

Avaliação do desempenho de argamassas com areias do leito fluidizado de centrais de queima de biomassa

CRISTIANA GONILHO-PEREIRA¹

JÚLIA DELOROSO²

ANDREA BETIOLI²

¹ ESTB e INCITE, Instituto Politécnico de Setúbal | Barreiro | Portugal

² Departamento Acadêmico de Construção Civil, Instituto Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil

Autor correspondente: cristiana.pereira@estbarreiro.ips.pt

Palavras-chave

Argamassas, Resíduos, Biomassa, Areais do leito fluidizado

Resumo

Os impactes associados ao fornecimento de recursos naturais para a atividade industrial são cada vez maiores, quer a nível ambiental quer a nível económico. A utilização e transformação destes recursos gera impactes no meio ambiente, nomeadamente, através da produção de resíduos. Torna-se imprescindível promover a utilização de resíduos como matérias-primas alternativas, implementando estudos que perspetivem soluções concretas de valorização.

No setor da Construção Civil são vários os estudos sobre o potencial da utilização de resíduos de diferentes naturezas. À data, despertam particular interesse os resíduos provenientes das centrais de queima de biomassa - cinzas volantes e as areias do leito fluidizado -, à semelhança do ocorrido com os materiais homólogos provenientes das centrais de queima de carvão. O objetivo tem sido a avaliação do potencial de substituição parcial de cimento e/ou de agregado fino na produção de argamassas e betão.

Com o objetivo de contribuir para o estado dos conhecimentos sobre o potencial de utilização das areias do leito fluidizado de caldeiras de queima de biomassa, o trabalho apresenta um estudo comparativo entre argamassas de cimento produzidas com agregado natural e argamassas de cimento produzidas com resíduo, em substituição parcial do agregado natural. Mais, e com o objetivo de aferir a viabilidade de utilização do resíduo nas condições de fornecimento, o trabalho apresenta também um estudo comparativo entre argamassas de cimento produzidas com resíduo conforme fornecimento e argamassas de cimento produzidas com resíduo com granulometria e baridade manipuladas.

Os três tipos de argamassas foram caracterizados, aos 7 e aos 28 dias, através de ensaios de caracterização mecânica e física.

O estudo permitiu concluir que há melhorias do desempenho das argamassas com substituição parcial do agregado natural pelo resíduo, que são mais evidentes quando este apresenta granulometria e baridade manipulada.

1| INTRODUÇÃO

Os impactes associados ao fornecimento de recursos naturais para a atividade industrial são cada vez maiores, quer a nível ambiental quer a nível económico. A utilização e transformação destes recursos gera impactes no meio ambiente, nomeadamente, através da produção de resíduos. Torna-se imprescindível promover a utilização de resíduos como matérias-primas alternativas, implementando estudos que perspetivem soluções concretas de valorização [1].

Esta necessidade assenta no princípio basilar de Economia Circular (EC), que consiste num modelo para o desenvolvimento industrial sustentável, em alternativa ao modelo atual de Economia Linear (EL). EC é um conceito estratégico que visa a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Assenta na valorização das matérias-primas, redução de custos e aumento de eficiência da produção, entre outros, otimizando a utilização dos recursos e “evitar os danos [ambientais] irreversíveis causados pela utilização de recursos a um ritmo que excede a capacidade da Terra para os renovar” [1], [2].

O setor da Construção Civil não é exceção. Com o aumento do custo das matérias-primas e a redução dos recursos naturais e, nalguns casos, os benefícios que apresentam, a utilização de resíduos é uma alternativa viável. São vários os estudos sobre o potencial da utilização de resíduos, aliás, o impacte ambiental relacionado com o uso de vários materiais está na ordem do dia e tem sido alvo de estudo nas últimas décadas [3]–[6].

A Comissão Europeia, já em 2015, identificou o domínio Construção e Demolição como prioritário, nesta matéria, bem como o domínio Biomassa e Produtos de Base Biológica [1]. Neste sentido, Portugal impôs a desativação das centrais termoelétricas, de base de queima de carvão, até ao ano 2030. Com a desativação destas centrais, desaparecem, também, as cinzas volantes utilizadas, nos dias de hoje, na produção de cimento e betão.

Um aspeto importante da conversão termoquímica da biomassa em energia é a produção de cinzas, que, consoante as suas propriedades, poderão ter diversas aplicações [7]–[10]. Neste sentido, as cinzas de caldeiras de queima de biomassa têm sido alvo de estudos, à semelhança do ocorrido com os materiais homólogos provenientes das centrais de queima de carvão. Nas aplicações em cimentos, argamassas e betões, o objetivo tem sido a avaliação do potencial da substituição parcial de cimento, da utilização como adição e da substituição de agregados finos. Tendo em mente os objetivos da EC, tem crescido o número de estudos e publicações a respeito deste assunto [2], [4], [5], [10]–[13]. Este trabalho debruça-se sobre esta última aplicação – substituição total/parcial de agregados finos na produção de argamassas.

As areias de leito fluidizado são, normalmente, resíduos não perigosos compostos principalmente por partículas de areia siliciosa (quartzo), com granulometria que varia entre alguns micrómetros até alguns milímetros geralmente contendo uma camada de revestimento com espessura relativamente fina de material vítreo, por produtos de combustão de dimensões superiores e por cinzas [9], [10].

São vários os estudos sobre a substituição total/parcial dos agregados naturais finos por areias de leito fluidizado (ALF), provenientes de centrais de queima de biomassa [10]–[12], [14].

2| METODOLOGIA

Este trabalho pretende contribuir para o estado dos conhecimentos sobre o potencial de utilização de ALF em substituição total/parcial de agregados naturais na produção de argamassas. Com este objetivo, foram produzidos e caracterizados 3 tipos de argamassa (Tabela 1), ao traço 1:3,5 em massa. Foi produzida e caracterizada uma argamassa de referência – argamassa de cimento (CEM I 42,5N), areia fina 0/2 e areia grossa 0/4, estas últimas na proporção 1:2 e razão água/cimento (A/C) de 0,60. Paralelamente, foi produzida uma argamassa com areia do leito fluidizado (ALF), sem que esta tivesse sido sujeito a qualquer tipo de processamento, i. e., conforme fornecimento. Com isto, pretende-se aferir a viabilidade da utilização do resíduo tal e qual é gerado. Foi, também, produzida uma argamassa com ALF com granulometria manipulada, mantendo-a igual à da areia natural fina 0/2. A razão A/C manteve-se constante.

Tabela 1. Argamassas produzidas

Designação	CEM 42,5N	Agregado Natural		Areias de Leito Fluidizado (ALF)	
		0/2	0/4	conforme fornecimento (SM)	granulometria manipulada (M)
Ref	✓	✓	✓	-	-
AreiaSM	✓	-	✓	✓	-
AreiaM	✓	-	✓	-	✓

O trabalho foi elaborado em 5 fases: (i) caracterização do agregado natural 0/2, 0/4 e ALF; (ii) composição e produção das argamassas Ref, AreiaSM e AreiaM; (iii) caracterização das argamassas no estado fresco; (iv) moldagem, desmoldagem e cura de provetes; e, por fim, (v) caracterização das argamassas no estado endurecido, aos 7 e 28 dias de idade.

3| PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

3.1. Caracterização dos agregados

Na produção das argamassas foram utilizadas duas areias com granulometrias distintas. Uma areia fina, 0/2, proveniente da Herdade da Mesquita na zona de Sesimbra, Portugal, e uma areia grossa, 0/4, proveniente do Pinhal Conde Cunha 4, na zona do Seixal, Portugal. De acordo com o fornecedor, a primeira é constituída por quartzo, feldspato, quartzito (partículas subangulosas a subarredondadas) e a segunda, para além destes três componentes, também incorpora moscovite. A utilização destas duas areias na proporção 1:2 (areia fina: areia grossa), teve como objetivo diminuir o volume de vazios do esqueleto sólido da argamassa.

Foi efetuada a caracterização geométrica dos três agregados em estudo: areia fina natural 0/2; areia grossa natural 0/4 e areia do leito fluidizado (ALF).

Procedeu-se à determinação da granulometria e da baridade de acordo com os procedimentos descritos em NP EN 933-1:2014 [15] e em NP EN 1097-3: 2002 [16], respetivamente. No que diz respeito à baridade, a Tabela 3 apresenta os valores obtidos para cada uma das areias estudadas.

Tabela 3. Baridade de areias naturais e da areia do leito fluidizado (ALF)

	Areia Natural		Areias de Leito Fluidizado (ALF) (conforme fornecimento)
	0/2	0/4	
Baridade [kg/m ³]	1495,83 ± 5,50	1554,05 ± 2,86	1390,20 ± 3,50

Relativamente à granulometria (Figura 1), verifica-se que a granulometria da ALF é próxima da granulometria da areia natural 0/2 e, por isso, optou-se por estudar a substituição parcial do agregado natural nas argamassas, substituindo a areia natural fina – areia 0/2 – em 100% e mantendo a areia natural grossa – areia 0/4.

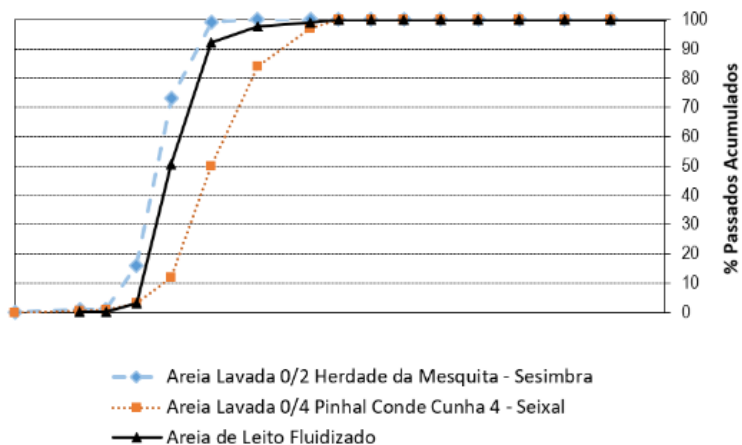


Figura 1. Curvas granulométricas dos agregados naturais – 0/2 e 0/4 – e da areia do leito fluidizado (ALF)

3.2. Composição e produção das argamassas

Conforme já referido, foram produzidos 3 tipos de argamassa: argamassa de referência (Ref); argamassa com substituição parcial do agregado natural por ALF nas condições de fornecimento (AreiaSM); e argamassa com substituição parcial do agregado natural por ALF com granulometria modificada (AreiaM). A manipulação da ALF teve como objetivo garantir que apresentasse granulometria igual à da areia natural fina – areia 0/2. A Tabela 4 apresenta as composições das argamassas produzidas.

Tabela 4. Quantidade de materiais utilizados nas argamassas

Material	Quantidade	
	[kg]	[l]
Cimento	100,00	-
Areia natural 0/4	239,04	-
Areia natural 0/2 ALF ALFmodificado	115,10	-
Água	-	60,00

A preparação das argamassas procurou seguir a metodologia descrita nas normas NP EN 196-1 [17] e EN 1015-2/A1 [18], com recurso a uma misturadora mecânica. Os constituintes sólidos foram misturados a seco, manualmente, previamente à mistura mecânica. Na misturadora mecânica, procedeu-se à introdução da água na dosagem pré-determinada.

3.3. Caracterização das argamassas no estado fresco

As argamassas foram caracterizadas quanto à consistência e à massa volúmica aparente. A análise da consistência por espalhamento foi realizada conforme a norma EN 1015-3/A1/A2 [19]. A determinação da massa volúmica aparente das argamassas no estado fresco teve por base o disposto na norma EN 1015-6:1998 [20]. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Consistência por espalhamento e massa volúmica aparente das argamassas Ref, AreiaSM e AreiaM

Argamassa	Espalhamento (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)
Ref	166,585	2120,345
AreiaSM	158,020	2010,862
AreiaM	152,085	1934,138

As argamassas com substituição da areia natural 0/2 pela ALF apresentam diminuição do diâmetro de espalhamento, quando comparadas com a argamassa Ref. A argamassa AreiaSM apresenta uma diminuição no espalhamento de 5,1%. Quando a substituição ocorre pela ALF com granulometria manipulada, a diminuição é da ordem dos 8,7%. Igual tendência se verifica na massa volúmica aparente. A Argamassa AreiaSM apresenta uma massa volúmica aparente inferior à da argamassa Ref, em 5,2%, e a argamassa AreiaM apresenta uma diminuição de 8,2%. A diminuição da massa volúmica nas argamassas com substituição deve-se, provavelmente, à menor baridade e à menor massa volúmica da ALF, quando comparada com a areia natural. No que diz respeito ao espalhamento, as argamassas Ref e AreiaM foram produzidas com agregados de igual granulometria, contudo, verifica-se que a argamassa AreiaM apresenta maior consistência. Tal confirma que o formato das partículas influi, também, na consistência e massa volúmica [21], mas esta hipótese deve ser pesquisada.

3.4. Moldagem, desmoldagem e cura de provetes

Para cada argamassa foram moldados 9 provetes prismáticos de 40x40x160 mm e utilizado o compactador mecânico para proceder à compactação das argamassas, de acordo com a NP EN 196-1 [17]. Após a compactação, os moldes foram colocados sobre uma superfície horizontal, protegidos da radiação solar direta e cobertos por um filme de polietileno. Os provetes foram desmoldados aos 2 dias de idade, identificados e colocados em cura húmida com humidade relativa de 95% e temperatura de 20°C. Os provetes foram retirados aos 7 e 28 dias de idade para se proceder à caracterização no estado endurecido.

3.5. Caracterização das argamassas no estado endurecido

3.5.1. Massa volúmica aparente

A determinação da massa volúmica aparente das argamassas foi determinada pesando os provetes e determinado o volume aparente com base nas dimensões dos provetes (40 x 40 x 160 mm). A massa volúmica aparente foi determinada aos 7 e 28 dias, com os provetes nas condições de húmidos, e aos 28 dias com os provetes na condição de secos (Figura 2 (a)).

A tendência verificada na massa volúmica aparente, no estado fresco, volta-se a verificar no estado endurecido, para os provetes secos, aos 28 dias de idade. Ainda assim, as diminuições são da ordem dos 1%, o que se pode considerar que não há diferenças entre as 3 argamassas. No que diz respeito aos provetes no estado húmido, as diferenças das massas volúmicas não atingem os 2% logo, mais uma vez, podem-se considerar semelhantes.

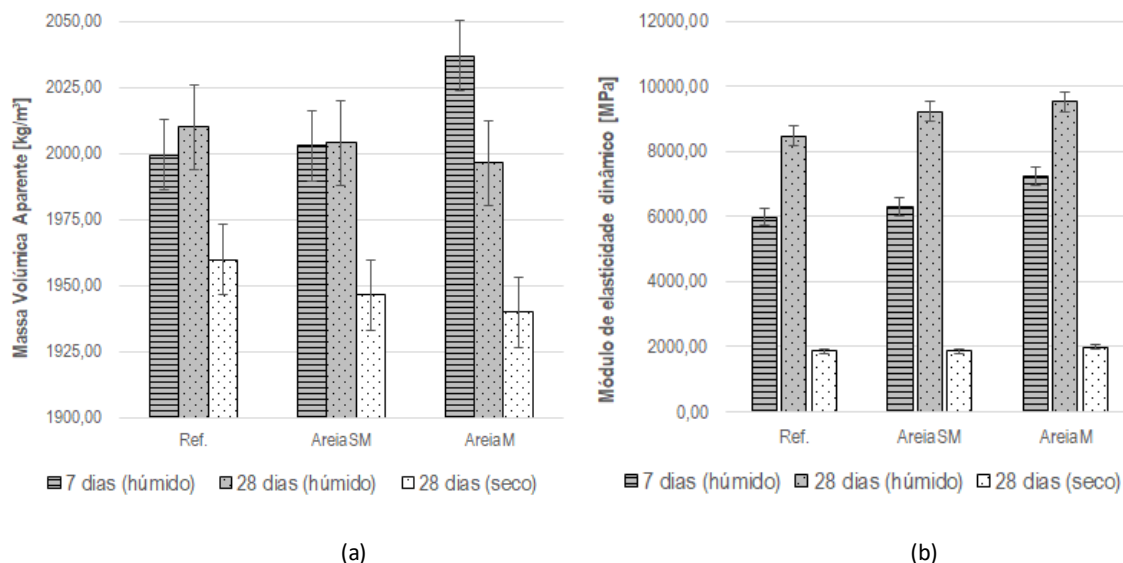


Figura 2. Massa volúmica aparente (a) e módulo de elasticidade dinâmico (b) das argamassas Ref, AreiaSM e AreiaM, aos 7 e 28 dias, na condição de húmido, e aos 28 dias, na condição de seco

3.5.2. Velocidade de propagação de ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico

A determinação da velocidade de propagação de ultrassom foi efetuada de acordo com a EN 14146:2004 [22], através do método direto, aos 7 e 28 dias, com os provetes nas condições de húmidos, e aos 28 dias com os provetes na condição de secos, com recurso ao equipamento Pundit Lab. Para a estimativa do coeficiente de Poisson segundo Carneiro (1999), citado por Silva e Campiteli (2008) [23], o valor deve variar entre 0,10 e 0,20 para argamassas. No presente trabalho foi adotado o valor de 0,20.

Com a exceção da argamassa AreiaSM (Figura 2 (b)), aos 28 dias de idade e na condição de seca, as argamassas com substituição da areia natural por ALF apresentam módulo de elasticidade superior ao da argamassa de referência, em todas as idades e para as duas condições do provete – húmido e seco. Quando analisados os resultados obtidos no estado húmido, é a argamassa AreiaM a que apresenta módulos de elasticidade mais elevados. No estado seco, pode-se considerar que o módulo de elasticidade da argamassa AreiaSM é semelhante ao da argamassa Ref, sendo que na argamassa AreiaM se verifica um aumento ligeiro (6%).

Essa semelhança ocorre porque o tempo de propagação da onda é diretamente proporcional à relação areia/ligante [23] e todas as argamassas possuem a mesma relação, então o tempo de propagação das ondas foi semelhante em todas elas. Da mesma forma, como o E_d depende apenas da velocidade de propagação e do coeficiente de Poisson, as três argamassas apresentam valores semelhantes.

3.5.3. Resistências mecânicas

A caracterização mecânica das argamassas foi realizada de acordo com o estipulado na EN 1015-11/A1 [24] e os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias, com os provetes nas condições de húmidos, e aos 28 dias com os provetes na condição de secos. O ensaio de resistência à tração por flexão foi realizado nos provetes utilizados na determinação do módulo de elasticidade dinâmico. O equipamento utilizado foi uma prensa de flexão/compressão (módulo flexão) com uma célula de carga de 15 Kn. Os resultados dos provetes com 28 dias de idade, nas condições de secos, não são considerados neste trabalho por ter sido detetado um erro no procedimento de ensaio. O ensaio de resistência à compressão foi realizado numa das metades dos provetes que resultaram do ensaio de resistência à tração. Neste ensaio, o equipamento utilizado foi a prensa de flexão/compressão (módulo compressão) com célula de carga para compressão de 250 kN.

A Figura 3 (a) permite concluir que a resistência à tração por flexão aumenta com a substituição do agregado natural pela ALF. Se a ALF apresentar a granulometria manipulada, os ganhos mecânicos vêm-se aumentados em cerca de 258% e 227%, para as idades de 7 e 28 dias, respetivamente, quando comparados com a argamassa Ref.

Relativamente à resistência à compressão (Figura 3 (b)), aos 28 dias de idade e no estado húmido, pode retirar-se tendência semelhante. Relativamente aos resultados obtidos aos 7 dias (estado húmido) e aos 28 dias (estado seco), verifica-se que a substituição do agregado natural por ALF só conduz ao aumento da resistência mecânica se a ALF tiver granulometria modificada. Caso contrário, regista-se uma diminuição da resistência mecânica de 10 e 11%, respetivamente, quando comparado com a argamassa Ref. Os resultados aqui obtidos são corroborados pelo Ed. Mais uma vez, a argamassa Ref e a argamassa AreiaM apresentam agregados com igual granulometria. A diferença aqui registada é atribuída à natureza do agregado.

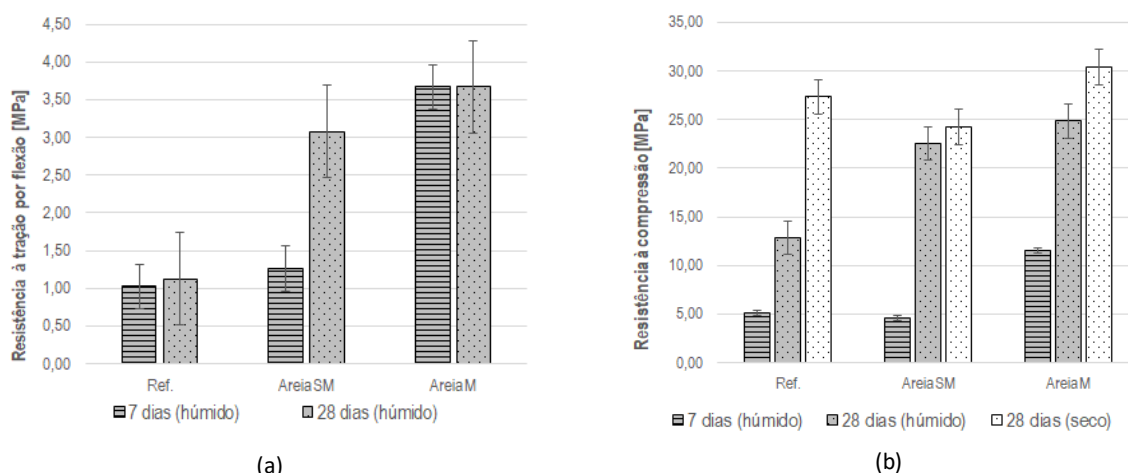


Figura 3. Resistência à tração por flexão (a) e à compressão (b) das argamassas Ref, AreiaSM e AreiaM, aos 7 e 28 dias, na condição de húmido e seco.

4| ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Tabela 6 apresenta um resumo do desempenho aferido nas 3 argamassas. O símbolo “↑/↓” indica a argamassa que apresenta melhor/pior desempenho que a argamassa Ref. e o símbolo “=” indica desempenho semelhante ao da argamassa Ref.

Tabela 6. Resumo dos resultados obtidos

Propriedades/características analisadas	Argamassas	
	AreiaSM	AreiaM
Consistência por espalhamento	↓	↓↓
Massa volúmica (estado fresco)	↓	↓↓
Massa volúmica aparente (28 dias – seco)	=	=
Módulo de elasticidade dinâmico	=	↑
Resistência mecânica (compressão, 28 dias – seco)	↓	↑↑

Como pode observar-se, a argamassa AreiaSM apresentou, na generalidade, resultados mais próximos aos da argamassa Ref. A argamassa AreiaM apresentou, no estado endurecido, e aos 28 dias de idade, módulo de elasticidade dinâmico e resistência mecânica mais elevados que a Ref. e que a AreiaSM. Os resultados obtidos são corroborados por resultados obtidos por outros autores. Argamassas com substituição de agregado natural por ALF tendem a apresentar espalhamento inferior ao de argamassas com agregados naturais. Modolo, R.C.E. et al [10], estudou argamassas de cimento com incorporação de ALF em substituição parcial (50%) e total (100%) do agregado natural e verificou que, com o aumento da percentagem de substituição da areia natural por ALF, os tempos de presa e o espalhamento diminuem.

Relativamente à resistência mecânica, designadamente à compressão, verifica-se que a substituição parcial do agregado natural por ALF pode conduzir a uma diminuição, ou aumento, deste parâmetro. Modolo, R.C.E. et al [10], verificou que as resistências mecânicas à compressão tendem a aumentar com o uso das ALF mas que esse aumento é da ordem dos 0,1 a 0,3 MPa quando comparados com a argamassa de referência (100% areia natural). Também Dias [14] concluiu que a substituição de 40% de agregado natural por ALF contribui para o aumento das resistências mecânicas à compressão, verificando um aumento na ordem dos 18%. Kayali [13] verificou um aumento de resistência à compressão, de cerca de 16%, com a substituição total de agregados finos e grossos naturais por ALF, na produção de betões. Já Yüksel et al. [25] verificaram que a resistência mecânica, avaliada aos 28 dias de idade, diminui com a substituição parcial do agregado fino natural por ALF (50%). Kurama and Kaya [6] obtiveram resultados análogos. Também, Waldemar Kępys [12], no seu estudo, substituiu 25, 50, 75 e 100% da areia natural por ALF e verificou um decréscimo das resistências mecânicas com a presença de ALF.

5| CONCLUSÕES

Analisadas as características do resíduo e verificadas as principais características das argamassas produzidas, conclui-se que a incorporação de areias de leito fluidizado (ALF) provenientes de centrais de queima de biomassa parece ser uma alternativa viável ao uso de areia natural. As argamassas com incorporação de ALF produzidas apresentaram resultados satisfatórios e próximos aos da argamassa Ref., o que mostra que é tecnicamente viável produzir este tipo de argamassa sem grandes manipulações no resíduo e sem repercussões significativas nas propriedades e características necessárias em argamassas de revestimento.

O estudo corrobora, quer Modolo, R.C.E. et al [10], quer Waldemar Kępys [12], concluindo, também que as propriedades físicas e económicas das ALF conferem ao material potencialidade para substituir a areia natural em argamassas, sem repercussões negativas relevantes.

Também este trabalho demonstra que, na generalidade, as argamassas AreiaSM e AreiaM apresentam desempenhos satisfatórios e capazes de representar alternativas sustentáveis às argamassas convencionais. Contudo, a argamassa AreiaSM parece ser opção mais interessante por ter propriedades e características mais próximas à argamassa Ref. A isto, acresce o facto de possibilitar a utilização do resíduo nas condições de fornecimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à The Navigator Company pelo fornecimento dos resíduos.

Referências

- [1] Comissão Europeia, “Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia circular,” Off. J. Eur. Union, pp. 1–24, 2015.
- [2] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?,” J. Clean. Prod., vol. 143, pp. 757–768, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

- [3] H. R. Gavali, A. Bras, P. Faria, and R. V. Ralegaonkar, "Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, pp. 180–191, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.152.
- [4] F. L. Oliveira and E. F. Mello, "A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ," *Rev. Bras. Geociências*, vol. 37, no. 2, pp. 374–389, 2007, doi: 10.25249/0375-7536.2007373374389.
- [5] F. Pacheco-Torgal, A. Shasavandi, and S. Jalali, "Eco-efficient concrete using industrial wastes: A review," *Mater. Sci. Forum*, vol. 730–732, pp. 581–586, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.581.
- [6] H. Kurama and M. Kaya, "Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 9, pp. 1922–1928, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.008.
- [7] A. Demeyer, J. Voundi Nkana, and M. Verloo, "Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview," *Bioresour. Technol.*, vol. 77, no. 3, pp. 287–295, May 2001, doi: 10.1016/S0960-8524(00)00043-2.
- [8] N. C. Cruz et al., "Ashes from fluidized bed combustion of residual forest biomass: recycling to soil as a viable management option," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, no. 17, pp. 14770–14781, Jun. 2017, doi: 10.1007/s11356-017-9013-6.
- [9] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass," *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, May 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.
- [10] R. C. E. Modolo, V. M. Ferreira, L. A. Tarelho, J. A. Labrincha, L. Senff, and L. Silva, "Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion," *Constr. Build. Mater.*, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.093.
- [11] H. K. Kim and H. K. Lee, "Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 1115–1122, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065.
- [12] W. Kępys, "Bottom ash obtained from biomass burning in fluidised-bed boilers as a mortar component," *E3S Web Conf.*, vol. 46, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20184600009.
- [13] O. Kayali, "Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 12, pp. 2393–2399, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.09.001.
- [14] D. M. Dias, "Estudo da Valorização de Cinzas de Biomassa na produção de materiais para a construção de recifes artificiais," Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [15] NP EN 933-1:2014, "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração." 2014.
- [16] NP EN 1097-3:2002, "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazio." 2002.
- [17] NP EN 196-1:2017, "Métodos de ensaio de cimentos; Parte 1: Determinação das resistências mecânicas." .
- [18] EN 1015-2/A1:1998/2006, "Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars." 2006.
- [19] EN 1015-3/A1/A2:1999/2004/2006, "Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)." .
- [20] EN 1015-6:1998, "Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar." .

- [21] H. Carasek, R. C. Araújo, O. Cascudo, and R. Angelim, “Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento,” *Rev. Mater.*, vol. 21, no. 3, pp. 714–732, 2016, doi: 10.1590/S1517-707620160003.0068.
- [22] EN 14146:2004, “Natural stone test methods - Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency).” .
- [23] N. G. da Silva and V. C. Campiteli, “Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia,” *Ambient. Construído*, vol. 8, no. 42, pp. 21–35, 2008.
- [24] EN 1015-11:1999, “Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.” .
- [25] İ. Yüksel, T. Bilir, and Ö. Özkan, “Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 7, pp. 2651–2659, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.07.003.