

10_12

EDIFÍCIOS MODULARES PRÉ-FABRICADOS EM BETÃO

MATRIZES CIMENTÍCIAS DE REDUZIDO FATOR DE CLÍNQUER VISANDO A PRODUÇÃO DE BETÃO DE BAIXO CARBONO PARA CONSTRUÇÃO MODULAR

Martim Nabais¹, José Bogas¹, Catarina Coelho²

¹ CERIS, IST-Universidade de Lisboa

² CIMPOR

Devido ao crescimento demográfico e à desigualdade social, a sociedade é atualmente confrontada com uma necessidade urgente de habitação [1]. Por sua vez, a indústria da construção tem cada vez maior responsabilidade na pegada de carbono [2, 3], sendo importante conceber soluções construtivas de menor impacto ambiental. Nesse sentido, a construção modular em betão [CMB] permite simultaneamente aumentar a rapidez de execução e minimizar o custo e o impacto ambiental das novas habitações [1,2]. Porém, urge maximizar a sustentabilidade da CBM, explorando a utilização de betões mais eco-eficientes [4]. A substituição de clínquer por adições convencionais tem sido a estratégia mais efetiva para reduzir a pegada de carbono do betão [5,6]. Esta deve ser aliada à otimização da capacidade granular, de modo a reduzir o teor de ligante na produção do betão [7–10]. A cinza volante [CV] e a escória de alto-forno [EAF] têm sido as adições pozolânicas mais exploradas [7], mas ao serem subprodutos de indústrias poluidoras tendem a desaparecer [6,7]. Uma alternativa são as pozolanas naturais e as cinzas de fundo [CF], mas a sua disponibilidade é limitada. Atualmente, a argila calcinada [CC] é a adição com maior potencial de utilização

no futuro, justificado pela disponibilidade de matéria-prima, baixo custo e temperatura de termoativação ($< 850^{\circ}\text{C}$) [7,11]. O LC3 explora a utilização conjunta de CC com fíler calcário [FC], na proporção 2:1, de modo a obter uma mistura ternária de maior eficiência, associada a um menor fator de clínquer, sem afetar o seu desempenho [12,13]. É documentado que a incorporação de CC e FC para apenas 50 % de cimento, implica uma diminuição de até 40 % nas emissões de CO_2 , reduzindo ainda a permeabilidade do betão, sem afetar a sua resistência mecânica [6,13]. Uma das principais desvantagens das adições pozolânicas reside no desenvolvimento mais lento dos produtos de hidratação, dificultando a produção de betões de elevada resistência inicial [6,11]. No Instituto Superior Técnico tem sido realizada investigação visando a produção de cimento reciclado [CR] a partir da fração cimentícia de resíduos de betão endurecido [14–22]. A ideia consiste em recuperar as propriedades ligantes de cimento antigo através da sua termoativação a baixa temperatura ($< 750^{\circ}\text{C}$), dotando-o novamente de elevada capacidade de reidratação. Reporta-se que a capacidade resistente do CR é equiparável à do cimento 32.5 [18,20], o que permite, pela primeira vez,

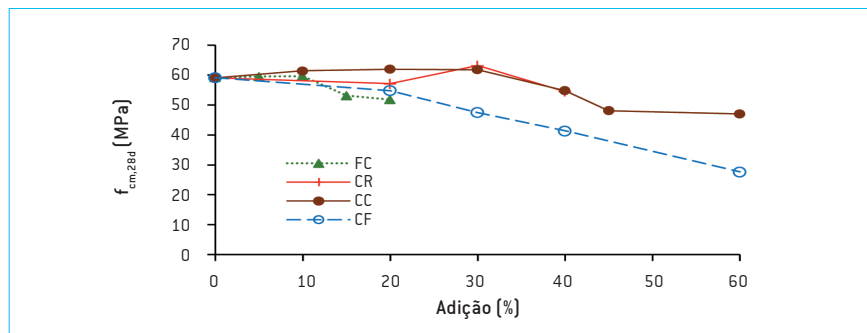
desenvolver betões “verdes” 100 % recicláveis. Em estudos recentes, verificou-se que a resistência mecânica e a durabilidade do betão não foram significativamente afetadas para até 40 % de substituição de cimento por CR, e para 100 % CR a perda de resistência foi inferior a 20 % [18]. Face ao nível de emissões de CO_2 associados à produção de clínquer e CR, estima-se que a redução seja superior a 60 % [5], embora a produção de CR ainda não esteja implementada a nível industrial. Uma dificuldade associada à utilização de CR está relacionada com a sua elevada exigência de água, devido à sua natureza porosa e elevada área superficial [16,20].

Atualmente, no IST decorre um projecto que visa desenvolver betão de baixo carbono para construção modular. O objetivo consiste em desenvolver betões de reduzido teor de clínquer (inferior a 60 %), associados a baixas dosagens de ligante e elevadas percentagens de adições ou ligantes alternativos, com capacidade de cumprir os requisitos ambiciosos de fluidez e resistência inicial exigidos na CBM. Estas metas são um desafio para a indústria, na medida em que betões fluidos e de elevada resistência inicial requerem maiores teores de pasta e de clínquer.

ESTUDO EM ARGAMASSAS – MATRIZES CIMEN- TÍCIAS DE REDUZIDO FACTOR DE CLÍNQUER

Para o estudo de argamassas foram utilizados os seguintes materiais cimentícios: cimento tipo I 52.5 R (CP) com $3,1 \text{ g/cm}^3$ e D_{50} de $16 \mu\text{m}$; CR termoativado a 650°C com $3,0 \text{ g/cm}^3$ e D_{50} de $26 \mu\text{m}$; CC com cerca de 56 % de kaolinite e 9 % ilite, $2,65 \text{ g/cm}^3$ e D_{50} de $14 \mu\text{m}$; cinza de fundo (CF) provenientes da central termoelétrica do Pego com 5,34 % de perda ao fogo, índice de atividade aos 28 dias de 69 %, $2,23 \text{ g/cm}^3$ e D_{50} de $31 \mu\text{m}$. Foi também utilizado FC comercial com 98,9 % de CaCO_3 , $2,60 \text{ g/cm}^3$ e D_{50} de $4,7 \mu\text{m}$, bem como FC produzido em laboratório a partir de resíduos de betão convencional com a/c de 0,55 (FCB). O FCB foi obtido de duas formas: britagem e moagem consecutiva dos resíduos de betão, aproveitando apenas o material abaixo de $150 \mu\text{m}$ (FCB1); britagem primária e secundária do betão, aproveitamento de resíduo abaixo de 1 mm, seguido de moagem em moinho de bolas (FCB2); britagem e moagem, seguido da aplicação de um método patenteado de separação do betão [22] e moagem em moinho de bolas (FCB3). Foram ainda utilizadas duas areias siliciosas, 0/2 e 0/4, que foram misturadas na proporção 35:65, bem como um superplastificante de base policarboxilica.

Foram produzidas cerca de 32 misturas diferentes, considerando argamassas com distintas combinações de matrizes cimentícias, definidas de modo a compreender a contribuição separada e combinada de cada um dos constituintes. A definição dessas misturas teve por base a realização de misturas experimentais e resultados obtidos em anteriores trabalhos [7,13,18,20]. As argamassas foram produzidas com a mesma relação água/ligante (a/l), variando apenas a dosagem de superplastificante, de modo a se obter a mesma trabalhabilidade [espalhamento de acordo com a EN 1015-3 [23]]. Para efeitos de comparação, foi produzida uma argamassa de referência com 100 % CP e igual a/l. A maior exigência



1>

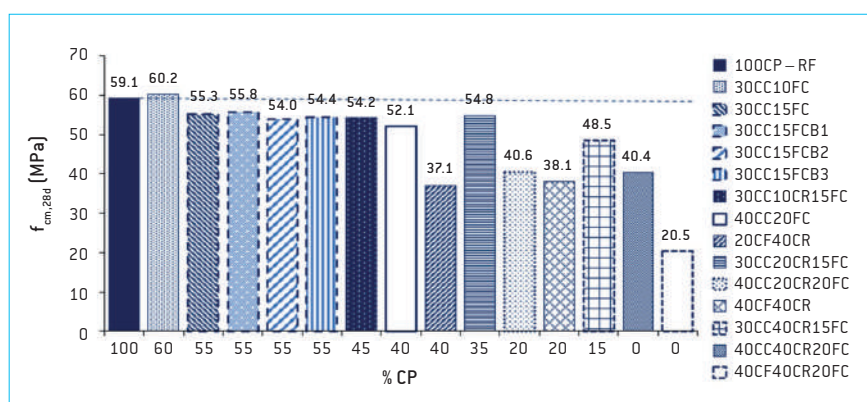
de água, implicando a necessidade de maior incorporação de superplastificante, ocorreu nas misturas com elevados teores de CC e/ou CR. As várias argamassas foram caracterizadas em termos de resistência à compressão e flexão de acordo com a norma EN 1015-11 [24].

Nas Figuras 1 e 2 resume-se os resultados de resistência à compressão aos 28 dias das argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição de cimento por CC, FC, CR e CF (Figura 1) e em soluções ternárias ou quaternárias de elevada redução de clínquer (40-100 %, Figura 2).

Face à argamassa de referência com CP, verifica-se que a resistência não foi significativamente alterada para teores de CC, CR e FC de até 30 %, 30 % e 10 %, respetivamente (Figura 1). A CC e o CR demonstraram elevada reatividade. O índice de atividade de CC foi superior a 1, permitindo aumentos de resistência de 5 % até 30 % CC. Acima de 30 % de incorporação, o clínquer disponível limita a reacção da CC. A ligeira redução de resistência para 40 % CR (8 %), resulta da elevada exigência de água e maior di-

ficuldade de compactação desta mistura. A CF, associada a reações pozolânicas mais lentas, conduziu a perdas de resistência superiores a 30 % para incorporações acima de 40 %.

Foi possível atingir misturas ternárias e quaternárias de reduzido fator de clínquer, mantendo níveis elevados de desempenho (Figura 2). Para 40 % de substituição de cimento por CC e FC, na proporção 3:1, atingiu-se inclusivamente uma resistência 5 % mais elevada do que na argamassa com 100 % CP. Para reduções de 45 % no teor de clínquer, a redução de resistência foi de 6-9 %, dependendo do tipo de FC. O melhor desempenho foi atingido no FCB1, apesar das diferenças terem sido pouco significativas entre os diferentes tipos de FC. Nas misturas quaternárias com CC+FC+CR destaca-se a elevada capacidade do CR, permitindo atingir reduções de resistência inferiores a 7 %, para teores de CP de 35 %. Por sua vez, em soluções com apenas 15 % CP, atingiram-se ainda assim resistências próximas de 50 MPa, cerca de 82 % da resistência do 100 % CP. Finalmente, realça-se ainda o facto de se ter atingido



2>

> **Figura 1:** Resistência à compressão aos 28 dias de argamassas com diferentes teores de substituição de cimento por argila calcinada (CC), filer calcário (FC), cimento reciclado (CR) e cinzas de fundo (CF).

> **Figura 2:** Resistência à compressão aos 28 dias de argamassas produzidas com matrizes ternárias ou quaternárias de reduzido teor de clínquer (baixa percentagem de CP).

soluções estruturais, 100 % livres de cimento, com 40 MPa. As misturas com CF em lugar de CC manifestaram pior desempenho, apesar de ainda assim permitirem atingir cerca de 68 % da resistência de 100 % CP, para apenas 20 % de clínquer. Apesar de algumas das misturas indicadas não serem adequadas para a CBM, devido à exigência de resistência inicial, um estudo em curso mostra que betões com CC+FC+CR e menos de 30 % de clínquer são viáveis, após ajustar a relação a/l para 0,35 0,4.

CONCLUSÃO

Neste trabalho conclui-se que o CR apresenta desempenho comparável ao CP, sendo uma boa opção como ligante alternativo. A CC apresentou elevado índice de actividade aos 28 dias, superior a 1. A CF é viável, mas retarda em demasia o crescimento de resistência. Os diferentes tipos de FC produzidos a partir de resíduos de betão revelaram desempenho semelhante ao FC comercial, viabilizando a sua aplicação.

Explorando a sinergia entre estes constituintes, foi possível atingir soluções estruturais associadas a reduções de 40-65 % no teor de clínquer, mantendo ou reduzindo ligeiramente (<10 %) a

resistência face às misturas de referência com 100 %CP. Resistências superiores a 40 MPa foram obtidas em misturas verdes com ausência de clínquer e apenas CC+CR+FC. Confirma-se assim a possibilidade de se poderem produzir betões estruturais de baixo carbono com elevada percentagem de substituição de clínquer. Este estudo enquadra-se no âmbito mais alargado da redução do teor de clínquer dos ligantes a utilizar no betão, caminho que a indústria de cimentos nacional está a trilhar e, nesse sentido, a CIMPOR tem vindo a desenvolver novos tipos de cimento baseados em cinzas de aterro que irão começar a ser disponibilizados a uma escala industrial, enquanto outros se encontram em fase de desenvolvimento. Um dos tipos de cimento a lançar no imediato a uma escala industrial, e que irá ser utilizado neste projeto ao nível de teste na construção de elementos pré-fabricados estruturais em betão, em substituição do cimento CEM I 52,5 R, correntemente usado neste tipo de produtos, é o CEM II/B-M (V-L) 42,5 R, ou seja, um cimento constituindo uma mistura ternária. Embora contendo um nível de substituição de clínquer inferior ao de alguns tipos de ligantes apresentados neste trabalho, e que a CIMPOR está a desenvolver para o futuro, permite com segurança satisfazer as necessidades atuais da indústria da constru-

ção. Além disso, conjuntamente com a aplicação deste tipo de cimento, o recurso a métodos de especificação da durabilidade com base no desempenho, que potencia as vantagens deste tipo de ligante, pode traduzir-se na redução do peso dos elementos pré-fabricados por diminuição da espessura de recobrimento do betão. Com base nos resultados deste estudo perspectiva-se que o nível de substituição de clínquer nos cimentos possa progredir, mantendo os requisitos exigidos pelos utilizadores.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação está a ser desenvolvido no âmbito do Pacto de Inovação “R2UTechnologies / Modular Systems” [C64487810-00000019] pelo consórcio “R2UTechnologies” cofinanciado pelo NextGenerationEU através do investimento “Agendas para a Inovação Empresarial” do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Os autores agradecem ainda a colaboração da CIMPOR, SIFUCEL e SAINT-GOBAIN pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental. O primeiro autor agradece ainda o financiamento do PRR através da bolsa de doutoramento BL 168/2023 IST. ■

REFERÊNCIAS

- [1] S. Mete, J. Xue, Integrating environmental sustainability and social justice in housing development: two contrasting scenarios, *Prog Plann* 151 (2021) 100504. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2020.100504>.
- [2] Y. Zhang, W. Pan, Y. Teng, Reducing embodied carbon emissions of concrete modules in high-rise buildings through structural design optimisation, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 1101 (2022) 022023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/2/022023>.
- [3] M.S. Imbabi, C. Carrigan, S. McKenna, Trends and developments in green cement and concrete technology, *International Journal of Sustainable Built Environment* 1 (2012) 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>.
- [4] W. Pan, C.K. Hon, Briefing: Modular integrated construction for high-rise buildings, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer* 173 (2020) 64–68. <https://doi.org/10.1680/jmuen.18.00028>.
- [5] S. Real, V. Sousa, I. Meireles, J.A. Bogas, A. Carriço, Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production, *Materials* 15 (2022) 6766. <https://doi.org/10.3390/ma15196766>.
- [6] Scrivener K, Eco-efficient cements: No magic bullet needed, *Global Cement: Future Cements*, *Global Cement Magazine* (2019) 10–14.
- [7] M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, K. Scrivener, Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review, *Cem Concr Res* 149 (2021) 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>.
- [8] F. Larrard, Concrete mixture proportioning: a scientific approach, 1999.
- [9] M. Bala, R. Zentar, P. Boustingorry, Parameter determination of the Compressible Packing Model (CPM) for concrete application, *Powder Technol* 367 (2020) 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.085>.
- [10] J. Faury, Le b'eton, 1958.
- [11] J. Skibsted, R. Snellings, Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, *Cem Concr Res* 124 (2019) 105799. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>.
- [12] B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cem Concr Compos* 23 (2001) 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).
- [13] LC3, Limestone calcined clay cement, [2001]. <https://lc3.ch/> [accessed March 15, 2024].
- [14] V. Sousa, J. Bogas, Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production, *J Clean Prod* 306 (2021).
- [15] EcoHdyb, EcoHdyb, Eco-efficient hydraulic binders produced from waste cement-based materials, PTDC/ECI-CON/28308/2017 (2018–2022), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), <https://cdwvalue.eu/Project-Ecohydb> (2022). <https://cdwvalue.eu/project-ecohydb> [accessed May 29, 2023].
- [16] J.A. Bogas, S. Real, A. Carriço, J.C.C. Abrantes, M. Guedes, Hydration and phase development of recycled cement, *Cem Concr Compos* 127 (2022) 104405. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>.
- [17] A. Carriço, S. Real, J.A. Bogas, Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete, *Cem Concr Compos* 124 (2021) 104270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>.
- [18] S. Real, J.A. Bogas, A. Carriço, S. Hu, Mechanical Characterisation and Shrinkage of Thermoactivated Recycled Cement Concrete, *Applied Sciences* 11 (2021) 2454. <https://doi.org/10.3390/app11062454>.
- [19] J.A. Bogas, A. Carriço, A.J. Tenza-Abril, Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes, *Cem Concr Res* 138 (2020) 106226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>.
- [20] A. Carriço, S. Real, J.A. Bogas, M.F. Costa Pereira, Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation, *Constr Build Mater* 256 (2020) 119502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>.
- [21] A. Carriço, J.A. Bogas, S. Real, M.F.C. Pereira, Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement, *Constr Build Mater* 333 (2022) 127392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>.
- [22] A. Carriço, J.A. Bogas, S. Hu, S. Real, M.F. Costa Pereira, Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete, *J Clean Prod* 309 (2021) 127375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>.
- [23] EN 1015-3. [1999]. Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 3: Determination of Consistency of Fresh Mortar (by Flow Table). European Committee for standardization [CEN].
- [24] EN 1015-11. [2019]. Methods of test for mortar for masonry. European Committee for standardization [CEN].