



SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR AREIAS DE LEITO FLUIDIZADO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS: UMA ABORDAGEM PARA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

KHAIRALLAH, LARISSA (1), GONILHO-PEREIRA, CRISTIANA (2); JASPER, CATARINA MARCHI (3), MELLO, AMANDA (4)

(1) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL),
LARIKTUBI@GMAIL.COM

(2) INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL, ESCOLA SUPERIOR DE
TECNOLOGIA DO BARREIRO (PORTUGAL),
CRISTIANA.PEREIRA@ESTBARREIRO.IPS.PT

(3) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL),
CATARINA.J@ALUNO.IFSC.EDU.BR

(4) INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (BRASIL)
DEMELLOAMANDA3@GMAIL.COM

ABSTRACT

This study evaluates the viability of substituting natural aggregates with fluidized bed sands (FBS) in mortar production, aiming for sustainability in construction. The research evaluates the influence of partial and total substitution of natural fine aggregates with FBS through the characterization of the produced mortars and the aggregates composing them. Considering the scarcity and non-renewability of natural resources used in construction, this research emerges as a response to the need to rethink the use of these materials, seeking to minimize environmental impacts.

The research methods involved characterization tests of FBS and the production of mortars with different compositions, including a reference mortar and three variations with partial and total substitution of natural aggregates with FBS. The results indicate that FBS has suitable physical characteristics to replace natural aggregates, although its addition affects the workability and mechanical properties of mortars.

The analysis of the results suggests that the substitution of natural aggregates with FBS may lead to a decrease in mechanical strengths and an increase in open porosity and water absorption by capillarity. However, the results also show that the total substitution of natural aggregates with FBS may be viable, depending on the applications of the mortars.

It is concluded that the use of FBS in mortar production represents a promising strategy to promote sustainability in construction, but further studies are needed to evaluate other parameters and confirm the conclusions of this initial study.

Keywords: *natural aggregates, mortar, waste, fluidized bed sands, circular economy*

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade da substituição de agregados naturais por areias de leito fluidizado (ALF) na produção de argamassas, com vista à sustentabilidade na construção civil. A pesquisa avalia a influência da substituição parcial e total dos agregados miúdos naturais por ALF através da caracterização das argamassas produzidas e dos agregados que as compõem. Considerando a escassez e não renovabilidade dos recursos naturais utilizados na construção civil, esta investigação surge como resposta à necessidade de repensar a utilização desses materiais, procurando minimizar os impactos ambientais.

Os métodos de pesquisa envolveram ensaios de caracterização das ALF e a produção de argamassas com diferentes composições, incluindo uma argamassa de referência e três variações com substituição parcial e total de agregados naturais por ALF. Os resultados indicam que a ALF apresenta características físicas adequadas para substituir os agregados naturais, embora a sua adição afete a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas das argamassas.

A análise dos resultados sugere que a substituição de agregados naturais por ALF pode levar a uma diminuição das resistências mecânicas e um aumento da porosidade aberta e absorção de água por capilaridade. No entanto, os resultados também mostram que a substituição total de agregados naturais por ALF pode ser viável, dependendo das aplicações das argamassas.

Conclui-se que a utilização de ALF na produção de argamassas representa uma estratégia promissora para promover a sustentabilidade na construção civil, mas são necessários estudos adicionais para avaliar outros parâmetros e confirmar as conclusões deste estudo inicial.

Palavras-chave: Agregados naturais, Argamassa, Resíduo, Leito Fluidizado, Economia Circular.

1 INTRODUÇÃO

Os agregados naturais são materiais particulados, incoerentes e de baixa atividade química, com variadas granulometrias e já presentes na natureza (Paulo, 2006). Embora escassos e não renováveis, são essenciais na construção civil, especialmente na produção de argamassas e concretos. No Brasil, o consumo de agregados em regiões como Fortaleza e Salvador é de até 2 ton/hab/ano, enquanto em São Paulo

chega a 4,5 ton/hab/ano. Na União Europeia, o consumo atinge 8 ton/hab/ano, superado apenas pelo consumo de água (Silva et al, [s.d.]).

Segundo a ANEPAC (2010), o consumo de agregados varia conforme o tipo de construção: em auto-construção de 35 m², utiliza-se 21 toneladas, enquanto em habitações populares de 50 m², são consumidas 68 toneladas. Para edifícios públicos de 1.000 m², o consumo é de 1.360 toneladas, e em escolas padrão de 1.120 m², chega a 1.675 toneladas. Na pavimentação urbana, um quilômetro de via de 10 metros de largura requer entre 2.000 e 3.250 toneladas, enquanto uma estrada vicinal consome 2.800 toneladas por quilômetro, e uma estrada pavimentada comum, cerca de 9.500 toneladas.

Diante da escassez de recursos, é necessário repensar o uso de agregados, buscando alternativas como a substituição por resíduos sólidos de diferentes setores industriais, promovendo uma economia circular. Geissdoerfer et al. (2016) definem a economia circular como um sistema regenerativo, essencial para a sustentabilidade e o crescimento econômico sustentável. Nesse contexto, resíduos são reaproveitados, reduzindo o uso de recursos não renováveis.

A incorporação de resíduos na produção de argamassas é uma prática recente, mas viável, conforme estudos sobre o uso de resíduos de concreto triturado (Marques, 2010) e vidro e cerâmica (Pereira e Santos, [s.d.]). No entanto, o setor da construção ainda enfrenta resistência a essas mudanças sustentáveis (Azevedo, 2018). Jacoski (2014) destaca a importância da inovação tecnológica para melhorar a produtividade e reduzir custos no setor de argamassas, foco de estudos em tecnologia de materiais.

As indústrias de papel, apesar de sua relevância econômica, geram grandes quantidades de resíduos sólidos, cerca de 0,4 toneladas para cada tonelada de papel produzido (Toczyłowska-Maminska, 2017 apud Azevedo, 2018). Esses resíduos, muitas vezes descartados em aterros, poderiam ser melhor aproveitados (Eurostat, 2015 apud Marques, 2015). Um exemplo é a utilização das Areias do Leito Fluidizado (ALF), subproduto gerado em centrais de queima de biomassa, com alto potencial como agregado em argamassas (Silva et al, [s.d.]).

O uso de ALF como matéria-prima alternativa na produção de argamassas promove a economia circular e reduz a extração de recursos naturais. Em Portugal, que produz mais de 1 milhão de toneladas de argamassas pré-doseadas por ano, a incorporação de ALF pode ter um grande impacto ambiental.

O objetivo deste estudo é verificar a influência da substituição parcial e total de agregados naturais por ALF, analisando o desempenho das argamassas em termos mecânicos e físicos, como resistência à compressão e tração, índice de consistência e absorção de água por capilaridade, comparando argamassas com e sem ALF.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo como objetivo aprofundar as noções sobre a areia do leito fluidizado (ALF) e a sua potencial utilização na produção de argamassas cimentícias, substituindo parcial e/ou integralmente os agregados naturais, foram realizados ensaios de caracterização do material e a produção de quatro argamassas com diferentes materiais constituintes (Tabela 1), com finalidade de avaliar a influência da incorporação da ALF nos estados frescos e endurecidos dessas misturas, a saber:

- Argamassa de Referência (REF) – argamassa de cimento produzida com agregados naturais (0/2 + 0/4),
- Argmassa ALFp – argamassa de cimento com substituição parcial dos agregados naturais por areias do leito fluidizado (0/2 + ALF);
- Argmassa ALFm – argamassa de cimento com substituição parcial dos agregados naturais por areias do leito fluidizado com granulometria modificada (0/2 + ALFm);
- Argmassa ALF – argamassa de cimento com substituição total dos agregados naturais por areias do leito fluidizado.

Tabela 1 - Relação das argamassas produzidas

Designação	0/2	0/4	ALF	ALFm
REF	✓	✓	-	-
ALFp	✓	-	✓	-
ALFm	✓	-		✓
ALF	-	-	✓	-

Na produção das argamassas, foram utilizados: cimento Portland de calcário (CEM II/B-L 32,5 N), areia fina natural (0/2) da Herdade da Mesquita, em Sesimbra, e areia grossa natural (0/4) do Pinhal Conde Cunha 4, no Seixal, ambas em Portugal. As Areias do Leito Fluidizado (ALF) utilizadas são resíduos não perigosos, compostos principalmente por partículas de quartzo, com granulometria que varia de micrômetros a milímetros, muitas vezes revestidas por material vítreo, subprodutos da combustão e cinzas (Pereira, 2022). Utilizaram-se ALF tal como fornecida e uma versão modificada (ALFm), ajustada à granulometria da areia natural 0/4.

O estudo foi realizado em cinco etapas: (I) caracterização dos agregados 0/2, 0/4, ALF e ALFm; (II) dosagem e produção de argamassas de referência (REF) com agregados naturais (0/4 + 0/2), misturas com ALF e ALFm (ALF + 0/2 e ALFm + 0/2), e argamassas 100% ALF; (III) caracterização das argamassas no estado fresco; (IV) moldagem, desmoldagem e cura dos provetes; (V) caracterização das argamassas no estado endurecido aos 28 e 355 dias. Todas as misturas seguiram um

traço 1:3 (cimento:miúdo em volume) e relação água/ligante de 0,6 em massa.

Inicialmente, foram realizados ensaios de granulometria, massa volúmica e baridade dos agregados, conforme as normas NP EN 933-1:2014, NP EN 1097-6:2002 e NP EN 1097-3:2002. Para as argamassas REF, ALFp e ALFm, a proporção de areia fina para grossa foi de 1:2, visando reduzir o volume de vazios.

As argamassas foram produzidas adaptando os procedimentos das normas NP EN 998-1:2018 e EN 1015-2/A1. Os componentes sólidos foram misturados manualmente antes da adição de água na misturadora mecânica. Foram preparadas duas amostras de cada tipo de argamassa. Após a mistura, as argamassas foram analisadas quanto à consistência e massa volúmica aparente, seguindo as normas EN 1015-3/A1/A2 e EN 1015-6:1998. Nove provetes prismáticos (40x40x160 mm) foram compactados e armazenados sob filme de polietileno, sendo desmoldados após 2 dias e mantidos até os 28 dias.

A caracterização no estado endurecido foi realizada aos 28 dias, em 3 ou 6 provetes de cada tipo. Os ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração por flexão seguiram a EN 1015-11, enquanto o teste de porosidade aberta mediu a quantidade de vazios interconectados, indicando a porosidade das argamassas.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Caracterização dos agregados

Segundo o fornecedor, o agregado natural 0/2 é composto por quartzo, feldspato e quartzito (com partículas subangulosas a subarredondadas), enquanto o agregado natural 0/4 também contém moscovite, além desses três componentes.

Para a produção da argamassa de referência (REF), as areias 0/2 e 0/4 foram utilizadas na proporção de 1:2 (areia fina: areia grossa) para reduzir o volume de vazios entre as partículas do agregado. Essa mesma proporção foi mantida ao substituir o agregado natural por ALF.

3.1.1 Massa volúmica específica

A Tabela 2 mostra as massas volúmicas específicas de cada tipo de areia – natural e do leito fluidizado. Os resultados, obtidos conforme a norma NP EN 1097-6:2002, classificam todas as areias como agregados de densidade normal.

Tabela 2 - Massa volúmica específica dos agregados caracterizados

	0/2	0/4	ALF	ALFm
Massa Vol. Esp. [kg/m ³]	2564,1	2705,4	2500,0	2439,0

3.1.2 Baridade e Volume de vazios

A Tabela 3 apresenta as baridades das quatro areias analisadas, que variam entre 1200 e 1700 kg/m³, faixa que caracteriza as areias comumente usadas em construções (Martins, 2008 apud Pinto et al., 2006). A tabela também mostra o volume de vazios entre as partículas de cada agregado. Esses resultados foram obtidos conforme o procedimento descrito na NP EN 1097-3:2002.

Tabela 3 - Baridade e volume de vazios dos agregados caracterizados (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)

	0/2	0/4	ALF	ALFm
Baridade [kg/m ³]	1516,76	1574,30	1447,3	1467,10
DP [kg/m ³]	1,21	4,07	18,98	1,65
Vol.Vazios [%]	40,8	41,8	42,1	39,8
DP [%]	0,04	0,12	0,62	0,06

3.1.3 Granulometria

A análise granulométrica seguiu o procedimento estabelecido pela NP EN 933-1:2014. A curva granulométrica (Figura 1) mostra que a ALF é semelhante à areia natural 0/4, o que justifica o estudo da substituição parcial do agregado natural, utilizando 100% de ALF em substituição à areia grossa 0/4, mantendo a areia fina 0/2. A modificação da granulometria da ALF visou aproximá-la da areia natural grossa 0/4.

Os módulos de finura dos quatro agregados são 2,00, 3,25, 3,02 e 3,05 para os agregados 0/2, 0/4, ALF e ALFm, respectivamente.

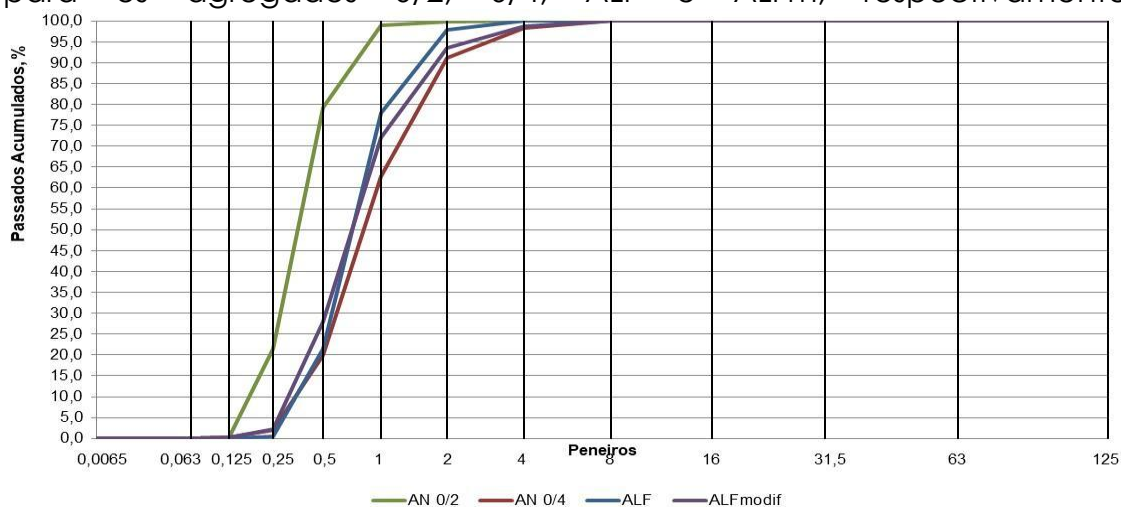


Figura 1 - Curvas granulométricas dos agregados caracterizados

3.2 Caracterização da mistura de agregados

3.2.1 Massa volúmica específica

A tabela 4 apresenta a massa volúmica específica da mistura de agregados na proporção 1:2 (areia fina: areia grossa).

Tabela 4 - Massa volúmica específica da mistura de agregados

	0/2+0/4	0/2 + ALF	0/2 + ALFm
Massa Vol. Esp. [kg/m ³]	2500,0	2500,0	2500,0

3.2.2 Baridade e volume de vazios

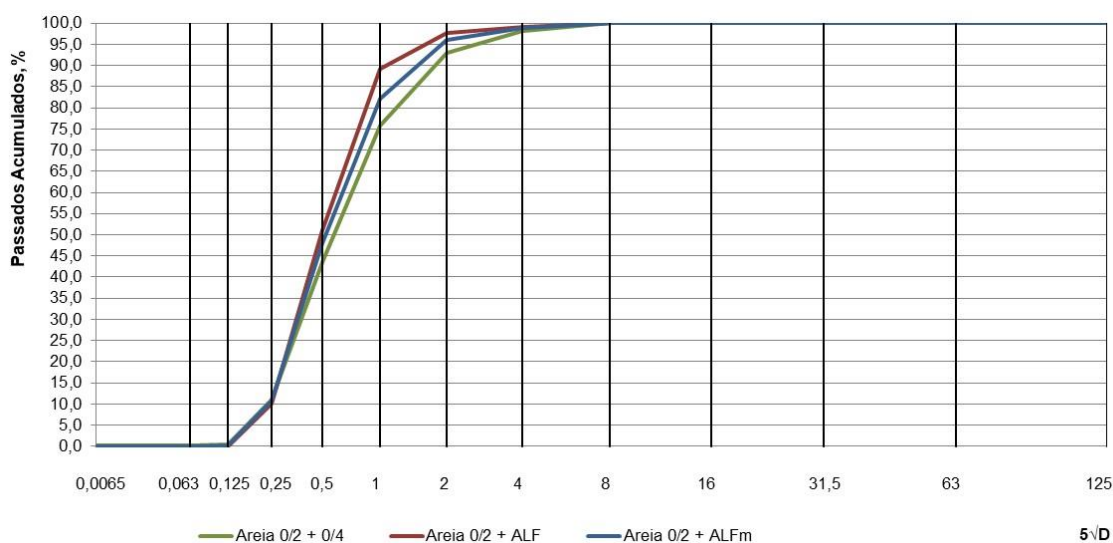
A tabela 5 apresenta as baridades obtidas para as misturas de areias, assim como o volume de vazios do conjunto de agregados.

Tabela 5 - Baridade e volume de vazios da mistura de agregados (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)

	0/2 + 0/4	0/2 + ALF	0/2 + ALFm
Baridade [kg/m ³]	1591,53	1490,19	1531,44
DP [kg/m ³]	5,01	4,68	2,29
Vol.Vazios [%]	36,3	40,4	38,7
DP [%]	0,16	0,15	0,07

3.2.3 Granulometria da mistura de agregados

Após a preparação das misturas dos agregados pode ser observado que todos apresentam uma curva granulométrica semelhante (Figura 2). Os módulos de finura são 2,78, 2,53, e 2,64 para as misturas (0/2 + 0/4), (0/2 + ALF) e (0/2 + ALFm).



5/D

Figura 2 - Curvas granulométricas das misturas dos agregados.

3.3 Composição e produção de argamassas

Conforme referido, foram preparados 4 tipos de argamassa: argamassa de referência (0/2 + 0/4); argamassa com substituição do 0/4 por ALF nas condições de fornecimento; argamassa com substituição do 0/4 por ALF modificada e argamassa com substituição total do agregado natural por ALF nas condições de fornecimento. Na tabela 6 apresentam-se as composições das argamassas usadas como base para o estudo experimental.

Tabela 6 - Composição das argamassas por Kg /m³ de argamassa.

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Cimento	399,52	415,29	408,71	416,72
AN 0/2	529,87	515,72	521,59	-
AN 0/4	1059,75	-	-	-
ALF	-	1031,43	-	1507,87
ALFm	-	-	1043,18	-
Água	239,71	249,17	245,22	250,03

3.4 Caracterização das argamassas no estado fresco

Em relação à consistência, a substituição parcial ou total do agregado natural por areia do leito fluidizado (ALF) resulta em um aumento da consistência da argamassa, medido pelo diâmetro de espalhamento (Tabela 7) [EN1015-2/A1: 1998/2006], [EN 1015-3/A1/A2:1999/2004/2006]. O aumento de consistência na argamassa ALFm (0/2 + ALFm) é menos significativo, cerca de 9,24%. Nas argamassas ALFp e ALF, o aumento é mais expressivo, com 17,58% e 21,36%, respectivamente.

Conforme Silva (2006) e Knights (1998), citados por Neno (2010), a trabalhabilidade da argamassa com agregados reciclados pode ser semelhante à das argamassas com agregados naturais, desde que os agregados sejam previamente saturados. No entanto, em geral, a trabalhabilidade diminui com níveis elevados de substituição de agregados primários por reciclados. Avaliada pelo valor de espalhamento, as argamassas com ALF apresentam leve redução na trabalhabilidade, dificultando um pouco o manuseio.

Tabela 7 - Consistência por Espalhamento (mm) das Argamassas (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Espalhamento [mm]	155,08	127,78	140,71	121,93
DP [mm]	1,68	1,21	5,85	2,77

Em relação a massa volúmica [EN 1015-6:1998], os resultados apresentam tendência semelhante (tabela 8). Comparando com a REF, a ALF apresenta uma massa volúmica ligeiramente superior (1,01%) e a ALFp (0/2 + ALF) ligeiramente inferior (1,12%). A ALFm foi a argamassa que apresentou resultado mais semelhante (aumento de 0,15%), como indicado na tabela 9.

Tabela 8 - Massa Volúmica Aparente [kg/m³] das Argamassas no Estado fresco (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão)

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Massa Vol. Aparente [kg/m ³]	2059,75	2036,58	2062,89	2080,50
DP [kg/m ³]	19,0	1,3	14,4	26,6

A diferença entre as massas volúmicas obtidas nos 4 tipos de argamassa é de, no máximo, 2,11%, podendo-se considerar que as massas volúmicas no estado fresco são equivalentes.

3.5 Caracterização das argamassas no estado endurecido

3.5.1 Massa volúmica específica e massa volúmica aparente

A tabela 9 apresenta as massas volúmicas específicas e aparente dos 4 tipos de argamassas. O procedimento de determinação foi efetuado com base na técnica das pesagens hidrostáticas, garantindo o total preenchimento dos poros internos das argamassas com água recorrendo, para tal, ao vácuo e restituição da pressão atmosférica.

Tabela 9 - Massas Volúmicas [kg/m³] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão).

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Massa Vol. Aparente [kg/m ³]	1985,49	1935,24	1943,56	1947,50
DP [kg/m ³]	17,46	7,20	8,72	30,11
Massa Vol. Específica [kg/m ³]	2592,18	2583,81	2594,89	2588,79
DP [kg/m ³]	3,73	1,09	1,30	2,97

3.5.2 Porosidade Aberta

A substituição do agregado natural 0/4 por ALF ou ALFm não apresenta impactos significativos na Porosidade Aberta. O mesmo ocorre com a Massa Volúmica Aparente, onde o uso de ALFm resulta em um aumento de apenas 0,43%. A substituição total do agregado natural por ALF nas

condições de fornecimento também não difere das substituições parciais (Tabela 10).

As argamassas ALFp (0/2 + ALF) e ALFm exibem porosidade semelhante, sendo que a porcentagem de poros interconectados é maior nas argamassas com incorporação de resíduos. Além disso, quanto maior o volume de vazios, menor o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, enquanto a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas aumenta (Farinha, 2015).

Tabela 10 - Porosidade aberta [%] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão).

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Porosidade Aberta [%]	23,41	25,10	25,10	24,77
DP [%]	0,57	0,26	0,34	1,16

Quanto mais elevada a Massa Volúmica Aparente mais baixa será a Porosidade, aqui concretizada com a Porosidade Aberta. Verifica-se que a substituição do agregado natural 0/4 por ALF traduz-se no aumento da porosidade aberta e na diminuição da Massa Volúmica Aparente, quando comparada com a argamassa de referência.

3.5.3 Resistência Mecânica

As resistências à tração por flexão e à compressão indicam a capacidade que as argamassas têm de resistir a alguns agentes que atuam externamente, como os choques ou as intempéries, variações volumétricas e assentamentos, sem apresentar danos ao longo do tempo (Neno, 2010). As argamassas utilizadas para revestimentos estão mais dependentes da resistência à tração por flexão do que à resistência à compressão. Diante disso, a baixa resistência à tração na flexão não permite a argamassa suportar os esforços de tensões, podendo assim ocorrer a incidência de patologias, como a fissuração e o destacamento do revestimento. (Santos, 2008).

3.5.3.1 Tração por flexão

Em um ensaio realizado por Silva (2006) citado por Neno (2010) verificou-se que a resistência à flexão cresce à medida que se substituiu a areia por resíduos de tijolo até cerca de 20% de substituição. Daí em diante, para substituições de quantidades superiores, a resistência decresce. Tal qual o presente estudo, a resistência à flexão com 100% ALF foi ainda maior que a argamassa REF, aos 28 dias de idade (tabela 11).

A razão para isso, segundo o autor, pode ser a superfície irregular dos grãos de agregado reciclado e/ou o maior vínculo entre a pasta de cimento e estes mesmos agregados. Por outro lado, é possível que existam ainda outras ligações químicas (além da pozolanicidade) e

físicas (absorção, forma, rugosidade, entre outras) entre os materiais a contribuir para este melhoramento das resistências.

Verifica-se que a substituição de agregado natural 0/4 por ALF conduz a uma diminuição da tensão de rotura à tração por flexão quando comparado com a argamassa de referência. Dado que as massas volúmicas aparentes das argamassas produzidas com substituição parcial de agregado natural se vêm diminuídas, as resistências mecânicas acompanham a mesma tendência, à exceção para a argamassa ALF. Ainda assim, importa realçar que as diferenças obtidas nas tensões de rotura à tração por flexão são da ordem dos 3,70% (0/2+ALF e 0/2+ ALFm) e dos 0,93% (0/2+ALFm e ALF).

Tabela 11: Resistência à tração por flexão [MPa] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 6 ensaios – valor médio e desvio-padrão).

	REF (0/2 + 0/4)	ALFp (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Resistência à Tração por Flexão [MPa]	5,53	5,47	5,10	5,74
DP [MPa]	0,24	0,34	0,34	1,00

3.5.3.2 Compressão

Um trabalho experimental citado por Neno (2010) que é concordante com os resultados obtidos no presente estudo é o de Topçu (2010), onde é verificado que a resistência à compressão decresce com o aumento de percentagem de substituição de RCD (Resíduos da Construção e Demolição). O autor justifica este fato com o aumento da porosidade da argamassa, causada pela inserção de resíduos e ainda explica que a presença do ar no material contribui para a redução da resistência à compressão. Por exemplo, 5% de teor de ar pode baixar a resistência até 30% e mesmo 2% de teor de ar pode resultar numa perda de resistência superior a 10%.

Verificou-se que a substituição de agregado natural por ALF conduz a uma diminuição da tensão de rotura à compressão quando comparada com a argamassa de referência (tabela 12). Dado que as massas volúmicas aparentes das argamassas produzidas com substituição, parcial e total, de agregado natural se vêm diminuídas, mais uma vez, as resistências mecânicas acompanham a mesma tendência.

Realça-se, mais uma vez que as diferenças obtidas nas tensões de rotura à compressão são da ordem dos 2,13% (0/2+ALFm e ALFp) e não se regista diferença neste parâmetro nas argamassas 0/2+ALF e 0/2+ALFm. Nestas argamassas (0/2+ALF e 0/2+ ALFm) o aumento da massa volúmica aparente é da ordem dos 0,43%.

Tabela 12 - Resistência à compressão [MPa] das Argamassas no Estado Endurecido (média de 3 ensaios – valor médio e desvio-padrão).

	REF (0/2 + 0/4)	ALF (0/2 + ALF)	ALFm (0/2 + ALFm)	ALF
Resist. à Compressão [MPa]	26,56	23,44	23,26	24,84
DP [MPa]	0,89	0,48	0,74	5,22

4 DISCUSSÃO

A areia do leito fluidizado (ALF) apresenta baridade inferior à da areia natural, com curva granulométrica semelhante à areia 0/4. A modificação da ALF ajustou sua curva granulométrica à do agregado natural 0/4 para viabilizar sua substituição. As massas volúmicas de ALF e ALFm estão mais próximas da areia 0/2, com volume de vazios similar, variando apenas 2,3%.

Nas misturas de agregados, a curva granulométrica é quase idêntica, com variação de vazios de 4,1%. No estado fresco, as argamassas com ALF apresentam menor trabalhabilidade, especialmente a ALF pura. A massa volúmica aparente nesse estado é praticamente igual, com diferenças de até 1% em relação à argamassa de referência.

No estado endurecido, a substituição por ALF reduz a massa volúmica aparente, aumentando a porosidade aberta em até 7%, e a redução da massa volúmica é de no máximo 2,5%. Em termos de desempenho mecânico, a resistência à tração por flexão aumenta na argamassa ALF em comparação com a referência, mas diminui na ALFm. A resistência à compressão também diminui, especialmente na ALFm, com reduções de 7,7% e 12,4% na tração e compressão, respectivamente.

5 CONCLUSÃO

A análise dos resultados indica que a utilização de ALF na produção de argamassas de cimento é viável, já que os resultados são adequados para diferentes aplicações. A substituição do agregado natural por ALF resulta em: aumento da consistência (redução do diâmetro de espalhamento), redução das massas volúmicas aparentes, diminuição das resistências mecânicas (tração por flexão e compressão), aumento da porosidade aberta e maior absorção de água por capilaridade.

O comparativo entre as argamassas (0/2 + ALF) e ALF não revela diferenças significativas de desempenho, sugerindo que a substituição total por ALF é viável. No entanto, há incertezas em relação à argamassa (0/2 + ALFm), cujo desempenho deveria se aproximar mais da argamassa de referência.

É necessário, contudo, estudar outros parâmetros que confirmem as conclusões deste estudo exploratório. Futuros estudos devem incluir

análise química das ALF por fluorescência de raio-X, desempenho das argamassas com ALF após lavagem e avaliação de propriedades adicionais, como expansibilidade, aderência, índice de secagem, além da caracterização química das ALF (CO₂, SO₃, cloretos, entre outros).

6 AGRADECIMENTOS

O presente artigo resulta do trabalho científico, com componente laboratorial, realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, desenvolvido pelas autoras ao abrigo do programa de intercâmbio PROPICIE, do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Brasil, e do Projeto de Investigação Exploratória – ARSus - Argamassas de Revestimento Sustentáveis – financiado pelo Instituto Politécnico de Setúbal. Associado ao projeto ARSus encontra-se o grupo *The Navigator Company*, indústria de pasta de papel.

7 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Afonso et al. - **Recycling paper industry UEffluent sludge for use in mortars: Asustainability perspective**. Brasil, 2018.

EN 1015-2/A1:1998/2006 - **Methods of test for mortar for masonry -Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars**.

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)**.

EN 1015-6:1998 - **Methods of test for mortar for masonry -Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar**.

EN 1015-11: 1999 - **Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**.

EN 14146: 2004 - **Natural stone test methods -Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency)**.

FARINHA, Catarina. - **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de loiça sanitária**. Tese de doutoramento. Lisboa, 2015.

GEISSDOERFER, Martin et al. - **The Circular Economy. A new sustainability paradigm?** UK, 2016.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 933-1: 2014 - **Ensaio das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração**.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 998-1: 2018 - **Especificações de argamassas para alvenarias. Parte 1. Argamassas para rebocos interiores e exteriores**.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 1097-3: 2002 - **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.**

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. NP EN 1097-6: 2002 - **Propriedades Mecânicas e Físicas Agregados. Determinação da massa volúmica e da absorção de água.**

JACOSKI, Claudio Alcides; COSTELLA, Marcelo F.; RIGON, Mateus – **Estudo Patentométrico de argamassas no Brasil.** UNOChapecó, 2014.

MARQUES, Ana. - **Utilização energética da biomassa em Portugal.** Lisboa, 2015.

MARTINS, André - Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco. Portugal, 2008.

NENO, Catarina – **Desempenho de Argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão.** Lisboa, 2010.

PEREIRA, Cristiana; DELOROSO, Júlia; BERTIOLI, Andrea - **Avaliação do desempenho de argamassas com areias do leito fluidizado de centrais de queima de biomassa.** Barreiro, Portugal. ESTB, 2022.

PEREIRA, Luiz; SANTOS, Pedro. - **Resíduos reciclados como componentes de argamassas.** Portugal, [s.d.].

SANTOS, Maria Luíza. - **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Natal, 2008.

SILVA, Luis [et al] - **Utilização e Valorização de resíduos de Areias do Leito Fluidizado e de Lamas de Corte de Pedra em Argamassas. Exemplos de Aplicação.** Aveiro, Universidade de Aveiro, [s.d.].