

Estudo da influência do resíduo de cerâmica vermelha, como substituinte parcial ao aglomerante ou ao agregado, em argamassas mistas para revestimento

Study of the influence of red ceramic residue, as a partial substitute for the binder or aggregate, in mixed mortars for coating

Estudio de la influencia del residuo cerámico rojo, como sustituto parcial del ligante o árido, en morteros mixtos para revestimiento

Recebido: 24/11/2020 | Revisado: 02/12/2020 | Aceito: 04/12/2020 | Publicado: 06/12/2020

Francieli Priebbernow Pinz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2558-8683>

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

E-mail: franciellipinz@gmail.com

Charlei Marcelo Paliga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-4764>

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

E-mail: charleipaliga@gmail.com

Ariela da Silva Torres

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4686-9759>

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

E-mail: arielatorres@gmail.com

Resumo

Com o objetivo de promover uma rede global de desenvolvimento econômico sustentável para países em desenvolvimento, diversos países elaboraram um documento com diretrizes diretas para um desenvolvimento industrial mais sustentável durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1992, com destaque a redução de resíduos e a reutilização de subprodutos. Sendo as indústrias produtoras de materiais cerâmicos um ramo importante da cadeia produtiva da construção civil, a mesma também destaca-se por se uma grande geradora de resíduos, os chamados resíduos de cerâmica vermelha (RCV). Buscando-se uma destinação mais sustentável desses subprodutos, este trabalho teve como objetivo avaliar algumas possibilidades de utilização do RCV, proveniente da fabricação de tijolos de vedação, como substituinte ao agregado miúdo ou ao

aglomerante, em argamassas mistas de traços 1:2:8 e 1:2:9. A aplicação foi avaliada quanto ao desempenho mecânico e físico das argamassas, com teores de 5% e 10% de substituição do cimento pelo RCV, e 10%, 15% e 20% de substituição do agregado. Os desempenhos das argamassas 1:2:8 se mostraram superiores aos traços 1:2:9 tanto mecanicamente quanto em relação à absorção por capilaridade. Fato diferente ocorreu quanto testada a absorção por imersão e índice de vazios, onde os dois traços tiveram comportamentos semelhantes. As substituições no agregado afetaram mais as argamassas mecanicamente em comparação com a substituição no aglomerante, dada a maior porosidade do RCV. Já as substituições no aglomerante fizeram com que as argamassas apresentassem desempenhos mais próximos dos traços referência.

Palavras-chave: Argamassas mistas; Sustentabilidade; Tecnologia da arquitetura; Resíduo de cerâmica vermelha.

Abstract

In order to promote a global network of sustainable economic development for developing countries, several countries produced a document with direct guidelines for more sustainable industrial development during the United Nations Conference on Environment and Development in 1992, with emphasis on waste reduction and reuse of by-products. Since the industries that produce ceramic materials are an important branch of the civil construction production chain, it also stands out for being a major generator of waste, the so-called red ceramic residue (RCR). Seeking a more sustainable destination of these by-products, this work aimed to evaluate some possibilities of using the RCR, from the manufacture of sealing bricks, as a substitute for fine aggregate or agglomerate, in mixed mortars with 1: 2: 8 features and 1: 2: 9. The application was evaluated for the mechanical and physical performance of mortars, with contents of 5% and 10% of cement replacement by RCR, and 10%, 15% and 20% of aggregate replacement. The performances of 1: 2: 8 mortars were superior to the 1: 2: 9 traces, both mechanically and in relation to capillary absorption. A different fact occurred when the absorption by immersion and voids index were tested, where the two traits had similar behaviors. The substitutions in the aggregate affected the mortars more mechanically compared to the substitution in the binder, given the greater porosity of the RCR. The substitutions in the binder made the mortars present performances closer to the reference strokes.

Keywords: Mixed mortars; Sustainability; Technology of architecture; Red ceramic residue.

Resumen

Con el fin de promover una red global de desarrollo económico sostenible para los países en desarrollo, varios países prepararon un documento con directrices directas para un desarrollo industrial más sostenible durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo en 1992, con énfasis en reducción de residuos y reutilización de subproductos. Dado que las industrias que producen materiales cerámicos son una rama importante de la cadena productiva de la construcción civil, también destaca por ser un importante generador de residuos, los denominados residuos cerámicos rojos (RCR). Buscando un destino más sostenible de estos subproductos, este trabajo tuvo como objetivo evaluar algunas posibilidades de uso de RCR, desde la fabricación de ladrillos de sellado, como sustituto de agregado fino o aglomerado, en morteros mixtos con características 1: 2: 8. y 1: 2: 9. Se evaluó la aplicación para el comportamiento mecánico y físico de los morteros, con contenidos de 5% y 10% de reemplazo de cemento por RCR, y 10%, 15% y 20% de reemplazo de agregados. Los rendimientos de los morteros 1: 2: 8 fueron superiores a las trazas 1: 2: 9, tanto mecánicamente como en relación a la absorción capilar. Un hecho diferente ocurrió cuando se probaron la absorción por inmersión y el índice de vacíos, donde los dos rasgos tenían comportamientos similares. Las sustituciones en el agregado afectaron más mecánicamente a los morteros en comparación con la sustitución en el ligante, dada la mayor porosidad del RCV. Las sustituciones en el ligante hicieron que los morteros presentaran rendimientos más cercanos a los trazos de referencia.

Palabras clave: Morteros mixtos; Sostenibilidad; Tecnología de la arquitectura; Residuo cerámico rojo.

1. Introdução

A indústria da construção civil desempenha um papel econômico e social fundamental para o país. No entanto, ambientalmente, é constantemente tomada como uma grande vilã. Em todos os seus ciclos de produção, a construção civil é altamente nociva ao meio ambiente. Devido ao controle de produção ainda inconsistente nos canteiros de obra, elevados índices de desperdício e perdas destes materiais construtivos são encontrados, culminando na geração de um expressivo volume de resíduo, que acabam sobrecarregando os sistemas de descarte e gerando custos para os órgãos públicos gerenciadores (Caraseck, Girardi, Araújo, Angelim, & Cascudo, 2018).

Este contexto mostra que a construção civil é um setor industrial que se encontra na

constante necessidade de rever seus materiais e sua cadeia produtiva, a fim de buscar alternativas para a minimização dos danos ambientais. Para isto, o campo da pesquisa das tecnologias construtivas é um aliado fundamental no desenvolvimento de ações menos nocivas (Medeiros et al., 2016).

Dentre os diversos estudos já realizados (Morais, Souza, & Ribeiro, 2020; Oliveira, Oliveira, Petereson, Pelisser, & Antunes, 2019; Castro, Santos, Gonçalves, & Quaioni, 2017; Medeiros et al., 2016; Samandi et al., 2015; Schackow, Stringari, Senff, Correia, & Segadães, 2015; Qadir, 2015), que focaram na incorporação dos resíduos gerados pela construção civil, em concretos ou argamassas, têm apresentado excelentes resultados. Pode-se citar o resíduo da construção e demolição (RCD), resíduo de corte de granitos e mármore, gerados em função da extração e beneficiamento de rochas ornamentais, do resíduo de PVC, gerado na fabricação de tubulações, o resíduo de cerâmica vermelha, gerado na fabricação de blocos cerâmicos e telhas, o resíduo da indústria de pré-moldados, que são descartados pelos padrões de qualidade das empresas, entre diversos outros resíduos.

A indústria da cerâmica vermelha ou cerâmica estrutural, responsável por produzir blocos e tijolos, tem sua existência diretamente relacionada com a construção civil - corresponde a 4,8% dela - com um faturamento anual de cerca de R\$18 bilhões (Associação Nacional da Indústria Cerâmica [ANICER], 2014), sendo notoriamente importante para o país, apesar de carecer de dados mais atualizados. A extração da argila, matéria prima utilizada, e o processo de queima das peças são altamente nocivos. As falhas no processo produtivo das peças de cerâmica vermelha geram o RCV (resíduo da cerâmica vermelha), sendo que no Brasil, a geração deste varia de 5% a 20%, dependendo do nível de controle tecnológico da fábrica (Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial [ABDI], 2016). Cabe ressaltar que esta indústria, no Brasil, ainda possui, em sua maioria, características bastante artesanais e de pouca tecnologia em comparação com outros ramos do setor construtivo, e conseqüentemente, apresenta práticas de controle de qualidade pouco eficazes, grande geração de resíduos, e relativa despreocupação com a destinação destes.

Considerando a importância da reutilização de resíduos, a fim de retirá-los do meio ambiente, especialmente com a possibilidade de usá-los como matéria-prima para outros materiais, e considerando-se também as vastas possibilidades que a construção civil apresenta de incorporar resíduos próprios e de outras indústrias, percebe-se um nicho de possibilidades sobre a reutilização do RCV incorporado a outros materiais construtivos. Em alguns casos, o resíduo já é utilizado dentro da construção civil em aterros ou lastros para pavimentação, mas alguns estudos já apontam para a possibilidade de que, com algum controle e beneficiamento,

ele poderá também ser utilizado em concretos, argamassas ou mesmo na fabricação de cimento, como é o caso dos trabalhos de Araújo (2017); Qadir (2015); Medeiros et al. (2016); Castro et al. (2017); Santos, Castro e Gonçalves (2018) e Morais et al. (2020).

A cidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, possui um polo da indústria da cerâmica estrutural de grande importância para a economia local, que conta com 29 empresas associadas, de acordo com a Associação dos Ceramistas de Pelotas. As olarias pelotenses abastecem com blocos cerâmicos de vedação e estruturais, entre outras mercadorias, o mercado da construção civil da região sul do estado. Como toda indústria, no entanto, vem acompanhada da problemática da geração de resíduos, intensificada pela falta de destinação adequada.

O beneficiamento do RCV possibilita sua obtenção em granulometrias distintas, o que colabora para que sua aplicação possa ser feita em diferentes fins, tanto na granulometria de aglomerante quanto de agregado. Para a substituição no aglomerante, utilizando o pó de RCV, testes com substituições nos teores de 20% e 40% destacaram positivamente nos traços com RCV a melhora na trabalhabilidade e o elevado ganho de resistência aos 28 dias (Oliveira et al., 2019; Samandi et al., 2015; Schackow et al., 2015). Quanto à absorção nessas argamassas, observou-se que os teores intermediários, de 20%, apresentaram melhor desempenho quando comparados ao traço referência, enquanto que o traço 40% apresentou absorção elevada (Oliveira et al., 2019; Schackow et al., 2015). Alguns autores, no entanto, observam que teores de substituição no aglomerante podem causar queda no desempenho, especialmente em relação às propriedades mecânicas como compressão e tração na flexão, sugerindo teores de substituição mais baixos. Além disso, os teores de substituição elevados, por mais que correspondam ao esperado quanto à resistência à compressão, apresentam elevadas absorções, fazendo-se necessário o estudo de um traço que equilibre os fatores. O comportamento em argamassas com cal foi bastante semelhante, com destaque para maiores ganhos de resistência à compressão e à tração na flexão (Araújo, 2017).

Já para a granulometria de maior dimensão do resíduo, aplicada na substituição do agregado, teores de 5% e 10% em argamassas de cimento se mostraram ainda mais eficientes que os traços referências quanto à compressão, tração na flexão, absorção por capilaridade e permeabilidade ao vapor d'água (Jiménez, Ayuso, López, Fernández, & Brito, 2013). Já nos teores acima de 20% foram identificadas quedas significativas nos valores de resistência e aumento dos teores de absorção (Cabrera, Soberón, Sánchez, Rea, & Higuera, 2015). A comparação entre os resultados, no entanto, deve levar em consideração que os resíduos, por originarem de diferentes argilas, podem apresentar comportamentos distintos, motivo pelo

qual se torna fundamental o estudo das propriedades de cada resíduo utilizado.

Levando-se em consideração todos os aspectos apontados sobre a necessidade e a importância social e econômica de encontrar uma apropriada destinação e reutilização para os resíduos gerados, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do uso do RCV em argamassas mistas para revestimento. Para isto, estudou-se a incorporação do RCV gerado na cidade de Pelotas/RS em argamassas mistas de diferentes traços e com diferentes proporções, fazendo substituições parciais do agregado miúdo ou aglomerante.

2. Metodologia

Segundo Pereira, Shitsuka, Parreira e Shitsuka (2018), método é o caminho para se realizar alguma coisa, e quando se tem o caminho, torna-se mais fácil realizar viagens sabendo onde se está e aonde se quer chegar e como fazê-lo. Além disso, os métodos podem ser classificados como qualitativos e quantitativos. Nos métodos qualitativos, os dados coletados são preferencialmente descritivos, e a preocupação com o processo é predominante em relação ao produto. Já nos métodos quantitativos, usados neste trabalho, faz-se a coleta de dados numéricos por meio do uso de medições de grandezas e obtém-se, por meio da metrologia, números com suas respectivas unidades. Estes métodos geram conjuntos ou massas de dados que podem ser analisados por meio de técnicas matemáticas, como é o caso das estatísticas e probabilidades. Assim, este é o caminho que se deseja percorrer neste trabalho para a obtenção dos resultados, e para cumprir com os seus objetivos.

A cerâmica utilizada é proveniente do polo de olarias da cidade de Pelotas/RS. Todo material foi coletado de uma olaria que utiliza argila da jazida municipal, com intuito de caracterizar maior parte deste resíduo, visto que 90% das empresas da cidade utilizam mesma matéria prima. Quanto ao processo de queima, estipulou-se que o resíduo fosse coletado em uma olaria que trabalhasse com forno de temperatura de queima constante, pois favorece a completa reação química dos elementos da argila, colaborando com a pozolanicidade.

O resíduo coletado em natura na olaria apresentou uma considerável discrepância dimensional, e dada sua inaplicabilidade nas argamassas nesta forma, foi necessário um processo de beneficiamento, feito com britador de mandíbulas.

Sendo o RCV um material proveniente da argila, foi necessário considerar seu potencial para material com atividade pozolânica, uma vez que de acordo com NBR 12653/2014 (Materiais pozolânicos – Requisitos), os materiais argilosos podem ser classificados como materiais pozolânicos de classe N, uma vez verificados os requisitos

estipulados. Os ensaios realizados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaios para testar atividade pozolânica do RCV.

Parâmetros físicos	Resultado
Espectrometria de energia dispersiva de raio-x (EDX) analisada de acordo com os requisitos da NBR 12653/2014, que afirma que para ser considerado pozolânico, um material deve apresentar uma quantidade dos elementos SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ tal que a soma das porcentagens ultrapasse 70% de sua composição.	<ul style="list-style-type: none">• SiO₂ (48,22%), Al₂O₃ (24,04%) e Fe₂O₃ (13,15%), total de 85,81%, apresentando atividade pozolânica
Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal e com cimento, de acordo com as normas NBR 5751/2015 e NBR 5752/2014.	<ul style="list-style-type: none">• Quando em reação com o cimento, o RCV <i>possui</i> atividade pozolânica.• Quando em reação com a cal, o RCV <i>não apresenta</i> atividade pozolânica.

Fonte: Autores.

Além do RCV, foram utilizados também como componentes da argamassa a areia média quartzosa lavada, comercialmente disponível na região, cimento CPIV-32 e cal hidratada. A definição dos aglomerantes utilizados foi feita por serem os mais empregados em argamassas na região deste estudo. Além disso, o CPIV-32 possui uma grande quantidade de adições, e por isso, configura a pior situação de aplicação de resíduo.

A areia e o RCV passaram por ensaios de caracterização física, a fim de antecipar características do comportamento e averiguar a possibilidade da substituição. Os parâmetros aferidos estão apresentados na Tabela 2. A caracterização possibilitou destacar a alta absorvidade do RCV, indicada tanto pela absorção quanto pela massa unitária, demandando uma maior atenção a quantidade de água utilizada nos traços.

Tabela 2. Características físicas do RCV.

Parâmetros físicos	RCV	Areia
Massa específica (g/cm ³) NBR NM 52/2009	2,44	2,62
Massa unitária solta (g/cm ³) NBR NM 45/2006	0,31	1,62
Índice de volume de vazios (%) NBR NM 45/2006	85,6	33,97
Absorção (%) NBR NM 30/2001	10,26	0,66

Fonte: Autores.

Este programa experimental partiu do objetivo de testar os efeitos do resíduo tanto como substituinte ao aglomerante quanto do agregado, em argamassas de cimento e cal, nos traços 1:2:9 e 1:2:8 (cimento:cal:areia). A definição destes traços se deu pelo fato do traço 1:2:9 ser o último recomendado pela NBR 7200/1998 (Execução de revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas) para as argamassas mistas. Já o traço 1:2:8 é recomendado pelo fabricante de cal hidratada, e também em bibliografias de técnicas construtivas que tratam de argamassas de revestimento (Yagizi, 2013).

Para a substituição do aglomerante pelo resíduo, foram testados os teores de 5% e 10%. Estes valores foram definidos considerando conclusões prévias de autores (Silva, Brito, & Veiga, 2010) que afirmam que substituições de aglomerante pelo RCV são viáveis apenas em teores até 20%, e que substituições maiores resultam em decréscimos significativos de resistência nas argamassas, enquanto que o teor de 10% poderia resultar na melhora do desempenho (Araújo, 2017). Já na substituição do agregado pelo resíduo considerou-se que a substituição de 20% pode levar a uma melhora de desempenho (Cardoso et al., 2015), mas que teores maiores que este podem afetar negativamente a argamassa. Por este motivo, optou-se por trabalhar com um percentual máximo de 20%, além dos intervalos de 10% e 15%. A Tabela 3 apresenta todos os traços realizados.

Tabela 3. Traços executados.

Tipologia de substituição	Argamassas mistas	
	1:2:8	1:2:9
Referência	REF 1:2:8	REF 1:2:9
5% no cimento	C5 1:2:8	C5 1:2:9
10% no cimento	C10 1:2:8	C10 1:2:9
10% na areia	A10 1:2:8	A10 1:2:9
15% na areia	A15 1:2:8	A15 1:2:9
20% na areia	A20 1:2:8	A20 1:2:9

Fonte: Autores.

A substituição no aglomerante foi feita sobre a massa do cimento (Figura 1a). A substituição no agregado miúdo também foi feita em massa, e considerou uma substituição igualitária do teor definido nas quatro frações de areia. Tanto o resíduo como a areia foram utilizados em estado seco no momento da moldagem. Para a relação água/aglomerante dos traços considerou-se que, dado o elevado índice de absorção do RCV, o uso do mesmo fator água/aglomerante em traços com diferentes quantidades de resíduo, poderia levar a argamassas com índices de consistência discrepantes. Sendo assim, definiu-se por delimitar um índice de consistência para as argamassas entre 245 mm e 260 mm (Figura 1b), variando o consumo de água de acordo com o necessário para atender este parâmetro.

Figura 1. (a) Materiais separados para a mistura; (b) ensaio índice de consistência.



(a)



(b)

Fonte: Autores.

A Tabela 4 indica os parâmetros que foram avaliados neste estudo, além da idade que cada ensaio foi realizado e o número de corpos de prova testados (cps).

Tabela 4. Parâmetros avaliados.

Parâmetro avaliado	Idade cps no ensaio (dias)	Número de cps
Resistência à compressão axial (NBR 7215/ 1996)	7, 28 e 63	4 por idade
Resistência à tração na flexão axial (NBR 13279/2005)	28	3
Absorção por imersão e índice de vazios (NBR 9778/2009)	28	5
Absorção por capilaridade (NBR 9779/2013)	28	5

Fonte: Autores.

A análise estatística, aplicada nos resultados, foi a análise de variância (ANOVA), que

objetiva identificar a diferença significativa entre as médias dos resultados, e se os fatores analisados influenciam de alguma forma nas variáveis dependentes. Além do teste ANOVA, foi realizado também um Teste F (distribuição de Fischer), para que fosse avaliada a significância estatística da variação de média entre os grupos, sendo considerada a hipótese de nulidade para a análise de que as médias são todas iguais. A análise de variância foi completada pela comparação múltipla de médias através do teste de Tukey, que tem como objetivo identificar quais os pares de média são diferentes entre si. Além das variáveis dependentes e independentes, a execução da análise estatística utiliza-se de outros parâmetros, como o de probabilidade (p-valor) e o nível de significância (α). O p-valor inferior a 0,05, atribuído de acordo com a distribuição t de Student, define que as relações entre as variáveis definidas possuem uma significância estatística em um nível de confiança de 95%. Já para o nível de significância “ α ” foi atribuído um valor de 5%, o que significa que os resultados obtidos apresentam um nível de confiança de 95%.

3. Resultados e Discussão

Os resultados estão apresentados divididos em desempenho mecânico (resistência à compressão axial e tração na flexão) e desempenho físico (absorção por capilaridade, absorção por imersão e índice de vazios).

3.1 Desempenho mecânico

As argamassas mistas com cal passaram por ensaios de compressão axial aos 7, 28 e 63 dias, estando os resultados na Tabela 5 e Figura 2. Na família do traço 1:2:8, o traço referência apresentou os melhores resultados aos 28 e aos 63 dias. Tanto nas substituições no cimento quanto nas substituições ao agregado, não foi possível identificar tendência de comportamento entre os teores de substituição e a resistência à compressão. Já nos traços com substituição no agregado, destaca-se o comportamento do traço A10, que apresentou uma elevada resistência inicial, aos 7 dias, superior ao traço referência. No entanto, o valor de resistência aos 7 dias foi praticamente o mesmo aos 28 dias, indicando a possibilidade do traço ter passado por um processo de hidratação inicial acelerado. Além disso, houve pouca alteração no valor de resistência também no traço A20 aos 63 dias, embora este comportamento nesta idade seja mais comum.

Já no grupo de argamassas 1:2:9, diversos traços apresentaram perda real de

resistência aos 63 dias, como é o caso dos traços A15 e A20. Além destes, o traço A10 se manteve estável, sem apresentar ganho nem perda de resistência mecânica. Ademais, o traço com substituição no aglomerante C10, aos 63 dias, também obteve queda de resistência. Observando-se que neste grupo os traços com substituição no agregado foram mais afetados mecanicamente pela presença do RCV, embora aos 28 dias não tenham sido identificadas diferenças significativas.

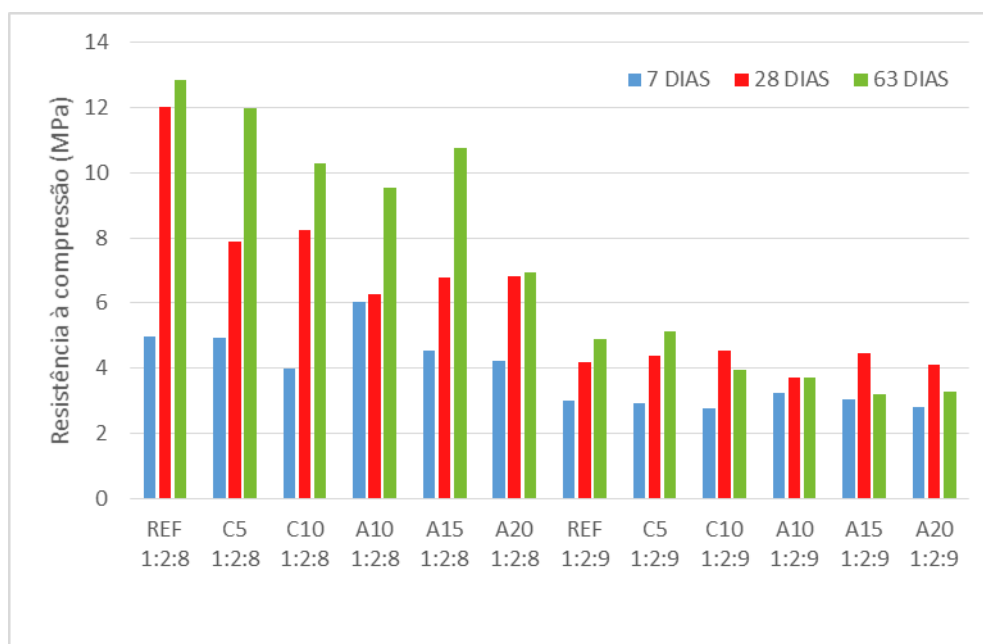
De maneira geral, estes resultados indicam que a substituição ao agregado, em argamassas mistas com cal, pode apresentar queda no desempenho a longo prazo. Os impactos nos traços com substituição no cimento foram menores, com destaque para o traço C5 1:2:9, que superou a resistência à compressão do traço REF 1:2:9 tanto aos 28 quanto aos 63 dias.

Tabela 5. Médias das resistências à compressão.

Traços	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	63 dias (MPa)
REF 1:2:8	4,95	12,01	12,86
C5 1:2:8	4,93	7,87	11,97
C10 1:2:8	3,97	8,23	10,29
A10 1:2:8	6,04	6,28	9,52
A15 1:2:8	4,53	6,79	10,78
A20 1:2:8	4,22	6,84	6,95
REF 1:2:9	2,99	4,18	4,90
C5 1:2:9	2,92	4,39	5,14
C10 1:2:9	2,78	4,53	3,94
A10 1:2:9	3,25	3,71	3,69
A15 1:2:9	3,03	4,44	3,18
A20 1:2:9	2,80	4,09	3,26

Fonte: Autores.

Figura 2. Resultados de resistência à compressão das argamassas de mistas.



Fonte: Autores.

A Tabela 6 complementa os resultados apresentando os percentuais de ganhos de resistência apresentados por todos os traços de argamassas mistas. Cabe ressaltar aqui, que no grupo de argamassas mistas 1:2:8 nenhum dos traços apresentou perda de resistência aos 63 dias, sendo, portanto, a proporção com o comportamento mecânico mais assertivo. Para o grupo 1:2:9 foram vários os traços que apresentaram decréscimo de resistência e, mesmo aqueles que obtiveram ganho nesta propriedade, o fizeram em menores percentuais quando comparados com o grupo anterior. O fato do traço 1:2:9 ser mais pobre em aglomerantes em comparação com o traço 1:2:8 pode justificar esse efeito, além de acentuar as consequências da incorporação do resíduo, especialmente nas substituições pelo cimento.

Tabela 6. Ganhos de resistência dos traços de argamassa mista.

Traço	Ganho de resistência		Traço	Ganho de resistência	
	aos 28	aos 63 dias		aos 28	aos 63 dias
REF 1:2:8	142,98%	8,85%	REF 1:2:9	39,67%	2,97%
C5 1:2:8	64,06%	54,95%	C5 1:2:9	50,26%	17,01%
C10 1:2:8	107,75%	26,16%	C10 1:2:9	63,30%	-26,31%
A10 1:2:8	4,86%	53,30%	A10 1:2:9	14,12%	-0,48%
A15 1:2:8	53,09%	59,04%	A15 1:2:9	46,64%	-28,44%
A20 1:2:8	64,92%	2,28%	A20 1:2:9	45,91%	-20,24%

Fonte: Autores.

Os traços com substituição do aglomerante, tanto no grupo de argamassas 1:2:8 quanto no grupo 1:2:9, apresentaram os maiores ganhos de resistência aos 28 dias, respectivamente, podendo-se relacionar o aumento do teor de substituição com o ganho de resistência. Embora os valores de resistência à compressão tenham sido inferiores aos apresentados no trabalho de Araújo (2017), que trabalhou com traço mais rico, o ganho de resistência para a mesma substituição de 10% foi 20% superior neste trabalho comparando com o grupo 1:2:9, que obteve os menores valores. Estes resultados indicam um resultado bastante promissor do pó de RCV como substituinte ao cimento em argamassas mistas, mesmo o resíduo não tendo apresentado atividade pozolânica com a cal. Vale lembrar que a substituição é feita apenas na parcela de cimento das argamassas mistas. Os elevados ganhos de resistência aos 63 dias para os traços C5 1:2:8 e C10 1:2:8 corroboram para esta conclusão, embora o mesmo não tenha ocorrido no grupo 1:2:9, no traço C10, que obteve decréscimo de resistência.

Quanto às substituições no agregado, os traços A10 1:2:8 e A15 1:2:8 apresentaram altos ganhos de resistência para a idade, especialmente considerando a tipologia de substituição que utiliza granulometria de agregado. No caso do traço A15 1:2:8, o ganho de resistência possibilitou que ultrapasse o valor de resistência à compressão do traço A10 1:2:8, compensando o maior teor de substituição. Os resultados para este grupo são bastante promissores, apesar de não terem ocorrido também no traço A20 1:2:8, indicando que o teor de 15% no agregado possa ser um limite adequado para substituição. No entanto, é necessário relatar que autores (Srujhana, Menon, Basutkar, & Devi, 2018) obtiverem, para o teor de substituição de 20% pelo agregado – e mesmo teores de substituições maiores – resistência à compressão superiores ao traço referência. Vale ressaltar que as propriedades de cada RCV interferem diretamente no comportamento da argamassa, causando discrepâncias no comportamento quando comparando resultados de diferentes países (Srujhana et al., 2018) com peças cerâmicas de matéria prima e processo de fabricação distintos. Mesmo com os elevados ganhos de resistência destes dois traços de substituição no agregado do grupo 1:2:8, os mesmos obtiveram valores de resistência inferiores ao traço referência, sendo este fato também atribuído a porosidade do RCV no papel de agregado e menor massa unitária (Caraseck et al., 2018). Já nas argamassas 1:2:9, todas as argamassas com substituição no agregado obtiveram perda de resistência aos 63 dias, indicando que o RCV como agregado pode comprometer o desempenho mecânico das argamassas nestas proporções. É importante ressaltar, também, que a bibliografia que trata de argamassas mistas com RCV como agregado ainda é bastante limitada, o que limita as conclusões mais assertivas sobre o comportamento do material, e evidencia a importância deste trabalho.

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise estatística feita pela ANOVA de duas vias sem repetição. Os resultados mostraram que houve diferença significativa nos dois parâmetros testados (traços e idades). Ao realizar o teste de Tukey, a comparação das médias também demonstrou a diferença significativa entre os parâmetros avaliados. Vale ressaltar que entre os resultados, muitas comparações entre as idades de 28 para 63 dias não foram diferentes, podendo ser citados, principalmente, os traços com substituição no agregado, não havendo diferença entre as idades testadas.

Tabela 7. Resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial.

	G.L.	Soma Quadrada	Média Quadrada	F Calculado	p-valor	F crítico
Traços	65	866,028	13,32351	4,680667	3,9E-14	1,409605
Idades	2	484,1486	242,0743	85,04285	2,43E-24	3,065839
Erro	130	370,0447	2,846498			
Total	197	1720,221				

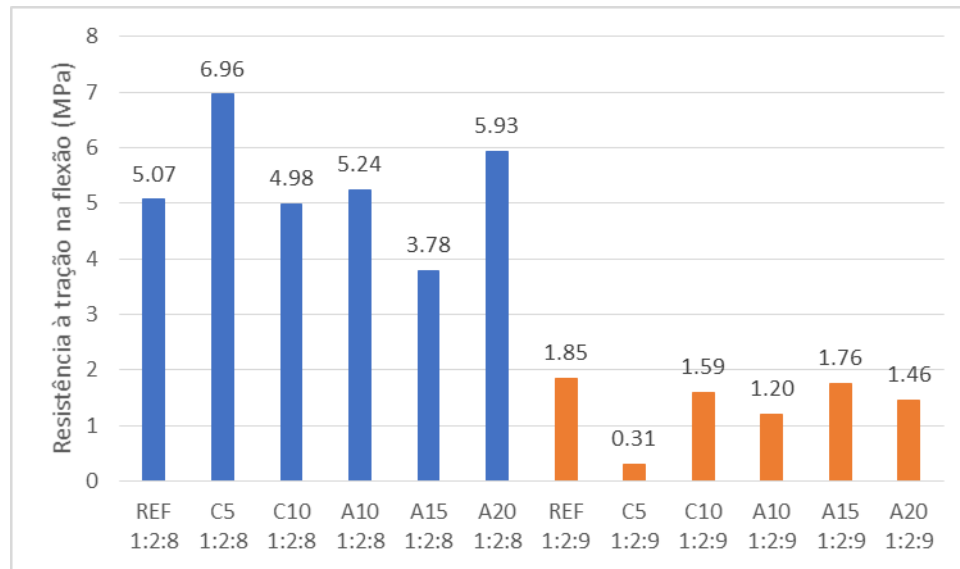
Fonte: Autores.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das argamassas mistas estão apresentados na Figura 3. A diferença entre os dois diferentes traços foi bem significativa, uma vez que os valores dos traços 1:2:9 corresponderam a menos que a metade dos valores das argamassas 1:2:8 para os traços correspondentes.

Observa-se, também, que em nenhum dos traços ocorreu relação no comportamento quanto à resistência à tração na flexão e os teores de substituição, em nenhuma das tipologias. Para as argamassas com substituição no aglomerante, é possível uma relação com o trabalho de Araújo (2017), onde se pode constatar que para as argamassas do grupo 1:2:9, os valores de resistência à tração na flexão encontrados foram similares. No entanto, a autora constatou um ganho de resistência na substituição de 10% do aglomerante em relação ao traço referência que não foi confirmado neste trabalho. A autora também não verificou padrão de comportamento entre os fatores de substituição testados e o valor de resistência. Mesmo nas argamassas do grupo 1:2:8, onde os valores de resistência foram superiores, esse comportamento não foi observado. Outra importante observação neste contexto é o comportamento do traço com 5% de substituição no aglomerante, onde o traço C5 1:2:8 obteve elevado ganho de resistência, ultrapassando o traço referência, enquanto que no traço C5 1:2:9 o comportamento foi de queda brusca na resistência, atingindo um valor discrepante dos demais do grupo. Estes resultados indicam outra grande diferença entre os dois traços,

embora possam indicar também problema de execução ou cura dos corpos de prova deste traço.

Figura 3. Resultados de resistência à tração na flexão das argamassas mistas (MPa).



Fonte: Autores.

Quanto aos traços com substituição da areia, destaca-se a inexistência de trabalhos que tratem das propriedades de tração na flexão de argamassas mistas com RCV como agregado. Novamente, é perceptível a diferença de comportamento nos diferentes traços, observando-se que, nas argamassas 1:2:8 o traço A15 apresentou o menor valor de resistência do grupo, enquanto que no grupo 1:2:9 o mesmo teor de substituição apresentou a maior resistência. O comportamento em comum identificado entre ambos os grupos foi apenas a não relação entre os valores de resistência e o teor de substituição, destacando-se, também, os valores de resistência promissores dos traços com teor máximo de 20% de substituição, especialmente no grupo 1:2:8.

Ao realizar-se a análise estatística das 12 famílias de traços, com variável de resposta a resistência à tração na flexão, chegou-se aos dados apresentados na Tabela 8. Através do método ANOVA de uma via, concluiu-se que houve diferença significativa entre os mesmos.

Tabela 8. Resultados da ANOVA.

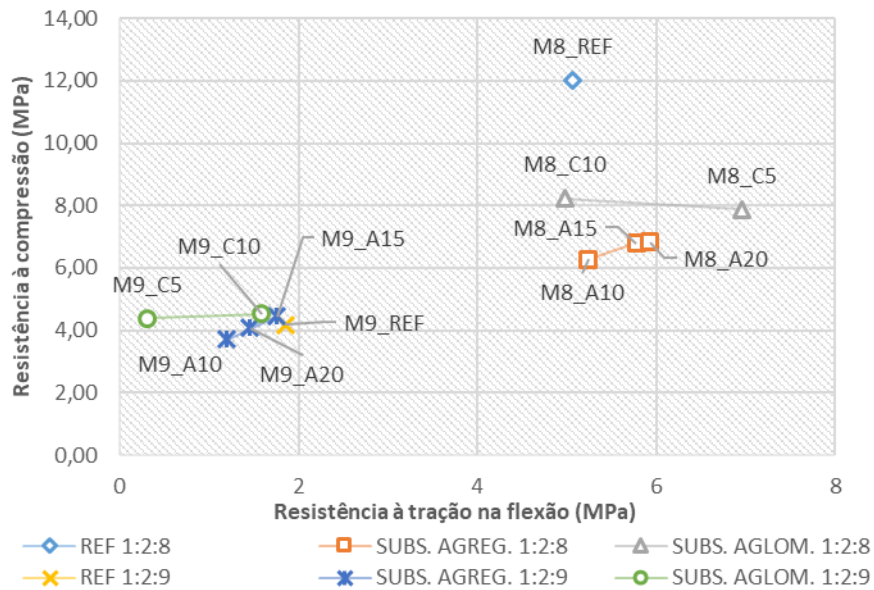
	G.L.	Soma Quadrada	Média Quadrada	F Calculado	p-valor
Fator	11	163,1736955	14,83397232	11,35664721	5,08526E-07
Resíduos	24	31,34863037	1,306192932		

Fonte: Autores.

Também foi realizado o teste de Tukey para a comparação dos traços e identificar quais apresentaram diferença significativa. Vale ressaltar que todas as combinações C5, C10, A5, A10 e A15 foram diferentes entre as famílias 1:2:8 e 1:2:9. Dentre as combinações que não apresentaram diferença ressalta-se entre os traços de agregados. A10, A15 e A20 para a família 1:2:8 não foram diferentes quando comparados entre eles, o mesmo ocorre para estes traços na família 1:2:9.

Na relação das propriedades mecânicas das argamassas mistas de cimento com cal hidratada, apresentada na Figura 4, observa-se a interferência do RCV no comportamento mecânico das argamassas em ambas as tipologias de substituição, especialmente no grupo de argamassas 1:2:8. Já no grupo das argamassas 1:2:9, as argamassas com RCV obtiveram uma performance mais próxima a do traço REF 1:2:9, com exceção do traço C5 1:2:9, que apresentou o maior distanciamento e, também, pior desempenho. Observa-se, também, que o desempenho mecânico das substituições no agregado se comportaram de maneira linear, e ligeiramente crescente, conforme o aumento do teor de substituição da argamassa no grupo 1:2:8 e, no grupo 1:2:9 – embora também ocorra um comportamento linear – não ocorre o mesmo fenômeno, uma vez que o traço A15 1:2:9 apresentou melhor desempenho mecânico em comparação com traço A20 1:2:9.

Figura 4. Relação entre as propriedades do desempenho mecânico das argamassas mistas aos 28 dias.



Fonte: Autores.

Ao se fazer a análise do gráfico apresentado na Figura 4, constata-se que a diferença entre as substituições no aglomerante em comparação com o traço referência ocorreu na resistência à compressão para as argamassas de traço 1:2:8, enquanto que para as argamassas 1:2:9 ocorreu apenas na resistência à tração na flexão. Tratando-se de compressão, os traços C5 e C10, ambos 1:2:8, apresentaram um aumento de resistência à compressão conforme o aumento de substituição, enquanto, o mesmo aumento foi identificado no grupo 1:2:9, no parâmetro de tração, indicando que o RCV pode colaborar com o desempenho mecânico das argamassas mistas, embora sua ação seja diferente em diferentes proporções de argamassa.

Relacionando os valores obtidos nos parâmetros mecânicos das argamassas mistas com as classificações da NBR 13281/2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos), é necessário destacar que o grupo 1:2:9 de argamassas apresentou valores críticos, tendo alguns casos, como os traços C5 e A10, não atingido o valor mínimo para a classificação quanto à resistência à tração na flexão, o que inviabiliza sua utilização como argamassa de assentamento e revestimento. Lembrando que no caso das argamassas de assentamento, as mesmas estão sujeitas também à corresponderem a resistência especificada em projeto.

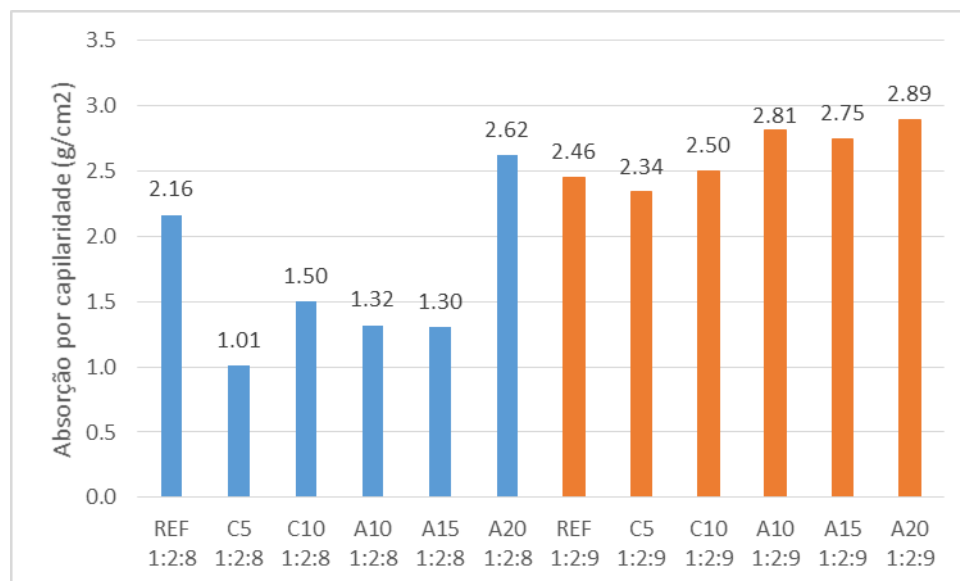
As argamassas de traço 1:2:8, no entanto, apresentaram valores bastante satisfatórios frente a estes indicados na norma, o que possibilita a conclusão de que o uso do traço 1:2:8 para argamassas mistas, em detrimento do traço 1:2:9, é mais indicado quanto ao desempenho

mecânico em qualquer situação de aplicação.

3.2 Desempenho físico

Os resultados das argamassas mistas quanto à absorção por capilaridade (Figura 5) foram bastante promissores para a família 1:2:8, tendo em vista que apenas um dos traços (A20) obteve um valor de absorção superior ao traço referência. Observando o comportamento das argamassas do grupo 1:2:9, nota-se que os traços com substituição do RCV no agregado apresentaram, de maneira geral, uma maior absorção em relação aos demais. O único traço que apresentou menor índice de absorção quando comparado ao traço referência foi o C5. Mais uma vez, este comportamento pode estar relacionado com o preenchimento dos poros pelas partículas do RCV, especialmente considerando a fina granulometria do resíduo utilizado neste traço.

Figura 5. Resultados de absorção por capilaridade das argamassas mistas.



Fonte: Autores.

Os valores de absorção foram superiores aos de Araújo (2017), no entanto, a autora realizou medições de ensaio apenas com 10 e 90 minutos. Porém, em seu trabalho, a absorção aumentou em todos os traços com resíduo, e proporcionalmente a quantidade. Como Araújo (2017) realizou a menor substituição no teor de 10%, este pode ser mais um indicio de quantidade de resíduo ideal para o desempenho à absorção. A autora relata também, que este comportamento é esperado em argamassas com RCV, dada a densidade do resíduo e a sua

estrutura porosa, mas que não necessariamente significa uma problemática nas argamassas, pois pode proporcionar permeabilidade ao vapor.

A análise estatística por ANOVA indicou diferença significativa entre as famílias de traços, com os resultados apresentados na Tabela 9. O Teste de Tukey também apresentou a diferença entre as médias. Porém, vale ressaltar que a substituição de 10% no aglomerante e no agregado não foi diferente, tanto para 1:2:8 quanto para 1:2:9. Outra comparação não diferente foi na substituição de 10 e 15% em agregados para ambas as famílias de traços, ou seja substituir 10 ou 15% de agregado por RCV, estatisticamente, não provoca alterações na absorção por capilaridade de argamassas. Também os dois traços referência não se apresentaram diferentes, mostrando que o volume de agregado não interferiu na absorção.

Tabela 9. Resultados da ANOVA.

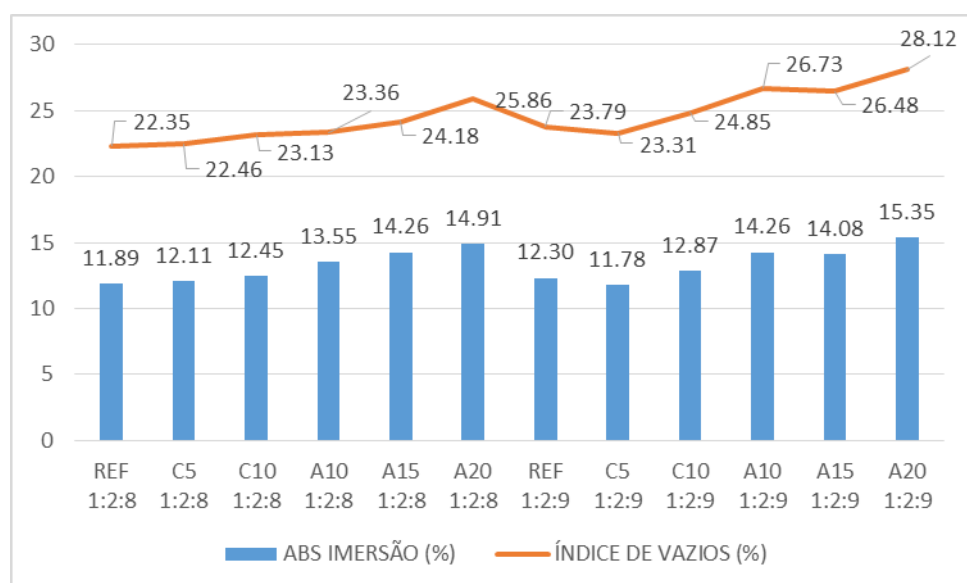
	G.L.	Soma Quadrada	Média Quadrada	F Calculado	p-valor
Fator	11	15,61714224	1,419740204	10,52592601	2,87629E-08
Resíduos	36	4,855691301	0,134880314		

Fonte: Autores.

Ao testar a absorção por imersão (Figura 6), no entanto, todos os traços com substituições no agregado absorveram uma porcentagem de água maior que o traço referência, além de que, observa-se aumento dessa porcentagem conforme o aumento do teor de substituição, da mesma forma que o índice de vazios segue o mesmo padrão.

A análise estatística identificou ocorrência de diferença significativa através do teste tipo ANOVA (Tabela 10). Os resultados reafirmam a hipótese, conforme também observado por Cabrera et al. (2015), de que o RVC como agregado miúdo, em argamassas mistas, implica em argamassas mais porosas, com influência do teor de substituição, portanto alterando a taxa de absorção por imersão. Pelo Teste de Tukey, os traços com substituição de agregados não foram considerados diferentes entre si, para ambas famílias de traços. Além disso, também não foi diferente entre as famílias de traços, sendo que A10 foi considerado igual para 1:2:8 e 1:2:9, ocorrendo mesmo para A15 e A20.

Figura 6. Resultados de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas mistas.



Fonte: Autores.

Tabela 10. Resultados da ANOVA – Absorção por imersão.

	G.L.	Soma Quadrada	Média Quadrada	F Calculado	p valor
Fator	12	67,48246544	5,623538786	39,47704601	2,42487E-18
Resíduos	40	5,698034027	0,142450851		

Fonte: Autores.

A Tabela 11 apresenta a ANOVA para os índices de vazios, que tiveram comportamento semelhante a absorção por imersão, onde os resultados foram diferentes estatisticamente, mas pelo Teste de Tukey as famílias com substituição de agregados não apresentaram essa diferença quando comparadas as médias.

Tabela 11. Resultados da ANOVA – Índice de Vazios.

	G.L.	Soma Quadrada	Média Quadrada	F Calculado	p-valor
Fator	12	155,7944805	12,98287337	31,26448711	1,55974E-16
Resíduos	40	16,61037755	0,415259439		

Fonte: Autores.

Considerando o que foi escrito acima, no que diz respeito ao parâmetro de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas, uma vez que tanto para 1:2:8 quanto para 1:2:9 os traços A10 já absorveram mais água que o traço referência, não cabem recomendações de maiores teores de substituição do agregado por RCV. Já para as substituições ao aglomerante, as argamassas apresentaram desempenhos muito próximos às referências tanto no traço 1:2:8 quanto no traço 1:2:9, e também na comparação entre si, com diferenças não significativas estatisticamente. Desta maneira, os resultados indicam a possibilidade da utilização do RCV nestas condições.

4. Conclusões

A análise de diferentes traços com utilização do RCV permite concluir que a ação do resíduo pode ocorrer de diferentes formas em argamassas de diferentes proporções, mesmo que os materiais utilizados sejam os mesmos, reforçando a importância de diversificados estudos e análises quando se trata da reciclagem de resíduos em materiais construtivos. No caso das argamassas mistas, o grupo de traços 1:2:8 apresentou melhor resposta do comportamento mecânico quanto à incorporação de RCV, em comparação com o grupo 1:2:9. Observa-se que no grupo 1:2:8 os traços C5 e A10 superaram os valores de resistência à tração na flexão do traço referência e, embora no parâmetro de compressão axial isso não tenha ocorrido, foram identificados grandes ganhos de resistência, como no caso do traço C5 aos 63 dias.

Desta forma, conclui-se que a aplicação do RCV é uma realidade para diversas situações de tipologia de argamassa, de substituição e também de traço, apresentando uma vasta quantidade de possibilidades quanto à reciclagem deste resíduo da indústria da construção civil, colaborando com o seu descarte e com a redução de materiais construtivos como o cimento e a areia que representam impactos ambientais.

Para dar seguimento aos promissores resultados aqui encontrados, sugere-se como trabalhos futuros a avaliação do desempenho do RCV em argamassas quanto à resistência de aderência à tração, à absorção pelo método do cachimbo e permeabilidade ao vapor d'água. Também, sugere-se estudos sobre a durabilidade de argamassas com RCV frente aos ataques de cloretos e sulfatos.

Referências

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. (2016). *Estudo Técnico Setorial da Cerâmica Vermelha: Subsídios para a elaboração do plano de desenvolvimento Sustentável da cadeia produtiva de cerâmica vermelha*. Brasília: Invetta.

Araújo, A. R. (2017). *Influência da utilização do resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

ABNT NBR 5751, de 24 de agosto de 2015. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 5752, de 27 de junho de 2014. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 13281, de 30 de setembro de 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 7215, de 30 de dezembro de 1996. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 7200, de 30 de agosto de 1998. Execução de revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 12653, de 24 de julho de 2014. Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Associação Nacional da Indústria Cerâmica. (2014). *Dados oficiais*. Disponível em: <http://anicer.com.br/setor/dados-oficiais/>. Acesso em: 05/04/18.

Cabrera, F. G. C, Soberón, J. M. G, Sánchez, J. L. A, Rea, S. P. A., & Higuera, R. C. (2015).

Mechanical properties of mortar containing recycled ceramic as fine aggregate replacement. *Revista de la Construcción*, 14(3), 22-29.

Caraseck, H., Girardi, A. C. C., Araújo, R. C., Angelim, R., & Cascudo, O. (2018). Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e revestimento. *Revista Cerâmica*, 64 (370).

Castro, A. L., Santos, R. F. C., Gonçalves, K. M., & Quaioni, V. A. (2017). Caracterização de cimento compostos com resíduo da indústria da cerâmica vermelha. *Revista Cerâmica*, 63 (365).

Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., & Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679-690.

Medeiros, M. H. F., Souza, D. J., Filho, J. H., Adorno, C. S., Quarcioni, V.A., & Pereira, E. (2016). Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica. *Revista Matéria*, 21(02), 282-200.

Morais, M. H. L., Souza, W.M., & Ribeiro, A. J. A. (2020). Use of red ceramic waste as fine aggregate in concretes. *Research, Society and Development*, 9(7), 1-17.

Oliveira, E. M., Oliveira, C. M., Petereson, M., Pelisser, F., & Antunes, E. G. P. (2019). Análise da resistência à compressão e tração de argamassa com adição de resíduo de cerâmica vermelha. *Revista Matéria*, 24 (2).

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia de pesquisa científica*. Recuperado de https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1

Qadir, S. S. (2015). Strength and behavior of self compacting concrete with crushed ceramic tiles as partial replacement for coarse aggregate to elevated temperature. *International Journal of Engeneering Technology, Management and Applied Science*, 3(04), 278-286.

Samandi, M., Hussin, M.W., Lee, H. S., Sam, A. R. M., Ismail, M. A., Lim, N. H. A. S., Khalid, N. H. A. (2015). Properties of mortar containing ceramic powder waste as cement replacment. *Jurnal Teknologi*, 77 (12), 93-97.

Santos, R. F. C., Castro, A. L., Gonçalves, K. M. (2018). Produção de concreto autoadensável incorporado com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. *Revista Matéria*, 23(3), 1-15.

Schackow, A., Stringari, D., Senff, L., Correia, S. L., & Segadães, A. M. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 62, 82-89.

Silva, J., Brito, J., & Veiga, R. (2010). Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortar productions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 236-244.

Srujhana, P., Menon, R. J., Basutkar, S. M., & Devi, M. V. R. (2018). Demolished brick masonry as a replacement of river sand in cement and cement lime mortar. *AIP Conference Proceedings*, 2039.

Yagizi, W. (2013). *A técnica de edificar* (13a ed.). São Paulo: Pini.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Francielli Priebbernow Pinz – 50%

Ariela da Silva Torres – 25%

Charlei Marcelo Paliga – 25%