

BETÃO LEVE COM RESÍDUOS DE MOLDES CERÂMICOS DE FUNDIÇÃO

JIA ZHIYOU^{1*}, JOSÉ AGUIAR¹, CARLOS DE JESUS¹, FERNANDO CASTRO²

1: C-TAC – Centro de Território, Ambiente e Construção Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
pg39237@alunos.uminho.pt, aguiar@civil.uminho.pt, cjesus@civil.uminho.pt

2: MEtrICs, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
fcastro@dem.uminho.pt

Resumo A demanda por produtos de betão está aumentando a cada ano, e os requisitos de desempenho para concreto em diferentes projetos também são cada vez mais exigentes. O desenvolvimento ambiental sustentável orienta a investigação científica sobre o betão no sentido da economia circular, leveza e alta resistência. Na indústria de fundição, uma grande quantidade de resíduos de moldes cerâmicos é enviada para o aterro, o que não só polui o meio ambiente, mas também causa danos ecológicos. Então, neste estudo, realizou-se a caracterização física dos resíduos de moldes cerâmicos de fundição (RMCF). Com os RMCF procurou-se substituir o agregado de grandes dimensões em betão leve com 30%, 60% e 80% de incorporação. Como conclusão do estudo, o aumento do conteúdo de RF reduziu o desempenho da trabalhabilidade do betão leve. As propriedades mecânicas e a durabilidade tiveram, contudo, um aumento considerável. No estudo, verificou-se que a incorporação de RMCF com uma taxa de 80%, obteve o melhor desempenho em relação às restantes misturas. Alcançou uma resistência média de 36 MPa com uma densidade de 1998 kg/m³. Esta mistura também teve uma melhoria significativa na durabilidade em relação às restantes misturas.

Palavras-chave: Betão leve, resíduos de fundição, propriedades mecânicas, durabilidade

Abstract The demand for concrete products is increasing year by year, and the performance requirements for concrete in various projects are also becoming more demanding. Under the premise of sustainable ecological development, scientific research on concrete is directed towards circular economy, lightness and high strength. In the foundry industry, a large amount of waste from ceramic molds is disposed of in landfills every year, which not only pollutes the environment but also causes ecological damage. Therefore, the physical characterization of waste from ceramic foundry molds (RMCF) was carried out in this study. The RMCF were attempted to replace the large aggregate in lightweight concrete with 30%, 60% and 80% admixture. A water/cement ratio of 0.3 was used. The study showed that increasing the RMCF content reduced the workability of the lightweight concrete. However, the mechanical properties and durability improved significantly. In the study, it was found that the incorporation of 80% RMCF, achieved the best performance compared to the other mixtures. It achieved an average strength of 36 MPa at a density of 1998 kg/m³. This mixture also showed a significant improvement in durability compared to the other mixtures.

Key-words: Lightweight concrete, foundry residues, mechanical properties, durability.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da indústria da construção e a demanda por estilos arquitetónicos diversificados nasceu o betão leve. É considerado betão leve, aquele que possui uma massa volúmica de 800 a 2000 kg/m³, feito com uma mistura de agregado leve, finos, ligante e água [1]. De facto, o uso

deste tipo de betão data de 27 AC, a cúpula do Panteão de Roma (43,3m de diâmetro) usava betão leve pozolânico. Embora sua resistência à compressão seja de apenas 10 MPa, seu conceito de melhoria do betão também é aceite agora. A partir disso pode-se ver que o agregado leve substituiu o agregado natural (brita ou godo) para atingir o objetivo de menor massa do que o betão tradicional no mesmo volume [2]. Usualmente, do ponto de vista da fonte de material, existem principalmente três tipos de agregados leves: agregados leves naturais (como escória vulcânica, pedra-pomes, etc.), resíduos industriais (agregado de cinzas volantes expandidas, grânulos de escória expandida, etc.) e agregados leves artificiais (como argila expandida, xisto expandido, perlite expandida, etc.). Então, devido à ampla gama de fontes de agregados leves e às propriedades superiores do betão leve, atualmente existe necessidade em várias obras, como edifícios altos [3], pontes, plataformas de petróleo, obras de reabilitação estrutural, etc. [4].

Por outro lado, fatores como industrialização, urbanização e rápido crescimento populacional levaram à deterioração do atual ambiente global, e o consumo de energia em indústria da construção e as emissões de CO₂ representam 30% do total mundial [5]. Especialmente, o betão é o material de construção mais utilizado no mundo. Segundo as estatísticas, a produção de uma tonelada de betão emitirá 50-130 kg de CO₂ no ambiente [6]. As emissões de gases de efeito estufa causadas pelo uso de agregados naturais representam 1% do total das emissões de gases de efeito estufa na produção de betão [7]. Portanto, diante desse problema, alguns autores desenvolvem alguns tipos de agregados reciclados para substituir o agregado natural, como Santiago et al. [8] utilizam resíduos de construção e demolição para produzir betão leve de alta qualidade. Sales et al. [9] estudam os resíduos de fibra de madeira para o betão leve. E Bogas et al. [10] utilizaram argila expandida em betão leve auto-adensável e obtiveram bom desempenho.

Na indústria de fundição, o processo de cera perdida permite a obtenção de peças com elevado rigor dimensional. Neste processo, uma carapaça cerâmica é produzida em torno de um modelo em cera. Por aquecimento, a cera evapora, deixando, no seu lugar, uma cavidade que irá ser preenchida com metal líquido. Pode produzir peças em ligas ferrosas, mas também em ligas não ferrosas. As características das carapaças cerâmicas não diferem, pelo que o RMCF produzido é característico da produção normal [11]. De acordo com relatos da comunicação social chinesa, a China é o país com o maior número de empresas de fundição, com mais de 30.000 fundições, e a produção total de vários fundidos é responsável por cerca de 40% da produção mundial [12]. É relatado que a produção de fundição por cera perdida na China foi de cerca de 5 milhões de toneladas em 2020, representando 10% da produção de fundição, e a demanda por fundições por cera perdida está aumentando ano a ano [13]. A indústria de fundição nos Estados Unidos da América é a segunda maior do mundo [14]. A indústria de fundição indiana ocupa a terceira posição no mundo, com uma produção anual de cerca de 9.3 milhões de toneladas de peças fundidas (ano 2013) [11]. De acordo com estimativas da indústria, a produção anual desses resíduos em Portugal foi de cerca de 2000 toneladas.

Com uma quantidade tão grande de RMCF, a maioria dos métodos de processamento consiste no transporte para aterros. Devido ao aumento do custo dos aterros e o impacto ambiental irreversível causado por eles, é urgente encontrar alternativas para o tratamento dos RMCF. Diante desse problema, os RMCF foram considerados para a indústria da construção como agregados reciclados em substituição aos agregados naturais de betão, o que reduzirá bastante o consumo de matérias-primas naturais e as emissões de CO₂ da indústria da construção [15], [16]. De uma perspectiva geral, o uso racional de RMCF na indústria da construção trará enormes benefícios econômicos, ambientais e sociais.

Portanto, neste estudo, reutiliza-se principalmente resíduos de moldes cerâmicos de fundição (RMCF) para substituir agregados leves em betão leve.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os RMCF foram provenientes de uma fundição no norte de Portugal. A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X (Tabela 22.). Seu principal componente é o SiO₂, responsável por 74,3%. Os RMCF com dimensões de 0-20 mm foram utilizados. As partículas RMCF são irregulares em forma e tamanho (Figura 58-a). Por microscopia eletrônica observou-se a microestrutura da partícula RMCF (Figura 58-b), indicando que ele consiste em agregados e argamassa velha com diâmetro de cerca de 800 μm. De acordo com a norma EN 1097-6 [17], a massa volúmica seca e absorção de água do RMCF foram testadas, apresentou 2036 kg/m³ e 8,98%, respectivamente. A granulometria de partículas foi testada de acordo com a norma EN 933-1 [18] (Figura 59).

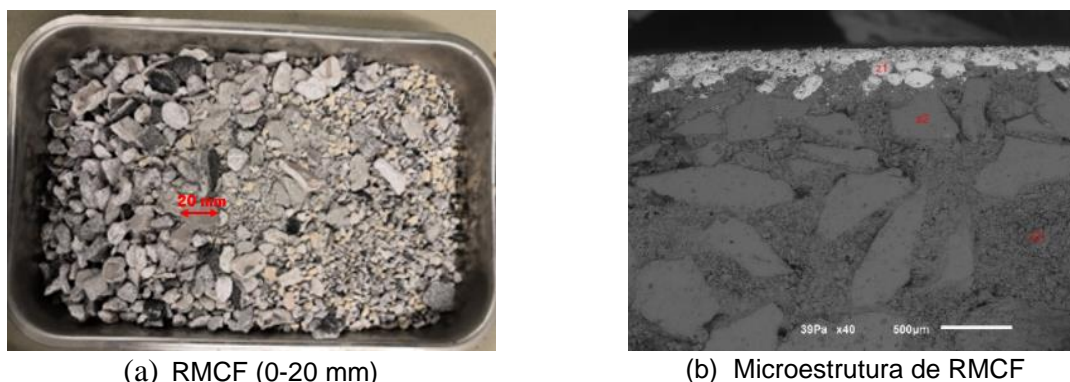


Figura 58. RMCF e microestrutura de RMCF

Tabela 22. A composição do RMCF

| Elementos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | ZrO ₂ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | CaO | K ₂ O | Cr |
|-------------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|------|------------------|------|
| Valores (%) | 74.3 | 20.0 | 4.2 | 0.66 | 0.66 | 0.12 | 0.07 | 0.08 | 0.02 |

Argila expandida comercial (AE) fornecido pela empresa Leca® foi o agregado leve de referência com duas dimensões diferentes (2-10 e 10-20 mm). De acordo com a norma EN 1097-6 [17], a massa volúmica e absorção de água das AE foram testadas, apresentou AE com dimensão de 2-10 mm de 542 kg/m³ e de 33,05 % e, AE com dimensão de 10-20 mm de 511 kg/m³ e de 34,19 %. A granulometria de partículas das AE foram caracterizadas pela a norma EN 933-1 [18] (Figura 59). A composição química da AE foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X (Tabela 23). Antes de misturar, realiza-se imersão da AE em água por 24 horas para evitar a flutuação de agregados leves durante a mistura.

Tabela 23. A composição da argila expandida

| Elementos | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | K ₂ O | S | MnO | P ₂ O ₅ |
|-------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|------|------|-------------------------------|
| Valores (%) | 64.36 | 23.46 | 1.12 | 8.82 | 0.04 | 1.89 | 0.03 | 0.13 | 0.16 |

A areia do rio com dimensão de 0-4 mm foi utilizada. A massa volúmica e absorção de água foram 2580

kg/m³ e 0,88 %, respetivamente. O cimento CEM I 42,5R, produzido por empresa SECIL em Portugal, foi misturado. Sua massa volúmica foi 3120 kg/m³. O produto superplastificante (SP), proveniente de empresa BASF de Portugal, foi utilizado como um modificador de abaixamento de betão leve fresco e os seus parâmetros técnicos apresentam-se na Tabela 24. Utilizou-se água potável do laboratório.

Tabela 24. Parâmetros técnicos do Superplastificante [19]

| Características físicas e químicas | Normas | Valores específicos |
|------------------------------------|---------------|------------------------------|
| Aspeto físico | Visual | Líquido castanho |
| Densidade (20°C) | ISO 758 | 1,041±0.02 g/cm ³ |
| PH | ISO 4316 | 5,3±1 |
| Extrato seco | UNE EN 480-8 | 18±1,8 % |
| Teor de cloretos | UNE EN 480-10 | ≤0,1% |

2.2. Estudo das composições

Neste estudo, quatro composições diferentes foram preparadas. A relação de água/ligante é de 0,3. O tamanho máximo de partícula é de 20 mm. Dentre essas quatro composições, o betão leve de referência (0% RMCF, representado por R0) foi desenvolvido pelo método de Faury, com foco na granulometria de diversos materiais sólidos no dimensionamento das proporções do betão, para que o betão leve possa obter mais compactidade e melhor trabalhabilidade [20] e obteve-se a curva de Faury de betão leve de referência na Figura 59.

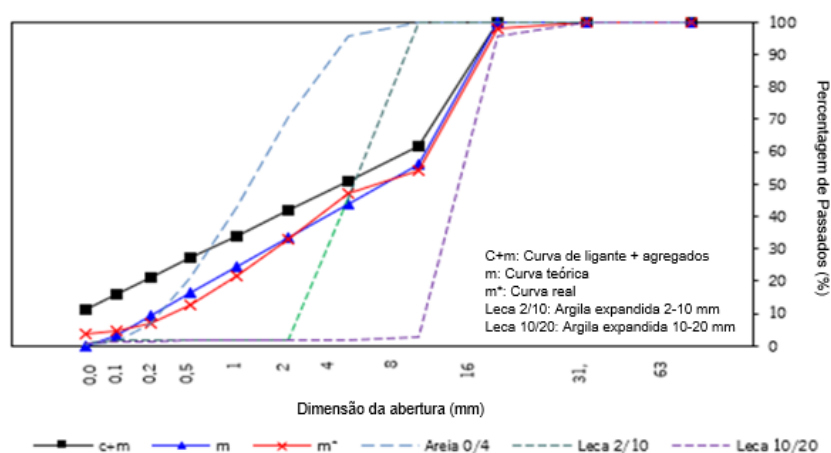


Figura 59. Apresentação da curva de Faury para o estudo do betão leve de referência

Após determinar a formulação do betão leve referência, os três tipos de betões leves com composição diferente na quantidade de RMCF, substituindo 30%, 60% e 80% dos AE por o RMCF (wt %) (Indicado por R30, R60 e R80), foram desenvolvidos. Na Tabela 26 apresentam-se as quatro composições.

Tabela 25. As composições de betões leves (kg/m³)

| Mistura | Cimento | Areia 0/4 | Quantidade de material por 1 m ³ | | | | RMCF | SP |
|---------|---------|-----------|---|-----|------------------|--|------|----|
| | | | Água | A/C | Argila expandida | | | |

| | | | | | 2/10 | 10/20 | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-----|------|
| R0 | | | | | 76 | 398 | 0 | 3.5 |
| R30 | 350 | 346 | 101 | 0,3 | 69 | 361 | 184 | 3.5 |
| R60 | | | | | 52 | 274 | 490 | 5.1 |
| R80 | | | | | 34 | 176 | 838 | 12.3 |

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Massa volúmica

Na Tabela 26, observa-se que, à medida que se aumenta substituição a quantidade de RMCF no betão leve, também a massa volúmica de betão leve vai aumentando gradualmente. Quando o teor de RMCF é de 80%, sua massa volúmica é basicamente próxima do limite superior especificado para betão leve.

Tabela 26. As massas volúmicas de betão leve (kg/m^3)

| Provetes | R0 | R30 | R60 | R80 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
| Massa volúmica | 1541.7 | 1584.7 | 1881.1 | 1998.7 |

3.2. Abaixamento e utilização de superplastificante

No processo de preparação do betão leve, foi usado um SP para ajustar a trabalhabilidade do betão leve. Neste processo foi adicionado percentagens de SP entre 1% e 5% em função da quantidade de cimento. Após a realização do abaixamento do betão fresco de acordo com a norma NP EN 206-1 [1], obteve-se por fim os resultados de abaixamento e percentagem de SP na Figura 60. Pode-se observar que os 4 tipos de betão leve fresco obtiveram abaixamento S3. Se destacou que à medida que a quantidade de RMCF aumentava nas misturas, se notava que o aumento da utilização de SP era necessário para atingir a mesmo abaixamento que a outras misturas com classe S3. Em particular, a quantidade de SP de R80 é 3,5 vezes mais do que R30. Isto deve-se à forma irregular das partículas de RMCF.

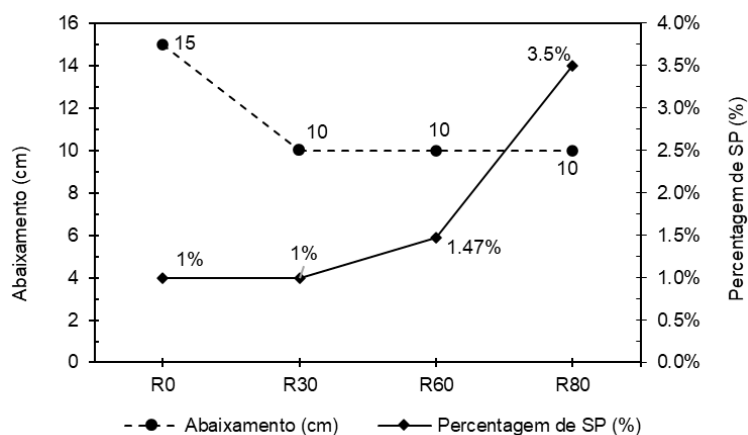


Figura 60. Abaixamento de betão fresco e percentagem de SP utilizado

3.3. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado de acordo com a norma LNEC E 394 [21]. A fim de garantir resultados com um desvio padrão baixo, foram ensaiados 3 provetes cúbicos de 10x10x10 cm³ para cada tipo de betão leve.

Observando a partir da Figura 61 à medida que o conteúdo de RMCF aumenta, a taxa de absorção de água por imersão do betão leve endurecido diminui. Essa mudança está relacionada à absorção por imersão de RCMF e seu conteúdo no betão leve. Os resultados neste estudo da absorção de água por imersão demonstram que à medida que se substitui a AE por RMCF a porosidade tem uma tendência de diminuição. Este facto deve-se à própria natureza do RF que proporciona misturas mais compactas.

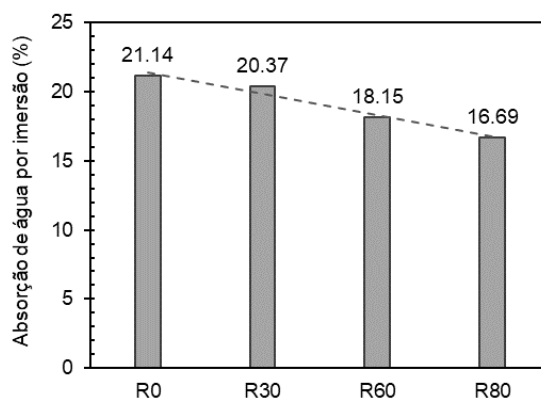


Figura 61. Absorção de água por imersão (%)

3.4. Absorção de água por capilaridade

De acordo com a norma LNEC E 393 [22], para o ensaio de absorção de água por capilaridade foram utilizados provetes cúbicos (três provetes para cada tipo de betão leve) com dimensão de 10x10x10 cm³ e com cura de 28 dias. O ensaio de absorção de água por capilaridade, teve uma duração de 340 horas, este tempo de duração deveu-se à verificação do seu comportamento ao longo do tempo.

Observando a Figura 62, existem ligeiras diferenças nas mudanças das quatro curvas devido à composição de cada mistura relativamente à substituição do RMCF. Nota-se no início do ensaio uma rápida absorção capilar no geral em todas as misturas, no entanto essa rápida absorção capilar vai se atenuando nas misturas com maior percentagem de RMCF ao longo do tempo. Nas misturas R0 e R30 existe um volume de poros interligados no betão quando comparados com as misturas R60, R80, como se observa na Figura 62.

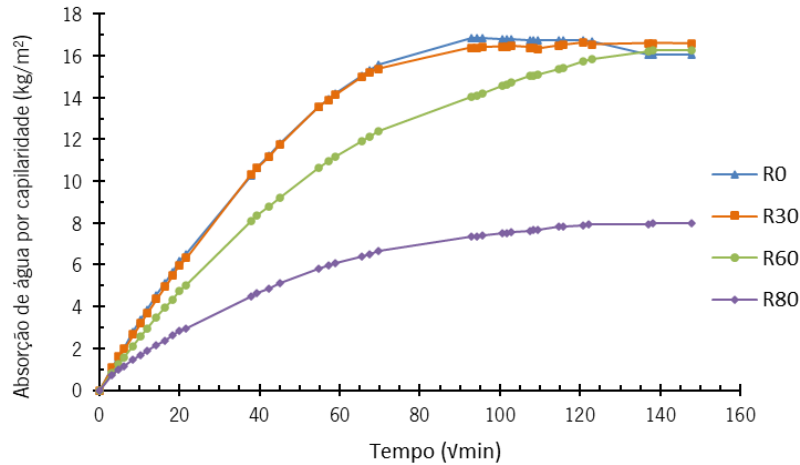


Figura 62. Curva de absorção de água por capilaridade

3.5. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com norma de EN 12390-3 [23]. Para cada tipo de betão leve foram ensaiados três provetes cúbicos com dimensão de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ com uma cura de 28 dias. Por fim, obteve-se os resultados de resistência à compressão dos betões leves representados na Figura 63. Podemos afirmar que estes betões leves estudados apresentam características mecânicas num intervalo de 17 a 36 MPa e existe uma tendência para os valores de resistência à compressão, assim como os valores de densidade aumentarem à medida que se aumenta a substituição por RMCF.

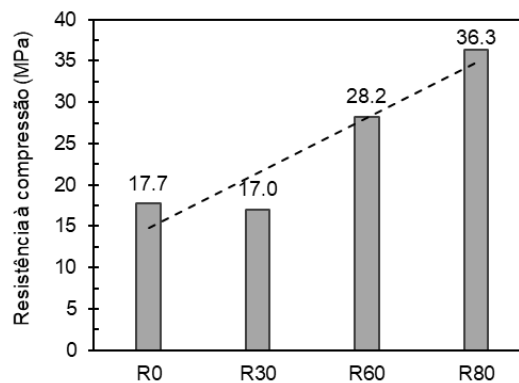


Figura 63. Os resultados de resistência à compressão (MPa)

3.6. Resistência à flexão

Os valores médios de resistência à flexão foram determinados de acordo com a norma EN 12390-5 [24]. Tal como foi verificado na resistência à compressão o aumento da resistência à medida que se aumenta a percentagem de RMCF nas misturas, também na resistência à flexão foi demonstrado tal e qual a mesma tendência de valores, como podemos observar na Figura 64.

Pode-se observar na Figura 64 que conforme a quantidade de RMCF aumenta, a resistência à flexão dos provetes aumenta. Isso prova que a incorporação de RMCF pode aumentar a resistência à flexão do betão leve endurecido e, à medida que a quantidade aumenta, sua contribuição para a resistência à flexão se torna mais forte.

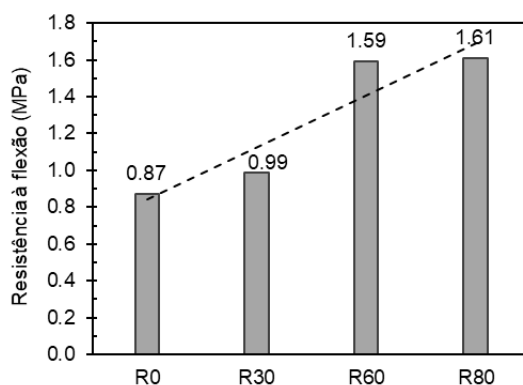


Figura 64. Os resultados de resistência à flexão (MPa)

3.7. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do betão depende da rigidez da estrutura interna do material, que está diretamente relacionada com a porosidade do material [25].

De acordo a norma EN 12390-13 [26], três provetes cilíndricos para cada tipo de mistura de betão leve foram testados. Para cada ensaio do módulo de elasticidade foram realizados 3 ciclos de carga e descarga, e na Figura 65 é exemplificado para um dos provetes de uma determinada mistura a realização dos ensaios dos módulos de elasticidade, no qual são apresentados os resultados graficamente dos ciclos efetuados, assim como os gráficos dos módulos de elasticidade para cada sensor de deslocamento.

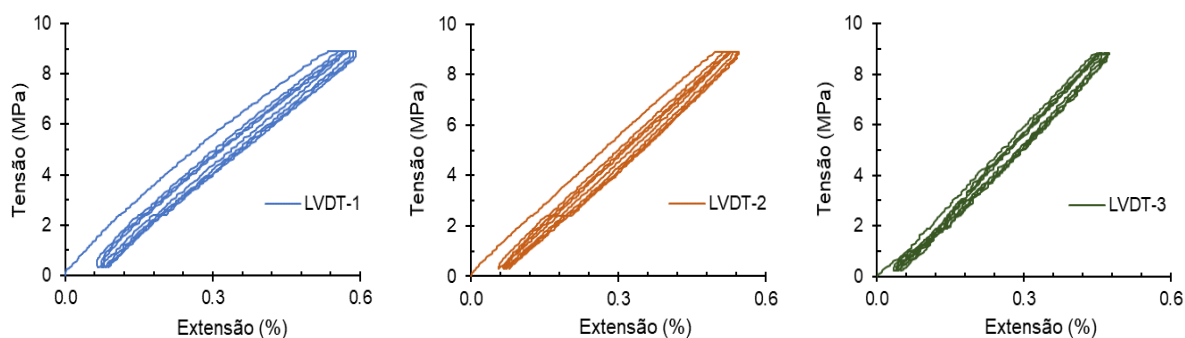


Figura 65. Resultados graficamente obtidos dos ciclos carga e descarga efetuados para a obtenção dos módulos de elasticidade

Após os 3 ciclos de carga e descarga para a tensão e extensão efetuados foram calculados graficamente os módulos de elasticidade e verificados de acordo com a norma para cada provete de cada mistura. Na Figura 66 é mostrado um exemplo do módulo calculado graficamente para um dos provetes de uma determinada mistura.

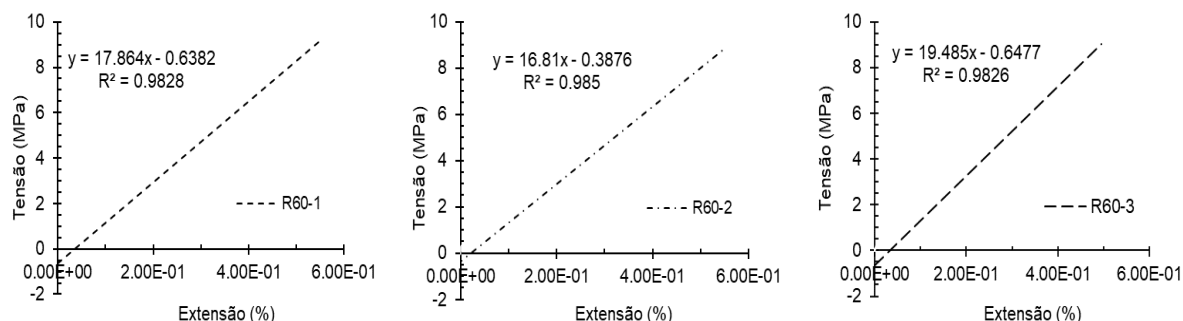


Figura 66. Resultados graficamente obtidos da mistura de R60 de três provetes

Após todos ensaios realizados para os módulos de elasticidade de todas as misturas foram todos resumidos, tal como observado na Figura 67.

Observa-se que existe uma tendência de aumento tendencial dos valores do módulo de elasticidade à medida que se realizou a incorporação de RMCF. Podemos afirmar que os valores obtidos do módulo de elasticidade são valores que se enquadram neste tipo de betões leves e com valores normais. Isso pode ser explicado porque o aumento do teor de RMCF reduz o teor de vazios no betão leve, aumentando assim o módulo de elasticidade, resistência e massa volúmica do betão leve.

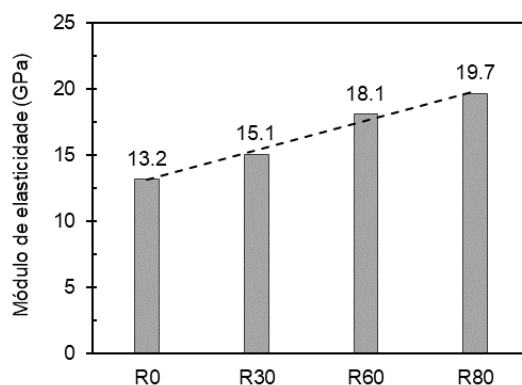


Figura 67. Valores dos módulos de elasticidades para as misturas estudadas

3.8. Migração de cloretos em regime não estacionário

De acordo com a norma LNEC E 463 [27], o ensaio migração de cloretos em regime não estacionário foi realizado. As profundidades médias de penetração de iões cloreto dos provetes foram testadas e os coeficientes de difusão no estado não estacionário foram calculados, mostrando-se na Figura 68.

Observando-se na Figura 68, com o aumento da quantidade de RMCF, a taxa de migração dos iões cloreto diminui. De zero de RMCF a 30% de quantidade, a taxa de migração de iões cloreto diminui obviamente. Portanto, a incorporação do agregado RF substitui o AE e reduz a porosidade, diminuindo o assim a migração de iões cloreto. Também está provado deste aspeto que a durabilidade do betão leve com agregado RF é melhor do que a do betão leve R0.

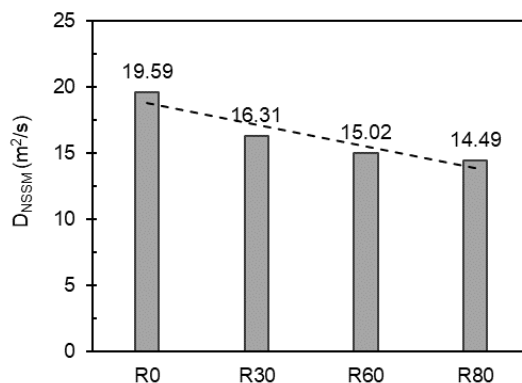


Figura 68. O coeficiente de difusão no estado não estacionário dos provetes

3.9. Carbonatação

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12390-12 [28], a profundidade média de carbonatação do provete nos 56, 63 e 70 dias é registada, conforme mostrado na Figura 69. Comparando com betão leve com RMCF, a profundidade de carbonatação do betão leve sem RMCF muda muito com o tempo. No dia 56, o provete R30 tem a profundidade de carbonatação mais profunda. A profundidade de carbonatação dos provetes R0 e R60 são basicamente a mesma, e a profundidade de carbonatação de R80 é a mais baixa. No dia 63, as profundidades de carbonatação de todos os provetes aumentaram, especialmente, a taxa de crescimento da profundidade de carbonatação do provete R0 foi de 15.3%, que se mudou mais do que nos provetes restantes, mas ainda ficando abaixo de R30. No dia 70, as profundidades de carbonatação de R30, R60 e R80 continuam a manter basicamente a pouca taxa de crescimento, especialmente a profundidade de carbonatação de R80 que é a menor. A profundidade de carbonatação de R0 excedeu R30. A razão para o aumento da profundidade de carbonatação na fase posterior de R0 é também a porosidade do AE, pois assim que o CO₂ entrar no betão, haverá uma taxa de carbonatação mais rápida. O RMCF relativamente denso inibirá a rápida difusão de CO₂ até certo ponto.

No fim, o betão leve com grande quantidade de RMCF tem melhor desempenho na resistência à carbonatação do que o betão leve com AE. No entanto, o betão leve com 30% de quantidade de RMCF não apresentou melhor desempenho no estágio inicial de carbonatação, mas foi significativamente melhor do que o betão leve sem RF no processo posterior de carbonatação. Em termos de desempenho de carbonatação de betão leve com RF, verifica-se que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento da quantidade de RF.

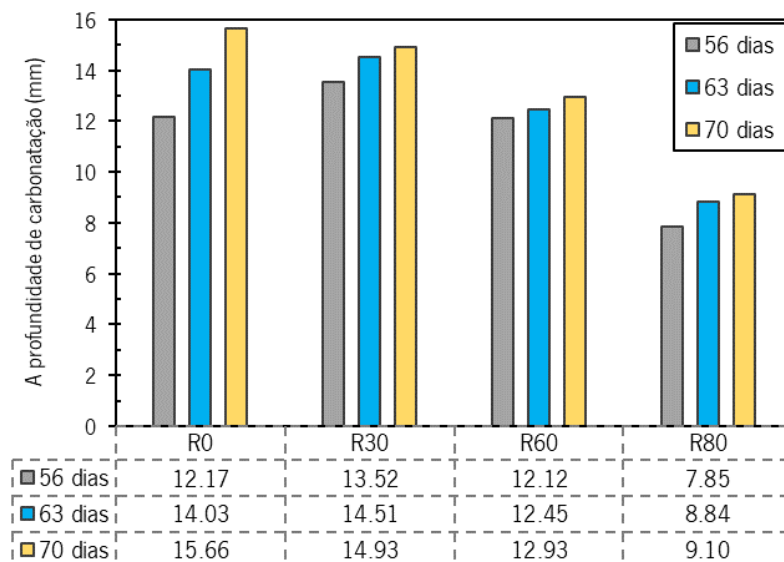


Figura 69. A profundidade de carbonatação no dia 56, 63 e 70 (mm)

4. CONCLUSÃO

No processo de industrialização, os resíduos sólidos trazem grandes prejuízos ao meio ambiente ecológico, enquanto o desenvolvimento do moderno sector de construção aumentou a demanda por betão ano a ano. Neste contexto, levamos em consideração o desenvolvimento ambiental e económico, aplicamos os resíduos sólidos excedentes industriais como matéria-prima para agregados de betão, preparamos o betão leve necessário em projetos reais e realizamos o reaproveitamento de resíduos e uma cooperação amigável entre as duas indústrias.

Neste estudo, foram utilizadas as seguintes quantidades: 30%, 60% e 80% de RMCF para substituir parcialmente os agregados leves de AE. Foram conduzidos ensaios comparativos sobre as propriedades mecânicas e durabilidade de todos os provetes de betões leves e tirou-se as seguintes conclusões: (1) A quantidade de RMCF tem grande influência no desempenho de trabalhabilidade do betão leve. Quando a relação de água/cimento é a mesma, para atingir o nível de abaixamento 10, o SP necessário para o betão leve com quantidade de RMCF 80% é 3,5 vezes da quantidade com RMCF de 30%. (2) Sobre as propriedades físicas de betões leves, com a elevação da quantidade de RMCF, a absorção de água por capilaridade e a absorção de água por imersão reduzem. (3) Quando a quantidade de RMCF aumenta, a densidade do betão leve aumenta, assim como a resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade, e as propriedades mecânicas do betão leve são melhores. (4) Em termos de durabilidade, com a elevação da quantidade de RMCF, o coeficiente de difusão no estado não estacionário e a profundidade de carbonatação reduzem, e a probabilidade de corrosão e a taxa de corrosão do betão leve diminuem em relação ao betão leve de referência.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal e graças ao ambiente de trabalho do laboratório da Universidade do Minho.

REFERÊNCIAS

- [1] EN 206-1, “Concrete - Part 1: Specification, performance, production e conformity,” *Concrete*, 2007.
- [2] J. Lourenço, E. Júlio, and P. Maranhã, “Expanded clay lightweight aggregate concrete (in portuguese),” pp. 1–8, 2004.
- [3] K. C. Thienel, T. Haller, and N. Beuntner, “Lightweight concrete-from basics to innovations,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 5, 2020, doi: 10.3390/ma13051120.
- [4] J. Hamad Mohammed and A. J. Hamad, “Materials, properties and application review of lightweight concrete,” *Rev. Tec. la Fac. Ing. Univ. del Zulia*, vol. 37, no. 2, pp. 10–15, 2014.
- [5] H. Li, Q. Deng, J. Zhang, B. Xia, and M. Skitmore, “Assessing the life cycle CO₂ emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 210, no. 38, pp. 1496–1506, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.102.
- [6] Z. He, X. Zhu, J. Wang, M. Mu, and Y. Wang, “Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 965–973, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289.
- [7] K. H. Obla, “What is green concrete?,” *Indian Concr. J.*, vol. 83, no. 4, pp. 26–28, 2009.
- [8] E. Q. R. Santiago, P. R. L. Lima, M. B. Leite, and R. D. Toledo Filho, “Mechanical behavior of recycled lightweight concrete using EVA waste and CDW under moderate temperature,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 2, no. 3, pp. 211–221, 2009, doi: 10.1590/s1983-41952009000300001.
- [9] A. Sales, F. R. De Souza, W. N. Dos Santos, A. M. Zimer, and F. D. C. R. Almeida, “Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 12, pp. 2446–2453, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.012.
- [10] J. A. Bogas, A. Gomes, and M. F. C. Pereira, “Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 1013–1022, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111.
- [11] B. Bhardwaj and P. Kumar, “Waste foundry sand in concrete: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 661–674, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010.
- [12] Z. Fan, F. Liu, W. Long, and G. Li, “A new low-cost method of reclaiming mixed foundry waste sand based on wet-thermal composite reclamation,” *China Foundry*, vol. 11, no. 5, pp. 402–407, 2014.
- [13] L. Chengdu Jin Derong Mould Co., “Status Quo of China’s Foundry Moulds,” 2020. <http://jdrmj.com/index.php/shows/34/169.html>.
- [14] R. Siddique, G. de Schutter, and A. Noumowe, “Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 976–980, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.005.
- [15] S. Cunha, P. Leite, and J. Aguiar, “Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials,” *J. Energy Storage*, vol. 30, no. April, p. 101439, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101439.
- [16] O. Gencel, F. Koksall, C. Ozel, and W. Brostow, “Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 633–640, 2012,

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.026.

- [17] EN 1097-6, "Tests of mechanical and physical properties of aggregates; Part 6: Determination of density and water absorption;" IPQ, p. 52, 2016.
- [18] EN 933-1, "Tests of geometric properties of aggregates; Part 1: Particle size analysis; sieving method." IPQ, p. 20, 2014.
- [19] Master Builders Solutions company, "Técnica: MasterGlenium SKY 617," <https://www.master-builders-solutions.com/pt-pt/produtos/mastergleniumsky/masterglenium-sky-617>, pp. 1–3, 2021.
- [20] J. Figueroa, M. Fuentealba, R. Ponce, and M. Zúiga, "Effects on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Mass Concrete by the Replacement of Fine Aggregate by Mussel Shell Particulate," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 503, no. 1, p. 11, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/503/1/012070.
- [21] LNEC E 394, "LNEC E-394 - Concrete: Determination of water absorption by immersion," 1993.
- [22] LNEC E 393, "LNEC E-393 - Concrete: Determination of capillary water absorption," 1993.
- [23] EN-12390-3, "Hardened concrete tests, Part 3: Compressive strength of test specimens." 2003.
- [24] EN 12390-5, "Ensaio do betão endurecido Parte 5: Resistência à flexão de provetes." Portugal, p. 12, 2003.
- [25] J. Brito, "Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões. Lição de síntese para provas de agregação". Lisboa." 2005.
- [26] EN 12390-13, "Testing hardened concrete Part 13 : Determination of secant modulus of elasticity in compression." BS, p. 18, 2013.
- [27] "LNEC E 463 - Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário." 2004.
- [28] EN 12390-12, "Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method." CEN, p. 18, 2020.