened state. This study focuses on the rheology and buildability of cementitious pastes with different water contents. Pastes with water/cement ratios (w/c) between 0.28 and 0.32 were tested by superimposing layered filaments with a mold, and by flow table test. The results show that the mixtures with a w/c ratio of 0.28 showed the improved rheological properties for printing. The load-bearing capacity can be associated with a flow table spread of less than 115 mm.

Keywords: additive manufacturing, rheology, buildability, flow table.

1 INTRODUÇÃO

O princípio básico da impressão 3D é o da manufatura aditiva, ou seja, o material é impresso camada por camada. Assim, objetos sólidos tridimensionais podem ser rapidamente impressos a partir de um modelo digital [1].

Existem inúmeras vantagens advindas do desenvolvimento da tecnologia 3D na construção, incluindo aspectos econômicos, ambientais e de segurança. O custo de impressão dos elementos de construção é muito menor do que os métodos tradicionais de construção. Além disso, o tempo necessário para concluir uma edificação pode ser consideravelmente reduzido. Processos de construção ecologicamente corretos também podem ser facilmente introduzidos com o uso de matérias-primas recicladas, tal como resíduos de construção e industriais. Somado a isso, a construção de edificações por impressão 3D minimiza a geração de resíduos e poeira em comparação com os métodos tradicionais. Finalmente, ferimentos e fatalidades podem ser evitados uma vez que as impressoras poderão fazer os trabalhos mais arriscados [2].

Estima-se que os custos dos projetos de construção relacionados à projeção dos moldes para o lançamento do concreto nas obras variam entre 35% e 60% do custo total da obra. Nesse sentido, o sucesso da aplicação das impressoras 3D na indústria da construção pode ter um impacto enorme no custo total da obra. Uma vez que para a impressão não é necessário a utilização de formas e escoramentos precedendo o lançamento do concreto, o tempo de execução é muito mais curto devido ao trabalho contínuo feito pela impressora. Assim, uma redução drástica no custo e tempo de execução do projeto pode ser obtida pela adoção da técnica de impressão 3D na indústria da construção [3–6]. De fato, a tecnologia de impressão de concreto vem chamando muita atenção na última década, com inúmeras iniciativas, tanto na área acadêmica como empresarial.

Os fatores de influência essenciais relacionados a viabilidade desta técnica de construção, que é muito promissora, porém ainda em estágio de maturação são, basicamente: as propriedades reológicas dos ligantes, o procedimento de mistura, o intervalo de deposição/impressão entre as camadas, a distância de afastamento do bico de impressão e a camada subjacente, a velocidade de impressão, a umidade e temperatura ambiente, a relação água/cimento das misturas, entre outros [2,7].

Nesse contexto, este estudo traz resultados preliminares da influência da razão água/cimento (a/c) na capacidade de suporte de carga, ou edificabilidade, de pastas cimentícias projetadas para impressão 3D.

Diferente das técnicas convencionais, na qual se conhece as propriedades reológicas de concretos, tal como por teste de abatimento (*slump*), adequadas para cada aplicação/estrutura, não há padronização ou recomendações específicas para misturas destinadas a impressão 3D. Sendo assim, para além do efeito da razão a/c , este trabalho

visa encontrar essa correlação entre a capacidade de suporte de carga (sobreposição de camadas) e a consistência, determinada especificamente por teste de abatimento, um ensaio simples e de baixo custo, facilitando assim sua difusão em larga escala, inclusive no canteiro de obras.

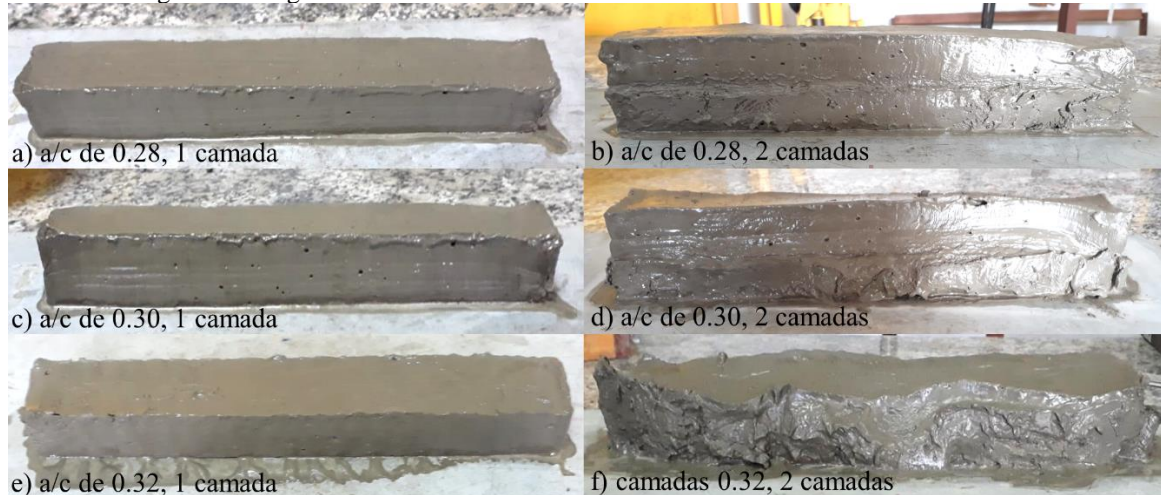
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção das pastas cimentícias, foi utilizado um cimento Portland CP V ARI RS. Misturas com cerca de 2 kg de cimento e água (razões a/c de 0,28, 0,30 e 0,32) foram preparadas em uma argamassadeira (Solotest) por 3 min na velocidade 2 (125 rpm) e moldadas em moldes prismáticos, com base retangular (4 cm de largura, 15 cm de comprimento e 4 cm de altura). Camadas (inicialmente duas) foram sobrepostas manualmente e avaliadas quanto a deformabilidade (medidas de largura da base e altura) com um paquímetro analógico (ZAAS, precisão de 0,05 mm), bem como a coesão. A deformabilidade foi avaliada em 2 amostras de cada composição, sendo retiradas 3 medidas ao longo de cada amostra (laterais e centros). As mesmas pastas também foram avaliadas quanto a sua fluidez/consistência utilizando uma mesa de espalhamento (*flow table*). Neste ensaio, as amostras foram inseridas em um molde cônico de polipropileno com altura de 40 mm, diâmetro inferior de 80 mm e diâmetro superior de 70 mm (mesmo molde utilizado para o teste de Vicat, conforme a norma NBR NM 65), estando este posicionado sobre a mesa de espalhamento. Foram realizados testes com 10 e 20 golpes para escoamento do material. A abertura média das misturas foi averiguada utilizando um paquímetro (Mitutoyo, precisão de 0,01 mm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 mostra fotografias de filamentos produzidos com diferentes razões a/c com 1 e 2 camadas. Nota-se que o teor de água tem pouca influência na capacidade de autossustentação das pastas (1 camada). No entanto, o cenário muda com a sobreposição de 2 camadas, especialmente para razão a/c de 0,32. Neste caso, as camadas se deformam devido à baixa capacidade de suporte de carga.

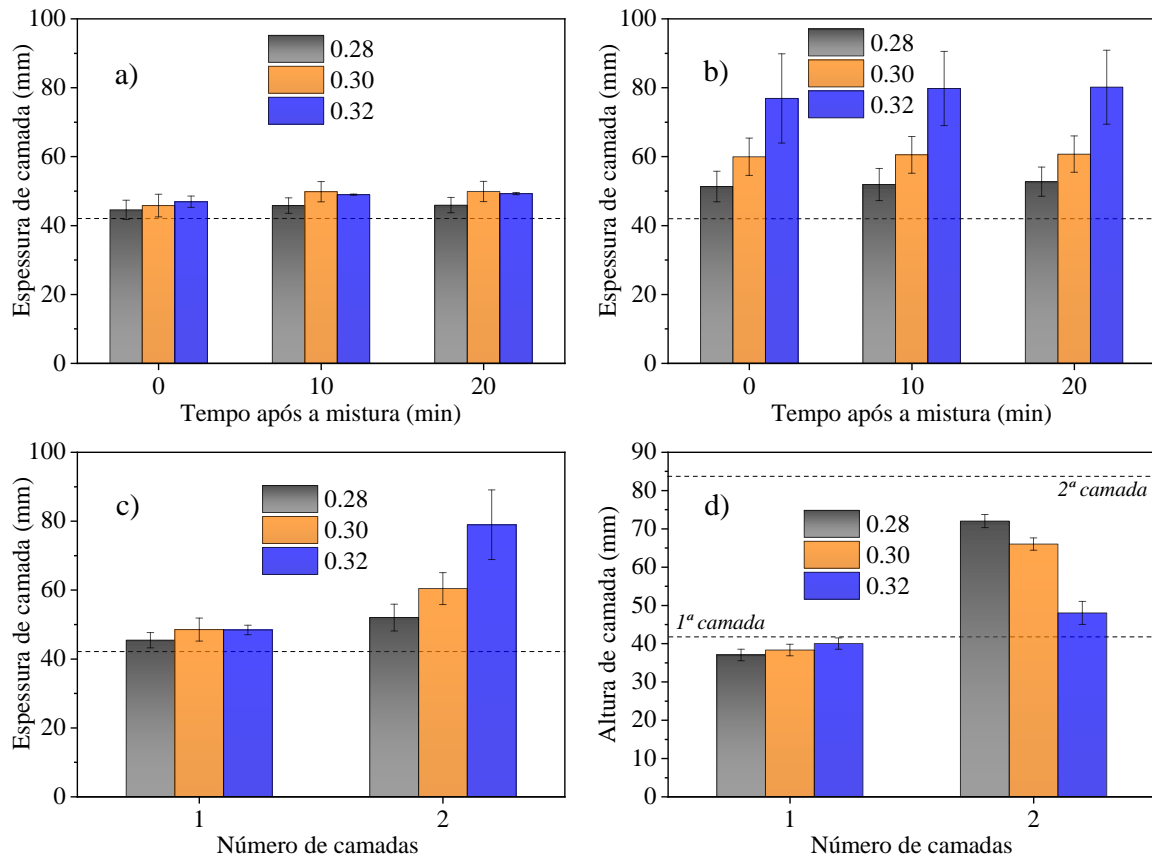
Figura 1. Fotografias dos filamentos com diferentes razões a/c com 1 e 2 camadas.



A Figura 2 mostra a espessura e altura dos filamentos supracitados. A Figura 2a e 2b mostra a influência do tempo na largura da base dos filamentos. Como mostrado, há pouca variação da espessura nos primeiros 20 min de hidratação. A Figura 2c destaca a influência da espessura da base em função do número de camadas. Com apenas 1 camada, a espessura da base das camadas é próxima, e levemente acima da espessura do molde. Com 2 camadas, no entanto, o filamento inferior tende a ceder, aumentando a espessura da base (42 mm) proporcionalmente à razão a/c. Para razão a/c de 0,28, a espessura aumenta de ~45 mm para 52 mm (+14%), para a/c de 0,30 a espessura aumenta de ~48 mm para ~60 mm (+24%) e para a/c de 0,32 aumenta de ~48 mm para ~79 mm (+64%).

O mesmo observa-se para a variação de altura das camadas. Como a variação da espessura do filamento foi pequena com apenas 1 camada, a variação de altura também foi pequena. Para 2 camadas, a redução de altura em comparação a altura máxima (2x a altura do molde, ou seja, 84 mm) foi de 14% para a razão a/c de 0,28, ~21% para a/c de 0,30 e 43% para a/c de 0,32. Portanto, para definição do teor de água que garanta a consistência e suporte de carga não se deve levar em consideração a capacidade de autossustentação (apenas 1 camada), e sim duas ou mais camadas.

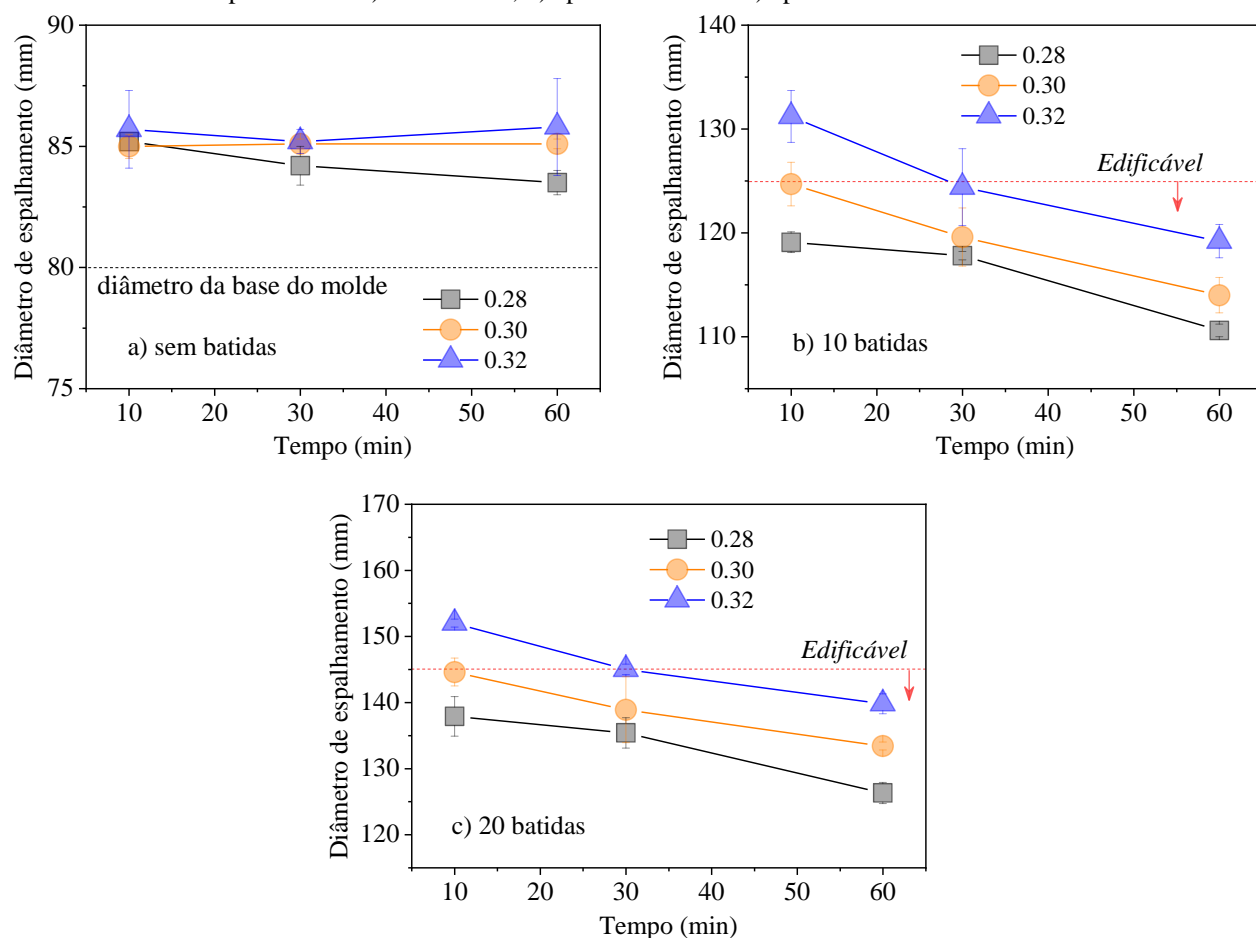
Figura 2. Espessura dos filamentos com o tempo para diferentes razões a/c com a) 1 camada e b) 2 camadas; e variação da c) espessura e d) altura em função do número de camadas para as mesmas pastas. As linhas horizontais tracejadas representam a espessura ou altura do molde.



A Figura 3 mostra o diâmetro de espalhamento das pastas com diferentes razões a/c em função do tempo na mesa de espalhamento a) sem batidas, b) com 10 batidas e c) com 20 batidas. Como as pastas tem capacidade de autossustentação para todas as razões a/c, a variação da abertura de espalhamento é insignificante sem batidas.

Com 10 e 20 batidas é possível observar melhor as variações de espalhamento (e consistência) das pastas. Considerando que a amostra com razão a/c de 0,32 apresentou baixa capacidade de suporte de carga, sugere-se que as pastas devem apresentar diâmetros de espalhamentos inferiores a 125 mm para 10 batidas ou inferiores a 145 mm para 20 batidas para tornar-se edificável, ou seja, desenvolver uma capacidade de suporte de carga mínima (2 camadas).

Figura 3. Diâmetro de espalhamento das pastas com diferentes razões a/c em função do tempo na mesa de espalhamento a) sem batidas, b) após 10 batidas e c) após 20 batidas.



Também vale ressaltar a redução do diâmetro de espalhamento com o tempo devido a estruturação das amostras com a evolução da hidratação. O ritmo de estruturação mostrou-se parecido para as três razões testadas. A redução do diâmetro de espalhamento das pastas para o ensaio com 20 batidas foi de 0,23 mm/min, 0,22 mm/min e 0,24 mm/min para a/c de 0,28, 0,30 e 0,32, respectivamente. Nesse contexto, pode-se esperar que a pasta com a/c de 0,32 adquira mínima capacidade de suporte de carga e torne-se edificável após cerca de 30 min de hidratação.

Portanto, o ensaio em flow table mostrou-se viável para estimar a capacidade de suporte de carga de misturas cimentícias. Tay and Tan (2019) [8] também usaram medidas de espalhamento para avaliar a capacidade de impressão de argamassas, porém usando um molde com 300 mm de altura e diâmetros inferior e superior de 200 mm e 100 mm, respectivamente, e com 25 batidas (norma ASTM C230). Segundo os autores, misturas com um espalhamento entre 150 e 190 mm apresentaram uma superfície lisa e alta capacidade de construção.

4 CONCLUSÕES

Pequenas variações na razão a/c das pastas cimentícias exercem grande influência na capacidade de suporte de carga. Enquanto todas os teores testados (a/c de 0,28, 0,3 e 0,32) mostraram-se moldáveis e autossustentáveis, ou seja, capazes de manter a forma moldada, apenas a razão a/c 0,28 mostrou-se capaz de suportar dois filamentos sobrepostos sem alterações dimensionais significativas no filamento inferior.

A estabilidade de estruturas com 2 camadas difere-se significativamente de estruturas com apenas 1 camada. Todas as amostras mostram-se estáveis com 1 camada. Contudo, com uma razão a/c de 0,32 e 2 camadas, nota-se que a estrutura colapsa. A estabilidade das estruturas mostra-se, aparentemente, estável quando o diâmetro de espalhamento esteja próximo de 115 mm para 10 batidas ou 130 mm para 20 batidas. Nesse sentido, sugere-se que mesmo a pasta com razão a/c de 0,32 pode tornar-se estável com um tempo de deposição entre as camadas de 60 min.

Não foi possível produzir pastas com razões água/cimento inferiores a 0,28 para averiguação da capacidade de suporte de carga (sobreposição de camadas). No entanto, a capacidade de suporte de carga pode ser potencialmente aprimorada frente a contribuição de aditivos químicos, tais como aceleradores de pega. Também se faz interessante avaliar o suporte de carga para tempos de deposição maiores entre cada filamento. Estes fatores serão avaliados em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- [1] I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz, 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?, *Procedia Eng.* 151 (2016) 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>.
- [2] M.T. Souza, I.M. Ferreira, E. Guzi de Moraes, L. Senff, A.P. Novaes de Oliveira, 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101833. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101833>.
- [3] N. Labonnote, A. Rønquist, B. Manum, P. Rüter, Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Autom. Constr.* 72 (2016) 347–366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>.
- [4] Alec, Dubai opens world’s first 3D printed “Office of the Future”, completed in just 17 days, (2016). <https://www.3ders.org/articles/20160524-dubai-opens-3d-printed-office-of-the-future-completed-in-just-17-days.html> (accessed July 27, 2020).
- [5] G. Ji, T. Ding, J. Xiao, S. Du, J. Li, Z. Duan, A 3D printed ready-mixed concrete power distribution substation: Materials and construction technology, *Materials (Basel)*. 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12091540>.
- [6] V. Mechtcherine, J. Grafe, V.N. Nerella, E. Spaniol, M. Hertel, U. Füssel, 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour, *Constr. Build. Mater.* 179 (2018) 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202>.
- [7] M. Tramontin Souza, I. Maia Ferreira, E. Guzi de Moraes, L. Senff, S. Arcaro, J.R. Castro Pessôa, M. J. Ribeiro, A.P. Novaes de Oliveira, Role of chemical admixtures on 3D printed Portland cement: Assessing rheology and buildability, *Constr. Build. Mater.* 314 (2022) 125666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125666>.
- [8] Y.W.D. Tay, Y. Qian, M.J. Tan, Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test, *Compos. Part B Eng.* 174 (2019) 106968. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106968>.