

REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO EM FORMULAÇÕES PARA IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO (3DCP) PELA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PORCELANATO POLÍDO

Pyetra Haime Maas, Gabriel Comerlato Costa; Gabriel Doerner; Samara Nazário; Larissa Dresch; Adilson Schackow; Paulo Matos

INTRODUÇÃO

A impressão 3D de concreto é uma técnica de manufatura aditiva que se desenvolveu rapidamente nos últimos anos, atingindo aplicações em diferentes escalas, incluindo a construção civil. A 3DCP apresenta vantagens como alta produtividade, diminuição do retrabalho, execução de geometrias complexas e dispensa do uso de formas. Apesar disso, um dos maiores desafios é controlar as propriedades reológicas do material: ele deve possuir tensão de escoamento e viscosidade moderadas, permitindo o bombeamento, enquanto apresenta comportamento tixotrópico elevado, garantindo estabilidade e manutenção da forma à medida que cresce verticalmente. Essas condições resultam em maior consumo de cimento e, consequentemente, maiores impactos ambientais. Nesse contexto, o Resíduo de Porcelanato Polido (RPP), um material fino com atividade pozolânica, surge como alternativa para substituição parcial do cimento. Estudos indicam que essa substituição pode manter desempenho em estado fresco equivalente ao de misturas tradicionais, utilizando aditivos superplastificantes adequados, e em alguns casos apresenta performance superior à adição de quartzo. Este trabalho investiga, pela primeira vez, o uso de RPP em formulações para impressão 3D de concreto, avaliando propriedades reológicas, *buildability*, resistência à compressão e microestrutura, comparando com uma mistura comercial disponível no mercado.

DESENVOLVIMENTO

Este estudo foi desenvolvido para misturas de 3DCP, com ênfase na avaliação do comportamento reológico e *buildability*. Para a elaboração das misturas, foram utilizados cimento Portland, RPP, sílica ativa, filer calcário e quartzo. O RPP foi adquirido de uma fábrica de cerâmicas em Santa Catarina (Brasil). Os materiais foram caracterizados por difração de raios X e fluorescência. Um superplastificante à base de naftaleno em pó foi utilizado. Além disso, uma mistura comercial de 3DCP foi testada para fins de comparação com as misturas avaliadas neste trabalho.

Testes de reometria rotacional e oscilatória foram conduzidos com pastas contendo de 0 a 40% de RPP, utilizando o Viscotester IG Air. Para o cisalhamento e medidas oscilatórias, utilizou-se um vane cilíndrico com superfície serrada, enquanto, para medidas estáticas de tensão de escoamento, um vane de quatro pás. O teste de cisalhamento consistiu em um pré-cisalhamento, seguido por uma curva de fluxo com diminuição da taxa de cisalhamento. Os testes foram conduzidos 10 e 100 minutos após a mistura. Para os testes de tensão de escoamento, uma taxa constante de cisalhamento foi aplicada por 60 segundos, registrando-se o pico de estresse após a pasta entrar em fluxo.

Os testes de 3DCP foram realizados utilizando um braço robótico de 6 eixos, com bico extrusor conectado a mangueira e bomba. A velocidade de impressão foi de 100 mm/s, e a vazão foi fixada em aproximadamente 2 L/min. A *buildability* das misturas foi avaliada através da

impressão constante de um cilindro com diâmetro de 350 mm e altura de camada de 10 mm, computando-se o número máximo de camadas suportadas antes do colapso.

Uma equação simplificada de emissão de CO₂ foi adotada, considerando a quantidade de CO₂ liberada por m³ de concreto para cada material: 0,8 para Cimento Portland, 0,05 para RPP, 0,02 para sílica ativa, 0,025 para calcário, 0,026 para areia, 0,5 para ambos os aditivos e zero para água; esses valores foram multiplicados pelo volume utilizado. Adicionalmente, os parâmetros de intensidade de emissão de CO₂ propostos por Damineli *et al.* foram aplicados, dividindo essas emissões pela resistência à compressão aos 28 dias.

RESULTADOS

Os testes oscilatórios forneceram os valores da tensão crítica (γ_{cr}): $2,0 \times 10^{-4}$ (0% RPP), $4,0 \times 10^{-4}$ (20% RPP) e $2,5 \times 10^{-4}$ (40% RPP), indicando que $\gamma_{cr} \geq 1 \times 10^{-4}$ para todas as amostras, em concordância com testes anteriores para sistemas à base de Cimento Portland. Além disso, a varredura temporal mostrou que a substituição parcial do cimento por RPP aumenta o módulo de elasticidade G' , em comparação com a mistura de controle. Por exemplo, ao final do teste de 60 minutos, o G' das amostras com 20% e 40% de RPP foi 62% e 98% maior do que o de 0% RPP, respectivamente.

Resultados dos testes reológicos e de impressão, antes e depois do *buildability test*, indicam que substituir até 40% do cimento por RPP não afeta a *buildability* nem a tensão de escoamento inicial das misturas, considerando a variabilidade do teste. Para a mistura comercial, a tensão de escoamento inicial medida por cada método foi significativamente menor (31% a 71%) do que nas misturas desenvolvidas neste estudo, enquanto a *buildability* foi 20% inferior. Esse comportamento pode ser parcialmente explicado pelas diferenças de densidade das misturas, que afetam a *buildability*, além das variações nos constituintes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No geral, substituir cimento por RPP permite misturas com tensão de escoamento e performance semelhantes às disponíveis no mercado, aumentando a taxa estrutural (permitindo maior produtividade vertical ao longo do tempo) e reduzindo o consumo de material cimentício para 295 kg/m³, com intensidades de CO₂ de até 12,7 kg CO₂-eq/m³ — em comparação ao concreto convencional. Esses resultados demonstram que a substituição do cimento por materiais alternativos em misturas de 3DCP é tecnicamente viável e possibilita a aplicação de um concreto mais sustentável.

Palavras-chave: Impressão 3D de concreto, 3DCP, Resíduo de polimento de porcelanato, Matérias Suplementares Suplementares, Reologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Chen, Z. Li, J. Li, C. Liu, C. Lao, Y. Fu, C. Liu, Y. Li, P. Wang, Y. He, 3D printing of ceramics: A review, *J Eur Ceram Soc* 39 (2019) 661–687. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>.
- [2] X. Zhang, M. Li, J.H. Lim, Y. Weng, Y.W.D. Tay, H. Pham, Q.C. Pham, Large-scale 3D printing by a team of mobile robots, *Autom Constr* 95 (2018) 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.004>.
- [3] T. Wangler, E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli, N. Roussel, R. Flatt, Digital concrete: Opportunities and challenges, *RILEM Technical Letters* 1 (2016) 67–75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>.
- [4] D. Lowke, A. Anton, R. Buswell, S.E. Jenny, R.J. Flatt, E.L. Fritsch, N. Hack, I. Mai, M. Popescu, H. Kloft, Digital fabrication with concrete beyond horizontal planar layers, *Cem Concr Res* 186 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107663>.
- [5] V. Mechtcherine, V.N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto, M. Krause, Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Autom Constr* 107 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>.
- [6] T. Wangler, Y. Tao, A. Das, M. Mahmoudi, S. Gürel, R.J. Flatt, Aluminate 2K systems in digital concrete: Process, design, chemistry, and outlook, *Cem Concr Res* 185 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107644>.
- [7] C. Zhang, V.N. Nerella, A. Krishna, S. Wang, Y. Zhang, V. Mechtcherine, N. Banthia, Mix design concepts for 3D printable concrete: A review, *Cem Concr Compos* 122 (2021) 104155. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>.
- [8] R.J. Flatt, T. Wangler, On sustainability and digital fabrication with concrete, *Cem Concr Res* 158 (2022) 106837. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106837>.
- [9] A. Perrot, Y. Jacquet, J.F. Caron, R. Mesnil, N. Ducoulombier, V. De Bono, J. Sanjayan, S. Ramakrishnan, H. Kloft, J. Gossler, S. Muthukrishnan, V. Mechtcherine, T. Wangler, J.L. Provis, K. Dörfler, E. Krakovska, N. Roussel, E. Keita, Snapshot on 3D printing with alternative binders and materials: Earth, geopolymers, gypsum and low carbon concrete, *Cem Concr Res* 185 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107651>.
- [10] F. Pelisser, L.R. Steiner, A.M. Bernardin, Recycling of porcelain tile polishing residue in portland cement: Hydration efficiency, *Environ Sci Technol* 46 (2012) 2368–2374. <https://doi.org/10.1021/es203118w>.
- [11] P.C. Jacoby, F. Pelisser, Pozzolan effect of porcelain polishing residue in Portland cement, *J Clean Prod* 100 (2015) 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096>.
- [12] P.R. de Matos, A.L. de Oliveira, F. Pelisser, L.R. Prudêncio, Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue, *Constr Build Mater* 175 (2018) 508–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.212>.
- [13] P.R. de Matos, L.R. Prudêncio, A.L. de Oliveira, F. Pelisser, P.J.P. Gleize, Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete,

- Constr Build Mater 193 (2018) 623–630.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.228>.
- [14] P.R. de Matos, D. Jiao, F. Roberti, F. Pelisser, P.J.P. Gleize, Rheological and hydration behaviour of cement pastes containing porcelain polishing residue and different water-reducing admixtures, *Constr Build Mater* 262 (2020) 120850.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120850>.
- [15] P.R. de Matos, J.S. Andrade Neto, R.D. Sakata, A.P. Kirchheim, E.D. Rodríguez, C.E.M. Campos, Strategies for XRD quantitative phase analysis of ordinary and blended Portland cements, *Cem Concr Compos* 131 (2022) 104571.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104571>.
- [16] P.R. de Matos, H. Prigol, A. Schackow, S. da S. Nazário, G. Doerner, N. Safanelli, Quality control tests of fresh 3D printable cement-based materials, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 17 (2024). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952024000500015>.
- [17] K. Zhang, A. Mezhev, W. Schmidt, Chemical and thixotropic contribution to the structural build-up of cementitious materials, *Constr Build Mater* 345 (2022) 128307.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128307>.
- [18] N. Roussel, Rheological requirements for printable concretes, *Cem Concr Res* 112 (2018) 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>.
- [19] J. Kruger, S. Zeranka, G. van Zijl, An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete, *Constr Build Mater* 224 (2019) 372–386.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078>.
- [20] N. Ducoulombier, R. Mesnil, P. Carneau, L. Demont, H. Bessaies-Bey, J.F. Caron, N. Roussel, The “Slugs-test” for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits, *Cem Concr Compos* 121 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104074>.
- [21] G. Habert, E. Denarié, A. Šajna, P. Rossi, Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, *Cem Concr Compos* 38 (2013) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008>.
- [22] K.M. Rahla, R. Mateus, L. Bragança, Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC), *J Clean Prod* 220 (2019) 445–459.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.010>.
- [23] P. Hájek, C. Fiala, M. Kynčlová, Life cycle assessments of concrete structures - A step towards environmental savings, *Structural Concrete* 12 (2011) 13–22.
<https://doi.org/10.1002/suco.201000026>.
- [24] D.J.M. Flower, J.G. Sanjayan, Green house gas emissions due to concrete manufacture, *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (2007) 282–288.
<https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.
- [25] B.L. Damineli, F.M. Kemeid, P.S. Aguiar, V.M. John, Measuring the eco-efficiency of cement use, *Cem Concr Compos* 32 (2010) 555–562.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

- [26] P.R. de Matos, R. Pilar, C.A. Casagrande, P.J.P. Gleize, F. Pelisser, Comparison between methods for determining the yield stress of cement pastes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* in press (2019).
- [27] P.R. de Matos, R.D. Sakata, L. Onghero, V.G. Uliano, J. de Brito, C.E.M. Campos, P.J.P. Gleize, Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation, *Journal of Building Engineering* 38 (2021) 102187. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102187>.
- [28] P.R. de Matos, R. Pilar, C.A. Casagrande, P.J.P. Gleize, F. Pelisser, Comparison between methods for determining the yield stress of cement pastes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42 (2020) 24. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2111-2>.
- [29] Q. Yuan, X. Lu, K.H. Khayat, D. Feys, C. Shi, Small amplitude oscillatory shear technique to evaluate structural build-up of cement paste, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 50 (2017) 1–12. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0978-2>.
- [30] P.R. de Matos, G. Doerner, S. da S. Nazário, J. da S. Andrade Neto, M. Longhi, M. Folgueras, E.D. Rodríguez, Limestone calcined clay cements (LC³) produced with iron ore tailings and ceramic waste: Hydration, mechanical performance and rheology, *Constr Build Mater* 458 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139604>.
- [31] A. V. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, Z. Ghani, Mechanical characterization of 3D printable concrete, *Constr Build Mater* 227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>.
- [32] Y. Tao, A. V. Rahul, K. Lesage, K. Van Tittelboom, Y. Yuan, G. De Schutter, Mechanical and microstructural properties of 3D printable concrete in the context of the twin-pipe pumping strategy, *Cem Concr Compos* 125 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104324>.
- [33] F. Bos, C. Menna, A. Robens-Radermacher, R. Wolfs, N. Roussel, H. Lombois-Burger, B. Baz, D. Weger, B. Nematollahi, M. Santhanam, Y. Zhang, S. Bhattacharjee, Z. Jia, Y. Chen, V. Mechtcherine, Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — approach and main results, *Mater Struct* 58 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02686-x>.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Pyetra Haime Maas

MODALIDADE DE BOLSA: PIBIC/CNPq

VIGÊNCIA: abril/2025-atualmente

ORIENTADOR(A): Paulo Ricardo de Matos

CENTRO DE ENSINO: CCT

DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia Civil

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharias / Engenharia Civil

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Critérios De Avaliação No Estado Fresco De Argamassas Para Impressão 3D

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP4244-2023