

ANÁLISE COMPARATIVA DE MISTURA PRODUZIDAS COM AREIA NATURAL E ARTIFICIAL NAS PROPRIEDADES DE UMA ARGAMASSA 3D

Raimara Araújo Lima (PUC Goiás) E-mail: raimara.araujo1@gmail.com
Ana Paula Martins Gonçalves Silva (PUC Goiás) E-mail: aninhapm7@gmail.com
Marcela Luiza Xavier Monteiro (PUC Goiás) E-mail: marcelaluiza579@hotmail.com
Epaminondas Luiz Ferreira Jr (PUC Goiás) E-mail: epaminondas@pucgoias.edu.br
Marcos Lajovic Carneiro (PUC Goiás) E-mail: mcarneiro@pucgoias.edu.br

Resumo: O uso das tecnologias de automação melhora o desempenho das indústrias de construção civil por meio da otimização de seus processos. Estudos sobre a aplicação da impressão 3D na construção têm crescido muito nos últimos anos devido às características únicas desse processo, como: redução de custo, versatilidade, mínimo desperdício e ausência de fôrmas. Contudo, um dos problemas da técnica consiste na determinação de uma argamassa com consistência adequada durante o processo de impressão e que depois de seca apresenta também uma resistência adequada. Neste trabalho foram avaliadas as características no estado fresco (plasticidade e tempos de pega) e no estado endurecido (resistência a compressão) de argamassas para impressão 3D produzidas a partir de dois tipos de areia: natural de rio e artificial. Para uma comparação dos diferentes traços, foram feitos ensaios de mesa de fluxo e de Vicat e moldadas amostras cilíndricas de argamassa para determinação da resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias. A partir da análise dos resultados obtidos, este artigo descreve, dentre os dois tipos de areias utilizadas na pesquisa, a que mais se adequa aos parâmetros da impressão 3D.

Palavras-chave: Ensaios, resistência mecânica, fluidez, tempo de pega, argamassa 3D.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MIXTURES PRODUCED WITH NATURAL AND ARTIFICIAL SAND IN THE PROPERTIES OF A 3D MORTAR

Abstract: The use of automation technologies improves the performance of construction industries by optimizing their processes. Studies on the application of 3D printing in construction have grown a lot in recent years due to the unique characteristics of this process, such as: cost reduction, versatility, minimal waste and absence of forms. However, one of the problems of the technique is the determination of a mortar with adequate consistency during the printing process and which, after drying, also presents an adequate resistance. In this work, the characteristics in the fresh state (plasticity and setting times) and in the hardened state (compressive strength) of mortars for 3D printing produced from two types of sand were evaluated: natural river and artificial. For a comparison of the different traits, flow table and Vicat tests were carried out and cylindrical mortar samples were molded to determine the compressive strength at the ages of 7 and 28 days. From the analysis of the results obtained, this article describes, among the two types of sand used in the research, the one that is most suitable for the parameters of 3D printing.

Keywords: Tests on 3D mortar, mechanical strength, 3D mortar fluidity, setting time, 3D mortar.

1. Introdução

Uma técnica da indústria robótica, conhecida como manufatura aditiva, tem sido utilizada para manipular argamassa ou concreto por meio de extrusão, tem crescido muito na última década. A edificação impressa pode melhorar a velocidade e a qualidade da construção, além de eliminar a necessidade de fôrmas, resultando na redução de custo, de tempo e aumentando a liberdade para construir geometrias complexas (ARUNOTHAYAN et al., 2020).

Para uma construção digital bem-sucedida, o material cimentício deve possuir características específicas para adequar aos parâmetros de impressão tais como: possuir baixa viscosidade para permitir o fluxo durante o bombeamento, e alta tensão de escoamento para evitar a deformação do material após a deposição das camadas. E paralelamente, a argamassa deve endurecer rapidamente após impressa para sustentar o peso das camadas subsequentes (PERROT et al., 2016). A granulometria também deve ser controlada, ou seja, não deve possuir agregados graúdos (dimensões acima de 4,75 mm) para que a segregação da massa na mangueira e o entupimento do bico da extrusora sejam evitados (JAYATHILAKAGE et al., 2019).

Dessa forma, pesquisadores estudam misturas alternativas para atender e certificar as propriedades de resistência e segurança dos materiais cimentícios impressos e analisar as características do fluxo da massa para então projetar seu comportamento (MEURER & CLASSEN, 2021). Assim, a mistura e seus constituintes devem ser submetidos a ensaios preliminares para definir as propriedades reológicas e mecânicas da mesma (RAHUL et al., 2019).

Também, a fluidez é um parâmetro importante, pois está ligado a facilidade da impressão da argamassa, ou seja, garante que ela seja bombeada e extrudada sem ocasionar bloqueio do bico da impressora. Entretanto, a análise desse parâmetro deve ser feita para controlar sua consistência, visto que essa não deve ser fluida demais ao ponto de não conseguir manter sua forma e nem rígida demais, para que consiga ser bombeada (RAHUL et al., 2019).

Neste contexto, o tempo de pega está relacionado às fases do processo de endurecimento da pasta cimentícia, e na perspectiva da manufatura aditiva equivale ao tempo necessário para que a massa mantenha sua forma até receber camadas subsequentes (HOSSEINI et al., 2019). Essas características têm efeito primordial na ligação entre as camadas impressas, bem como, na taxa de penetração entre elas (SHAKOR et al., 20219). O tempo de pega inicial consiste no momento de início do endurecimento da massa, e denota uma rigidez suficiente para suportar determinada força, é o momento então que se nota o início da perda de sua plasticidade. De outra forma, o tempo de pega final, consiste no momento em que se inicia o desenvolvimento de rigidez e resistência, quando a plasticidade é totalmente perdida (ZHU et al., 2018).

Em síntese, a capacidade de impressão depende da trabalhabilidade (fluidez), das proporções das misturas, do tempo de pega prolongado durante o bombeamento da mistura e a argamassa precisa que suas propriedades sejam apropriadas para alcançar o seu desempenho, ou seja, a mesma deve atender aos requisitos de capacidade de absorver deformações, estanqueidade e resistência mecânica (GARCÍA-CUADRADO et al., 2017), (JI et al., 2019).

Dessa forma, o presente trabalho avaliou por meio de ensaios a caracterização do comportamento fresco e mecânico da argamassa utilizando areia natural e artificial, dessa forma verificou-se qual se adapta mais aos parâmetros da construção digital.

O estudo compreende três etapas. Na primeira etapa, a fluidez das misturas é avaliada, de acordo com resultados e revisões encontrados na literatura. A segunda etapa consiste em analisar o tempo de pega. A terceira avalia a resistência mecânica de ambas as misturas, os resultados são comparados com valores de resistência da argamassa moldada por outros autores. Por fim, fundamentado nos resultados obtidos no estudo, são fornecidas propriedade da mistura considerada adequada para impressão 3D.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais componentes da mistura:

Nessa pesquisa foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), com massa específica de $2,98 \text{ g/cm}^3$ (NBR 5733-ABNT,1991), (NBR NM 23- ABNT, 2000). Para a primeira investigação foi realizado uma mistura (M1) contendo areia natural de rio, cujas características estão apresentadas na Tabela 1. A mistura obedeceu às seguintes proporções: 1:2,5:0,59 (cimento: areia: água), e apresentou uma densidade de $2,075 \text{ kg/dm}^3$. Para a segunda investigação foi utilizado areia artificial (M2), na seguinte proporção: 1:2,5:0,66, a qual obteve uma densidade de $2,063 \text{ kg/dm}^3$ (NBR16972-ABNT,2021), (NBR 52- ABNT, 2009), NBR 9833- ABNT,2008). Para evitar a segregação dos materiais e aumentar a viscosidade da mistura, foi adicionado um superplastificante com base química de policarboxilato. As proporções das misturas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Propriedades básicas da areia

Areia	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura	Massa específica g/cm^3	Massa unitária kg/dm^3
Areia natural	1,20	1,30	2,62	1,30
Areia superficial	1,20	1,26	2,67	1,20

A dimensão máxima das partículas de areia natural e areia artificial empregadas neste estudo foi de 1,20 mm determinada conforme a NBR 248 (ABNT, 2003), e a distribuição dos seus grãos está representada pela curva granulométrica (ZU- zona utilizável e ZO- zona ótima), que é ilustrada na Figura 1.

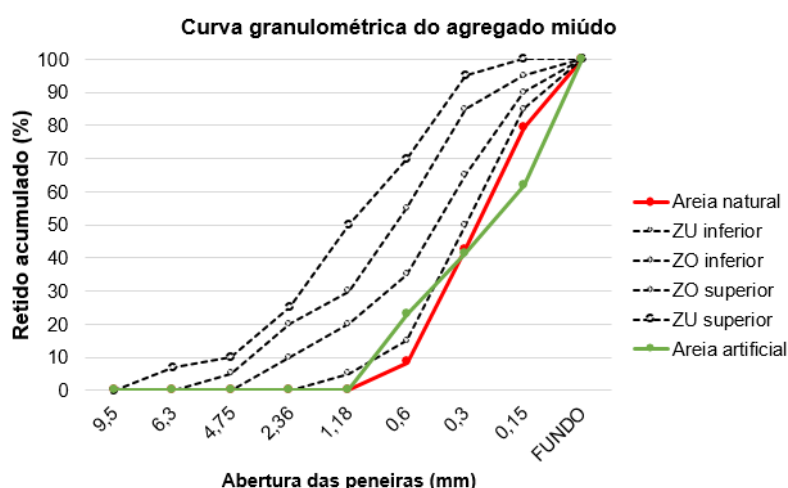


Figura 1 – Limite de distribuição granulométrica:

Observa-se na Figura 1 que a granulometria da areia estudada se enquadra fora das zonas utilizáveis para concreto, conforme NBR 7211 (ABNT, 2009), denotando que são areias finas, de maior área superficial, o que é ótimo para argamassa que é o objeto de estudo.

2.2. Avaliação da Fluidez

A fluidez foi investigada por meio do método de consistência, empregando o equipamento mesa de fluxo conforme NBR 13276 (ABNT, 2016). Para esse ensaio preenche-se um molde de cone com a mistura cimentícia, em três camadas com compactação de cada camada com 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Em seguida, remove-se o cone, e então inicia-se a rotação da manivela. Essa rotação irá proporcionar movimentos verticais de queda da mesa, 30 vezes no tempo de 30 segundos, como mostrado na Figura 2.



Figura 2 – Avaliação da fluidez: (a) mesa de fluxo, (b) espalhamento da massa

Com auxílio do paquímetro, é medido o espalhamento da massa a partir de três diâmetros tomados em pares uniformemente distribuídos ao longo do perímetro, fornecendo uma medida quantitativa da fluidez da pasta de cimento fresca.

2.3. Avaliação do tempo de pega

As diretrizes utilizadas para a medição dos tempos de pega são embasadas no teste de resistência à penetração para concreto ou argamassa, por meio do teste de agulha Vicat, de acordo com a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003). O aparelho de Vicat possui um suporte com uma haste de metal inoxidável e móvel com peso fixo de 300 gramas, no qual em um extremo contém uma sonda – Sonda de Tetmajer e do outro extremo uma agulha de 1 mm – Agulha de Vicat, como exibido na Figura 3.

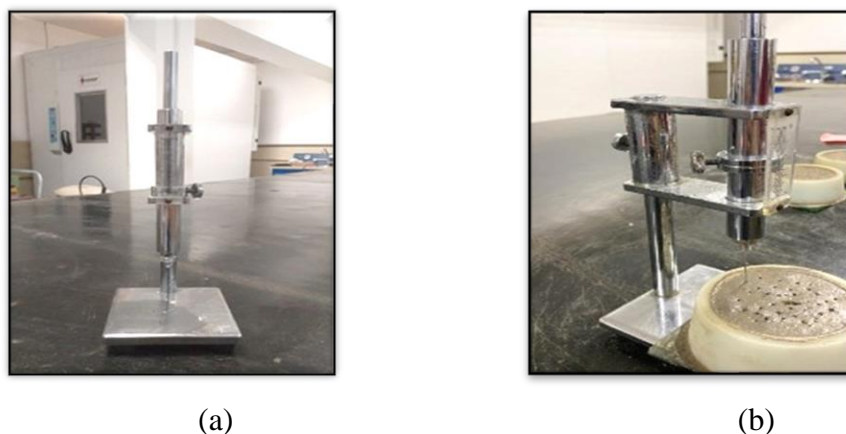


Figura 3 – Avaliação dos tempos de pega: (a) Aparelho de Vicat, (b) penetração da agulha

Basicamente, o teste consiste na medição da penetração da agulha a uma profundidade essencial que cai por causa da gravidade. O tempo de pega inicial é o tempo decorrido em que o cimento entra em contato com a água até o momento em que a agulha de Vicat estaciona a uma profundidade de 4 ± 1 mm da placa base. Por outro lado, o tempo de pega final consiste no intervalo de tempo decorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta (NBR NM 65-ABNT,2003).

2.4. Avaliação da resistência à compressão

Os testes de resistência mecânica foram realizados em uma máquina de ensaio universal, basicamente constituída por mesa móvel ou travessão móvel, dispositivos de fixação dos corpos de prova, colunas de sustentação os fusos e a base, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4 – Avaliação resistência mecânica: (A) máquina de teste universal, (B) e (C) corpo de prova moldados

A força aplicada ao corpo de prova é então medida, juntamente com a deformação da amostra durante a aplicação da carga. Para esse ensaio foram moldados 12 corpos cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme NBR 5738 (ABNT,1994). Após a moldagem, as amostras foram mantidas em câmara úmida até a data de ensaio. O ensaio de compressão foi realizado nas idades de 7 e 28 dias de acordo com a NBR 13279 (ABNT/2005).

3. Resultado e discussão

3.1. Fluidez

A Figura 5 ilustra os resultados do teste da mesa de fluxo das misturas cimentícias.

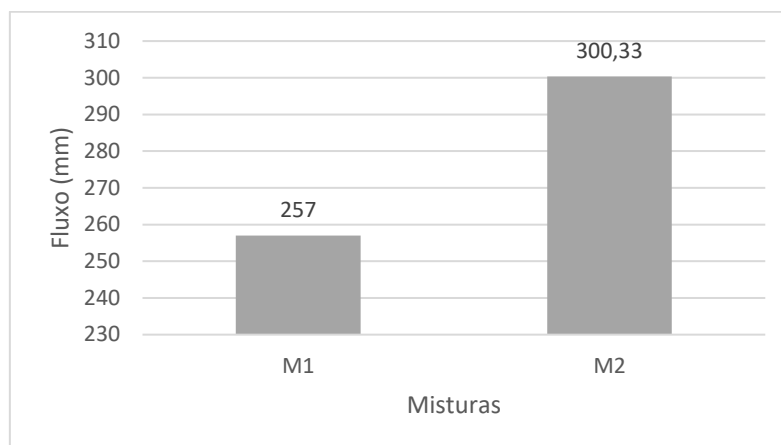


Figura 5 – Valor médio do diâmetro de espalhamento do teste da mesa de fluxo

Observa-se na Figura 5 que a mistura M2 apresentou um espalhamento na mesa de fluxo maior do que a M1, o que caracteriza ser uma mistura mais fluida. Segundo Alonso et al., (2017), o diâmetro alcançado como resultado das medições ou espalhamento da amostra fornece informações a respeito da trabalhabilidade da argamassa. O diâmetro menor que 140 mm indica consistência seca, e valores maiores que 200 mm indicam uma consistência fluida, o que sugere uma amplitude mais apropriada para impressão e dessa forma, a M2 possui uma melhor característica para ser bombeada. No entanto, há de se ressaltar que a argamassa para impressão 3D, não deve ser muito fluida, e precisar ser moderadamente viscosa (MA et al., 2020). Em contrapartida a M1, de consistência mais seca, possui maior rigidez para suportar camadas depositadas.

Os autores Zang et al., (2019) em seu estudo sobre as propriedades reológicas em concreto de impressão 3D de alta tixotropia, obtiveram resultados de espalhamento com diâmetro de 192,5 e 269 mm. Esses autores afirmam que essa faixa de espalhamento é ideal para fluidez e paralelamente para manter sua forma e garantir a sustentação das camadas impressas após a extrusão. Corroborando com esses valores ideais de fluidez, os autores Ashrafi et al., (2021), utilizaram uma argamassa com diâmetro de 232,5 mm, e utilizaram como composição da mistura Calcário pulverizado, celulose e cal.

3.2. Tempos de pega

Os tempos de pega das misturas utilizadas nesse estudo foram registrados em minutos, os resultados são apresentados na Tabela 2

Tabela 2 – Tempos de pega das misturas M1 e M2

Mistura	Tempo inicial (min)	Tempo final (min)
M1	130	490
M2	80	380

Percebe-se pelos dados apresentados na Tabela 2 que, tanto o tempo de início quanto do final de pega, apresentou-se valores bastante prolongados. Essa é uma necessidade para construções de grande escala, pois reduz a possibilidade de a secagem do material cimentício dentro da mangueira durante o bombeamento, dessa forma evita a segregação

e entupimento do bico da extrusora. A Mistura M2 composta por areia artificial por sua vez, obteve os tempos de pega inicial e final, menores do que a Mistura M1 a qual continha areia natural. Isso se deve ao fato de que, o consumo de cimento da Mistura M1 (532 kg de cimento/m³ de argamassa) ser maior do que na Mistura M2 (518 kg de cimento/m³ de argamassa), ainda que M2 contenha maior quantidade de água na sua mistura.

No entanto, em impressões feitas em laboratórios, onde se trabalha com pequenos volumes, sugere-se que o tempo de pega deve ser reduzido para que a primeira camada impressa consiga receber as camadas empilhadas consecutivas sem ocasionar deformação (GUO et al., 2020).

Sharma et al., (2020) examinaram o efeito do tempo de pega da argamassa usando ácido iminodiacético como aditivo químico. Esses autores obtiveram para as suas misturas, tempo de pega inicial de 418 min e final de 630 min. Polat et al., (2017) utilizando o aditivo redutor de água, alcançou o tempo de pega inicial 255 - 303 min e final de 352-390 min. De outro modo, Kumar, (2019), sem utilizar qualquer tipo de aditivos químicos, alcançou valores de iniciais de 214,42- 337,98 min e finais de 360- 465,78 min.

Embora haja uma contribuição efetiva dos aditivos nessa propriedade, essas variações quanto aos tempos de pega são fundamentalmente controladas pelo tipo de cimento utilizado, baseado na quantidade de clínquer e finura do cimento Portland.

3.3. Resistência à compressão

Os resultados do teste de resistência à compressão das misturas M1 e M2 são apresentados na Figura 6.

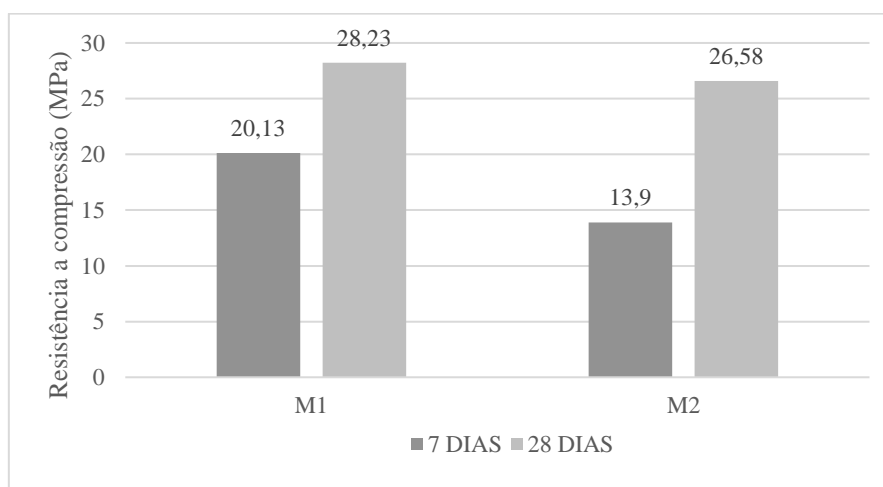


Figura 6 – Resultados de resistência à compressão

A partir da Figura 6 apresentada, nota-se uma grande diferença nos resultados de resistência à compressão das Misturas em ambas as idades. Para a idade de 7 dias, a amostra M1 apresentou resultado de 20,13 MPa, de outra forma, a Mistura M2 obteve 13,90 MPa. Isso demonstra que a argamassa contendo areia natural obteve 69% a mais de resistência do que a areia artificial. Ao atingir a idade de 28 dias a amostra M1 obteve uma resistência 73% maior que a argamassa M2. Isso ocorreu pelo fato da areia artificial ser mais fina do que a areia natural, e por essa razão precisa-se de mais água na sua composição para adquirir uma trabalhabilidade razoável, reduzindo assim a sua resistência mecânica. Dessa forma, para uma construção impressa sugere-se a utilização

de areia natural por possuir ótima relação agregado/ligante, o que é preferível para o projeto de argamassa extrudada (SARUHAN et al., 2022). Por se tratar de uma construção que a o sistema construtivo necessita de resistência estrutural, uma mistura ideal deve possuir maior resistência possível, e o estudo dessa propriedade ainda carece de estudos aprofundados (MECHTCHERINE et al., 2018).

Nos estudos realizados por Panda et al., (2017) sem utilização de nenhum reforço em sua mistura cimentícia, os mesmos alcançaram uma resistência de 20-22 MPa na idade de 7 dias e 34-37 MPa na idade de 28 dias, com a utilização de escória granulada de alto forno na composição, visto que, esse geopolímero apresenta alta resistência à compressão e durabilidade em diversos ambientes.

Os pesquisadores Wi et al., (2020), em seus experimentos sobre as propriedades da argamassa 3D à base de extrusão, atingiram o resultado de 67 MPa na idade de 28 dias. Weng et al., (2018) também sem utilizar qualquer tipo de reforço, obtiveram resistência de 27-37 MPa na idade de 7 dias e 41-62 na idade de 28 dias.

4. Conclusão

O artigo apresentou uma comparação de misturas para impressão 3D, produzidas com areia natural de rio e areia artificial. As propriedades no estado fresco foram avaliadas pela medida da consistência na mesa de fluxo e pelos tempos de pega. Para determinação das propriedades mecânicas, foram moldados 12 corpos de provas e rompidos nas idades de 7 e 28 dias. Após análise dos resultados verificou-se que a Mistura M1 feita a partir da utilização de areia natural de rio, obteve os melhores resultados de resistência mecânica, bem como valores razoáveis de consistência e tempo de pega. Tais fatores podem ser atribuídos à menor necessidade da areia natural em obter uma consistência satisfatória com uma menor relação água/cimento. Esse é um parâmetro de proporção significativo que é capaz de afetar toda a mistura. Além disso, a composição granulométrica também deve ser considerada como um requisito fundamental para a mistura em argamassas 3D, visto que as suas características granulométricas, como dimensão máxima característica e módulo de finura são essenciais para evitar a segregação e entupimento do bico da impressora.

Recomendações futuras

Recomenda-se para trabalhos futuros a utilização dos mesmos traços, areia natural e artificial utilizados nesse estudo, para aplicação dos testes de extrudabilidade e capacidade de construção, a fim de verificar o comportamento da massa para esses parâmetros.

Agradecimentos

A equipe de pesquisa agradece o financiamento pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

ALONSO, M.M.; GISMERA, S.; BLANCO, M.T.; LANZÓN, M.; PUERTAS, F. *Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour*. Construction and Building Materials, Vol. 145, p. 576-587, 2017.

ARUNOTHAYAN, A. R.; NEMATOLLAHI, B.; RANADE, R.; BONG, S.H.; SANJAYAN, J. *Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction*. Construction and Building Materials, Vol. 257, p. 119546, 2020., p. 119546, 2020.

ASSOCIAÇÃO MERCOSU DE NORMALIZAÇÃO – **MERCOSU NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 65: Cimento portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 9833: Concreto fresco- Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gavimétrico.** Rio de Janeiro, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 5733: Cimento Portland de alta resistência.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASHRAFI, N.; NAZARIAN, S.; MEISEL, N.A; DUARTE, J.P. *Experimental prediction of material deformation in large-scale additive manufacturing of concrete.* Additive Manufacturing, Vol. 37, p. 101656, 2021.

CHEN, Y.; HE, S.; GAN, Y.;ÇOPUROGLU, O.;VER, F.; SCHLANGEN, E. *A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing.* Journal of Building Engineering, Vol. 45, p. 103599, 2022.

GARCÍA-CUADRADO, J.; RODRÍGUES, A.; CUESTA, I.I.; CALDERÓN, V.; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S. *Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags.* Construction and Building Materials, Vol. 138, p. 204-213, 2017.

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.

HOSSEINI, E.; ZAKERTABRIZI, M.; KORAYEM, H.; XU, G. *A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation.* Cement and Concrete Composites, Vol. 99, p. 112-119, 2019.

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.; DING, T.; XIAO, J; DU, S.; LI, J.; DUAN, Z. *A 3D printed ready-mixed concrete power distribution substation: Materials and construction technology.* Materials, Vol. 12, p. 1540, 2019.

KUMAR, G. S. *Influence of fluidity on mechanical and permeation performances of recycled aggregate mortar.* Construction and Building Materials, Vol. 213, p. 404-412, 2019.

MA, G.; SALMAN, N. M.; WANG, L. W. F. *A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing.* Construction and Building Materials, Vol. 244, p. 118305, 2020.

MECHTCHERINE, V.; GRAFE, J.; NERELLA, V.N.; SPANIOL, E.; HERTEL, M.; FUSSEL, U.

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.

PANDA, B.; PAUL, S.C.; HUI, L.J.; TAY, Y.W.D.; TAN, M.J. *Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment.* Journal of cleaner production, Vol. 167, p. 281-288, 2017.

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

POLAT, R.; DEMIRBOĞA, R.; KARAGÖLA, F. *The effect of nano-MgO on the setting time, autogenous shrinkage, microstructure and mechanical properties of high performance cement paste and mortar.* Construction and Building Materials, Vol. 156, p. 208-218, 2017.

RAHUL, A. V.; SANTHANAM, M.; MEENA, H.; GHANI, Z. *3D printable concrete: Mixture design and test methods.* Cement and Concrete Composites, Vol. 97, p. 13-23, 2019.

SARUHAN, V.; KESKINTES, M.; FELEKOĞLU, B. *A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications.* Construction and Building Materials, Vol. 337, p. 127629, 2022.

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.

SHARMA, P.; SHARMA, N.; SINGH, P.; VERMA, M.; PARIHAR, H.S. *Examine the effect of setting time and compressive strength of cement mortar paste using iminodiacetic acid.* Materials Today: Proceedings, Vol. 32, p. 878-881, 2020.

WENG, Y.; LI, M.; TAN, M.J.; QIAN, S. *Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model.* Construction and Building Materials, Vol. 163, p. 600-610, 2018.

WI, K.; WAANG, K.; TAYLOR, P.C.; LAFLAMM, S.; SRITHARAN, S.; QIN, H. *Properties and microstructure of extrusion-based 3D printing mortar containing a highly flowable, rapid set grout.* Cement and Concrete Composites, Vol. 124, p. 104243, 2021.

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; SHE, W.; YANG, L.; GUOJIAN, L.; YANG, Y. *Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete.* Construction and Building Materials, Vol. 201, p. 278-285, 2019.

ZHU, J.; CAO, J.N.; BATE, B.; KHAYAT, K.H. *Determination of mortar setting times using shear wave velocity evolution curves measured by the bender element technique.* Cement and Concrete Research, Vol. 106, p. 1-11, 2018.