

Influência do teor de material pulverulento (<75 μm) do agregado miúdo de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland

(Influence of dusty material content (<75 μm) in fine aggregate of construction and demolition waste in Portland cement mortars)

P. Kruger^{1*}, A. F. Kossute¹, A. S. A. Chinelatto¹, E. Pereira¹

¹Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. Gen. Carlos Cavalcanti 4748, 84030-900, Ponta Grossa, PR, Brasil

Resumo

Agregados reciclados possuem grande quantidade de material pulverulento em sua constituição, que em excesso causa prejuízos às propriedades de argamassas. Neste trabalho é proposto o estudo da influência do material pulverulento de agregado miúdo provindo de resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades do próprio material e em argamassas. Para tanto, foi realizada a caracterização do agregado e foram adicionados teores de 0, 12%, 20% e 30% de material pulverulento de RCD às argamassas. Realizaram-se os ensaios de consistência, resistência à compressão, densidade de massa, absorção (capilaridade e imersão) e variação dimensional. Os resultados demonstraram que o material pulverulento de RCD não interferiu significativamente nas propriedades de consistência, absorção por imersão e índice de vazios para adições de até 12%. No entanto, a partir da fração limite da norma NBR 15116 de 20%, quanto maior foi o teor de material pulverulento utilizado, maior foi o prejuízo às propriedades das argamassas. Para o teor de 30% de material pulverulento, observou-se queda de 40% da resistência à compressão e aumento de 28% da absorção por imersão em relação ao teor de adição de 20%.

Palavras-chave: material pulverulento, argamassa, resíduos de construção e demolição.

Abstract

Recycled aggregates have a large amount of dusty material in their constitution, which in excess causes damages to the mortar properties. Here, the study of the influence of the dusty material contained in the fine recycled aggregate, from construction and demolition waste (CDW), on the properties of aggregate and mortars, is proposed. For that, the aggregate was characterized, and the contents of 0, 12%, 20%, and 30% of dusty material of CDW were added to the mortars. Tests were done for the determination of consistency, compressive strength, mass density, absorption (capillarity and immersion), and dimensional variation. The results showed that the CDW dusty material did not interfere significantly in the properties of consistency, immersion absorption, and void index for additions of up to 12%. However, from the limit value of 20% of the NBR 15116 standard, the higher the content of dusty material used, the greater was the damage of the mortar properties. It was observed for the content of 30% of dusty material, a 40% drop in the compressive strength, and an increase of 28% in the immersion absorption in relation to the dusty content of 20%.

Keywords: dusty material, mortar, construction and demolition waste.

INTRODUÇÃO

As questões ecológicas e ambientais têm sido discutidas em todos os âmbitos da sociedade, visto que as alterações no ambiente e a escassez de recursos naturais afetam a qualidade de vida de todos. Em decorrência disso, há uma grande preocupação quanto à necessidade da preservação ambiental, bem como com a criação de novos métodos para que a sociedade possa se desenvolver em equilíbrio com o meio ambiente. A construção civil é um dos setores de maior geração de resíduos sólidos, com taxa de participação de 56,32% do total gerado [1], e é também um

dos maiores consumidores de recursos naturais, consumindo aproximadamente 75% [2]. Paralelamente, estes recursos estão cada vez mais escassos e de difícil obtenção, uma vez que há um controle ambiental mais rigoroso sobre sua extração e produção. Diante disso, nota-se a necessidade do setor em desenvolver estratégias sustentáveis e de destinação correta dos resíduos oriundos de descarte de materiais construtivos. Uma das alternativas na construção civil é a reciclagem e reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD). Estudos acerca da utilização deste material como agregado em argamassas e concretos vêm sendo desenvolvidos a fim de [3-17]: reduzir a quantidade de material descartado nos aterros, amenizando a emissão de CO₂; reduzir o consumo de energia gasto no transporte e mineração; e diminuir a necessidade de exploração de

*pkruger@uepg.br

<https://orcid.org/0000-0003-4489-6462>

recursos naturais não renováveis. Além disso, há o fator social, pois o processo de reciclagem de RCD contribui com a limpeza urbana e redução das despesas da administração pública com o descarte desses resíduos [1].

Embora a utilização dos agregados reciclados seja bastante difundida para utilização em base e sub-base de pavimentos e em projetos de drenagem, há ainda muitas dúvidas a respeito do desempenho em argamassas produzidas com agregados de RCD e sua utilização ainda é limitada [6, 8, 11, 18-21]. Um destes fatores é o alto teor de material pulverulento (finos com diâmetro inferior a 75 μm) em sua constituição gerado no processo de reciclagem [9, 13, 16, 22-24]. Segundo a norma NBR 15116 [25], os teores de material pulverulento podem atingir valores próximos a 15% em agregados de resíduos de concreto e 20% em RCD proveniente de resíduo misto. Na literatura observa-se que os resíduos de concreto possuem teor de material pulverulento na faixa entre 4% e 15% [6, 8, 20, 26-28] e os resíduos mistos possuem teores mais elevados, na faixa entre 6% e 25% [18, 11, 29-31]. Um agregado deve ter uma quantidade conveniente de material passante na peneira de abertura de 150 μm para que promova uma argamassa coesiva e trabalhável, sendo este valor sugerido por alguns autores na faixa entre 10% e 15% [9, 22]. No entanto, em quantidades elevadas, os finos podem causar prejuízos na dosagem das argamassas, podendo trazer consequências no seu desempenho, tais como problemas de fissuração, diminuição da aderência e perda de trabalhabilidade [32]. A presença desta parcela fina pode alterar propriedades nas argamassas como a consistência [9, 22, 23], densidade [9, 22-24], absorção [9, 13, 22, 24], retração [13, 23] e resistência mecânica [9, 13, 22-24, 33]. Em decorrência disso, há a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a utilização de agregados reciclados na confecção de argamassas. Dentro desses estudos está a verificação das propriedades que podem ser alteradas pela utilização de agregados reciclados. Assim, o objetivo deste trabalho foi definir um teor aceitável de partículas menores que 75 μm em agregados reciclados que proporcionem melhorias nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios foi utilizado cimento Portland CII-F 32, agregado miúdo proveniente de britagem de rocha de diabásio de pedra da região dos Campos Gerais-PR, Brasil, e agregado miúdo de RCD fornecido por empresa de reciclagem de concreto. O agregado de RCD teve tipologia ARM (agregado reciclado misto) segundo a norma NBR 15116, pois possuiu em sua composição mais que 10% de parcela cerâmica. Para avaliar a influência dos teores de material pulverulento de RCD em argamassas de cimento Portland, primeiramente foi realizada a caracterização do agregado miúdo de RCD, por meio dos ensaios de massa unitária [34], massa específica absoluta [35], granulometria [36], teor de material pulverulento [37] e absorção de água [38]. Estes ensaios foram realizados com 3 repetições e

respeitando a diferença máxima dos resultados, definida nas respectivas normas. O teor original de material pulverulento do material sem lavagem obtido foi de 7,51%. Porém, para a produção das argamassas este teor não foi considerado, para poder padronizar a metodologia de produção do agregado. Para isso, procedeu-se a lavagem do agregado para retirada do material menor que 75 μm , de forma a haver maior controle sobre a quantidade final adicionada utilizada na pesquisa.

Definiram-se os teores de material pulverulento que foram adicionados no preparo das argamassas em: 0 (controle); 12% (teor intermediário); 20%, no limite da norma NBR 15166 [25]; e 30%, valor acima da norma e considerado elevado. Embora esta norma seja utilizada para o uso de agregados reciclados em concretos sem função estrutural e pavimentação, ela foi utilizada como referência na escolha dos teores por não existir uma normativa específica para produção de argamassas com RCD. As argamassas utilizadas para a realização dos ensaios foram do tipo simples, ou seja, compostas por cimento, agregado miúdo de resíduos de construção e demolição (RCD) e água. Optou-se pela argamassa simples para simular a argamassa constituinte de materiais compósitos como o concreto e de forma que não houvesse em sua composição mais de um material de granulometria fina que poderia influenciar e até prejudicar uma análise pontual sobre a influência do material pulverulento constituinte do agregado. Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada ensaio em argamassa. O traço piloto escolhido foi um traço genérico de 1:3:x (de cimento, agregado miúdo de RCD e relação água/cimento), sendo que o valor da relação água/cimento foi definido após a execução de ensaios de consistência. O ensaio de consistência foi feito pelo método da mesa para índice de consistência (norma NBR 7215 [39]), com o objetivo de determinar um valor para a relação água/materiais secos (H) dentro de uma faixa ideal, possibilitando o uso de um valor de relação água/cimento comum a todos os traços das argamassas estudadas. A partir desse ensaio, definiu-se um valor de H inicial de 11% e este valor foi sendo ajustado de forma crescente e com intervalo constante até o valor de 17%, conforme mostra a Tabela I. Em função dos resultados obtidos nesta etapa (Tabela I), foi escolhido um único valor de relação água/cimento e adotou-se um traço fixo para ser utilizado nos demais ensaios com o objetivo de avaliar a influência do teor de material pulverulento nas propriedades das argamassas.

Tabela I - Traços utilizados nos ensaios de consistência.
[Table I - Traces used in the consistency tests.]

Teor de material pulverulento	Traço (1:a:a/c)	Relação água/materiais secos (%)
	1:3:0,44	11
Variável (0, 12%, 20%, 30%)	1:3:0,52	13
	1:3:0,60	15
	1:3:0,68	17

Para a caracterização das argamassas, os ensaios realizados foram: determinação da consistência [39] e determinação da densidade de massa [40] no estado fresco; e resistência à compressão [39], determinação da absorção (tanto por capilaridade quanto por imersão) [41, 42] e determinação da variação dimensional [43] no estado endurecido. Com referência à análise estatística utilizada em todos os ensaios realizados, buscou-se comparar o resultado de 4 grupos de amostras independentes (teores de 0, 12%, 20% e 30%) utilizando a análise de variância (ANOVA). Para poder evidenciar se o resultado de pelo menos um dos grupos possuiu diferença estatística significativa, complementou-se a análise com o teste de Tukey com nível de significância de 5%. Desta forma as análises foram feitas comparando par a par e não uma comparação a um valor de referência. Nos gráficos, os resultados com mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do cimento: os resultados da caracterização química e física do cimento Portland CP II-F 32 estão apresentados na Tabela II. A opção por utilizar o cimento com adição de fíler foi devido ao fato de ser o cimento mais utilizado nas obras da região de estudo e também para melhor controle da quantidade e tipologia de finos constituintes da mistura, diminuindo possíveis influências que outras adições pudessem vir a proporcionar.

Caracterização do agregado: os resultados da caracterização do agregado miúdo de RCD, após a retirada por lavagem das partículas menores que 75 μm , estão apresentados na Tabela III e estão dentro dos observados na literatura [44]. Na Fig. 1 está apresentado o gráfico com os limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo [36] e o posicionamento da curva granulométrica do agregado de RCD utilizado. Foi possível afirmar que o agregado estava enquadrado dentro da zona ótima, muito próximo de seu limite superior.

A Tabela IV apresenta os resultados obtidos para a massa unitária, massa específica absoluta e índice de vazios, a fim de analisar a influência da quantidade de material pulverulento no empacotamento de partículas do

Tabela III - Resultados de caracterização do agregado miúdo de RCD lavado.

[Table III - Results of characterization of washed fine CDW aggregate.]

Propriedade	Valor
Massa específica absoluta	2,55 g/cm ³
Massa unitária	1,53 kg/dm ³
Dimensão máxima característica (DMC)	4,8 mm
Módulo de finura (MF)	2,86
Absorção	4,98%
Material pulverulento	0

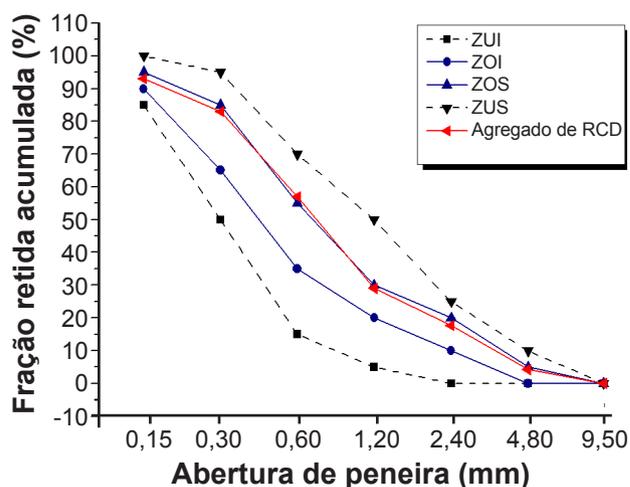


Figura 1: Curvas de distribuição granulométrica limites e do agregado estudado. ZUI: zona utilizável inferior; ZOI: zona ótima inferior; ZOS: zona ótima superior; ZUS: zona utilizável superior. [Figure 1: Particle size distribution curves for the studied aggregate and standard limits.]

Tabela II - Resultados de caracterização físico-químico do cimento Portland CP II-F 32.

[Table II - Results of physicochemical characterization of Portland cement CP II-F 32.]

Composição química (%)							
Perda ao fogo	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Resíduo insolúvel
4,89	61,00	18,62	3,93	4,22	2,74	2,62	1,44
Características físicas							
Massa espec. (g/cm ³)	Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Consistência normal (%)	Tempo de pega (min)		
	#200 (75 μm)	#325 (45 μm)			Início	Fim	
3,08	1,95	12,63	3,248	26,8	4:14	5:01	
Expansibilidade a quente (mm)			Resistência à compressão (MPa)				
0,21			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
			13,0	27,2	33,6	41,0	

agregado. Observou-se que houve influência do teor de finos no empacotamento de partículas do agregado quando analisado os valores de massa unitária. A partir do teor de 30% de material pulverulento adicionado ocorreu uma redução na massa unitária, provavelmente porque os finos incorporados adicionais funcionaram como agregados primários preenchendo não somente os espaços entre os agregados, mas também o espaço ocupado por esses agregados [22]. O material pulverulento adicionado possui em sua constituição os mesmos resíduos do agregado de resíduo de origem. Devido à composição mineralógica dos agregados e do material pulverulento ser de mesma origem, a adição de fino nos teores definidos não interferiu de forma significativa na massa específica absoluta, não apresentando diferença estatística nos resultados obtidos. O índice de vazios é uma correlação entre a massa unitária e a massa específica do agregado, e foi possível observar que ao se adicionar teores maiores (30%) de partículas finas na composição do agregado, houve uma redução do índice de vazios. Esta propriedade indicou uma melhora na distribuição granulométrica e a influência das partículas menores que 75 μm no empacotamento do agregado.

Tabela IV - Caracterização do agregado miúdo de RCD com incorporação de partículas <75 μm .

[Table IV - Characterization of the small aggregate of CDW with the incorporation of particles <75 μm .]

Teor de material pulverulento (%)	Massa unitária (g/cm^3)	Massa específica absoluta (g/cm^3)	Índice de vazios (%)
0	1,34 ^a	2,56 ^a	47,77 ^a
12	1,36 ^a	2,55 ^a	46,78 ^a
20	1,35 ^a	2,55 ^a	46,82 ^a
30	1,31 ^b	2,54 ^a	43,37 ^b

Nota: médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente no teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Outra propriedade que foi diretamente afetada pela incorporação de partículas menores que 75 μm é a absorção de água do agregado reciclado. Existiu uma correlação direta entre o material mais fino que 75 μm e a absorção de água, porque os agregados mais porosos também são mais fracos e tendem a produzir um maior teor de finos durante a moagem. Conforme observado na Fig. 2, a absorção do agregado reciclado aumentou à medida que se elevou o teor de material pulverulento do agregado de RCD. O incremento da absorção de água dos agregados à medida que aumentou o teor de pulverulentos pode ser explicado pelo aumento da superfície específica do material. O aumento da área específica propicia maior superfície para adsorção física das moléculas de água [24]. Observou-se também um aumento no desvio padrão nos valores de absorção obtidos à medida que aumentou o teor de material pulverulento. Este comportamento ocorreu em função da metodologia aplicada no ensaio para obtenção da condição ‘saturada superfície

seca’. Nesta etapa do procedimento o agregado foi imerso em água por 24 h e logo após foi retirada a água em excesso, iniciando o procedimento de secagem do agregado. Quanto maior o teor de material pulverulento, maior foi a suspensão de finos nesta água que não decantaram, causando assim uma maior porcentagem de perdas de finos no processo. Esta perda justificou o aumento da dispersão dos resultados obtidos.

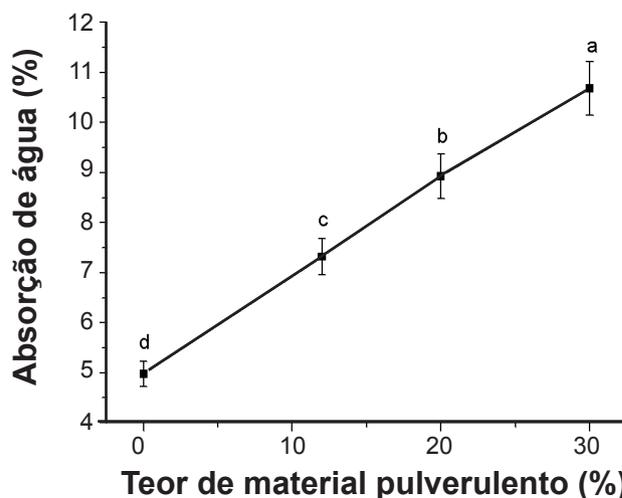


Figura 2: Relação entre absorção de água do agregado e teor de material pulverulento.

[Figure 2: Relationship between aggregate water absorption and dusty material content.]

Propriedades da argamassa no estado fresco: após realizada a caracterização do agregado, foi feito o estudo das argamassas no estado fresco e endurecido. O primeiro ensaio realizado foi o de consistência, a fim de se obter um único valor de relação água/cimento para os traços. Este estudo teve a finalidade de definir um traço comum para todas as argamassas de forma a se obter argamassas com boa trabalhabilidade sem a necessidade de acréscimo de água, o que poderia afetar as análises das propriedades no estado endurecido. A Fig. 3 mostra uma análise conjunta dos resultados obtidos, relacionando o valor de relação água/materiais secos (H) e o índice de consistência (IC) para os teores de material pulverulento. Para todos os teores de material pulverulento, nos dois primeiros valores de relação água/materiais secos de 11% e 13%, o aumento na quantidade de água não alterou o índice de consistência. Foi necessário um valor alto de relação água/cimento (x) de 0,60 para que as argamassas atingissem um comportamento trabalhável, devido à alta absorção de água dos agregados de RCD. Ademais, as argamassas produzidas com teores de 20% e 30% de material pulverulento apresentaram comportamento bastante distinto das anteriores. A argamassa com 20% começou a apresentar característica mais plástica apenas com relação água/cimento de 0,68 (H=17%), e a com 30% não chegou a apresentar comportamento plástico com os valores de H ensaiados. Devido aos resultados obtidos nesta etapa, adotou-se um traço fixo em massa de 1:3:0,60 (cimento,

areia e água) para todos os ensaios posteriores, visto que a relação água/cimento de 0,60 (H=15%) gerou consistências trabalháveis para os teores de material pulverulento estudados que estão dentro do limite da norma e são mais usualmente encontrados em agregados de resíduos de construção e demolição. A Fig. 4 apresenta a imagem do ensaio de índice de consistência realizado para cada teor de material pulverulento para a relação água/materiais secos de 15%.

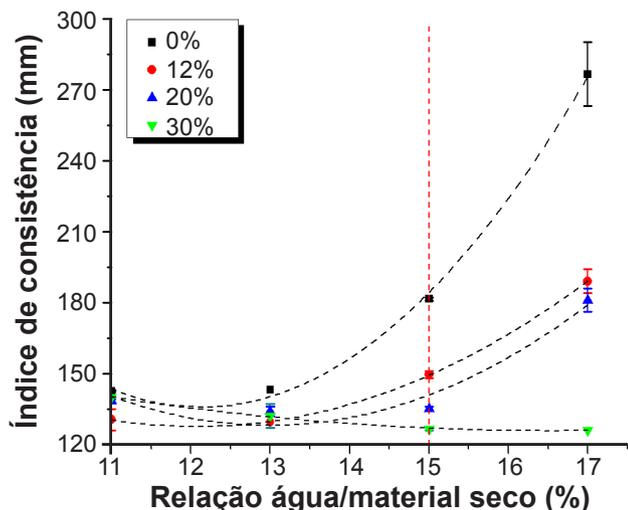


Figura 3: Índice de consistência (IC) em função da relação água/materiais secos (H) das argamassas. [Figure 3: Consistency index (CI) as a function of water/dry materials ratio (H) of mortars.]



Figura 4: Imagens do ensaio de índice de consistência para H=15% e teores de material pulverulento de 0 (a), 12% (b), 20% (c) e 30% (d). [Figure 4: Images of consistency index test for H=15% and contents of dusty material of 0 (a), 12% (b), 20% (c), and 30% (d).]

Os resultados de densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela V. Notou-se que estas propriedades foram inter-relacionadas, visto que se trata de uma relação entre a densidade de massa da argamassa no estado fresco e a densidade teórica desta argamassa [40]. Com relação à densidade da argamassa no estado fresco,

a redução obtida pode estar relacionada com o fato de que o material fino adicionado foi composto por partículas mais frágeis do RCD (cerâmica e argamassa) que possuem densidade de massa menor que os agregados (areia e brita). Desta forma, ao se adicionar maior quantidade deste material, reduziu-se a massa total da argamassa fresca [9, 22, 24].

Tabela V - Densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas.

[Table V - Density and incorporated air content of mortars.]

Teor de material pulverulento (%)	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
0	2,019 ^a	7,79 ^a
12	1,780 ^b	18,55 ^b
20	1,556 ^c	28,71 ^c
30	1,351 ^d	38,01 ^d

Nota: médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente no teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Propriedades da argamassa no estado endurecido: as médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias são apresentadas na Fig. 5a. Para a análise das resistências à compressão, é importante salientar que o traço de 1:3:0,6 foi mantido constante em todos os ensaios, tendo sido modificada apenas a quantidade de finos menores que 75 µm em cada mistura. Foi possível observar que as argamassas com teores de material pulverulento até o limite de norma de 20% apresentaram valores similares entre si. Entretanto, quando adicionado o teor de 30%, acima do limite da norma, apresentou queda de resistência à compressão. Partículas finas até o limite da norma NBR 15116 foram benéficas, pois auxiliaram no preenchimento dos vazios, proporcionando melhor empacotamento das partículas e reduzindo os vazios [22]. Embora a inserção de material pulverulento auxilie na diminuição do índice de vazios, em excesso este material interfere na acomodação dos grãos mais grossos, ocasionando o afastamento entre partículas, elevando o volume de vazios da mistura. Além disso, o excesso de material pulverulento aumenta a demanda de água, o que aumenta a porosidade da argamassa [16]. Desse modo, no teor correspondente a 30%, a porosidade das argamassas aumentou e a resistência à compressão diminuiu. O aumento do teor de material pulverulento, como verificado, também afetou a trabalhabilidade no estado fresco, trazendo assim dificuldade de adensamento adequado na hora da moldagem dos corpos de prova. Como observado na Fig. 6, corpos de prova com maior teor de finos tiveram perda na trabalhabilidade, produzindo argamassa com menor índice de consistência e, por consequência, maior probabilidade de argamassa com ‘nichos’, o que pode afetar a sua resistência à compressão. Esta perda de trabalhabilidade e dificuldade de adensamento também puderam ser observadas pela diferença de coloração entre as camadas do corpo de prova.

Os resultados obtidos para a absorção por imersão e índice de vazios das argamassas estão apresentados nas Figs. 5b e

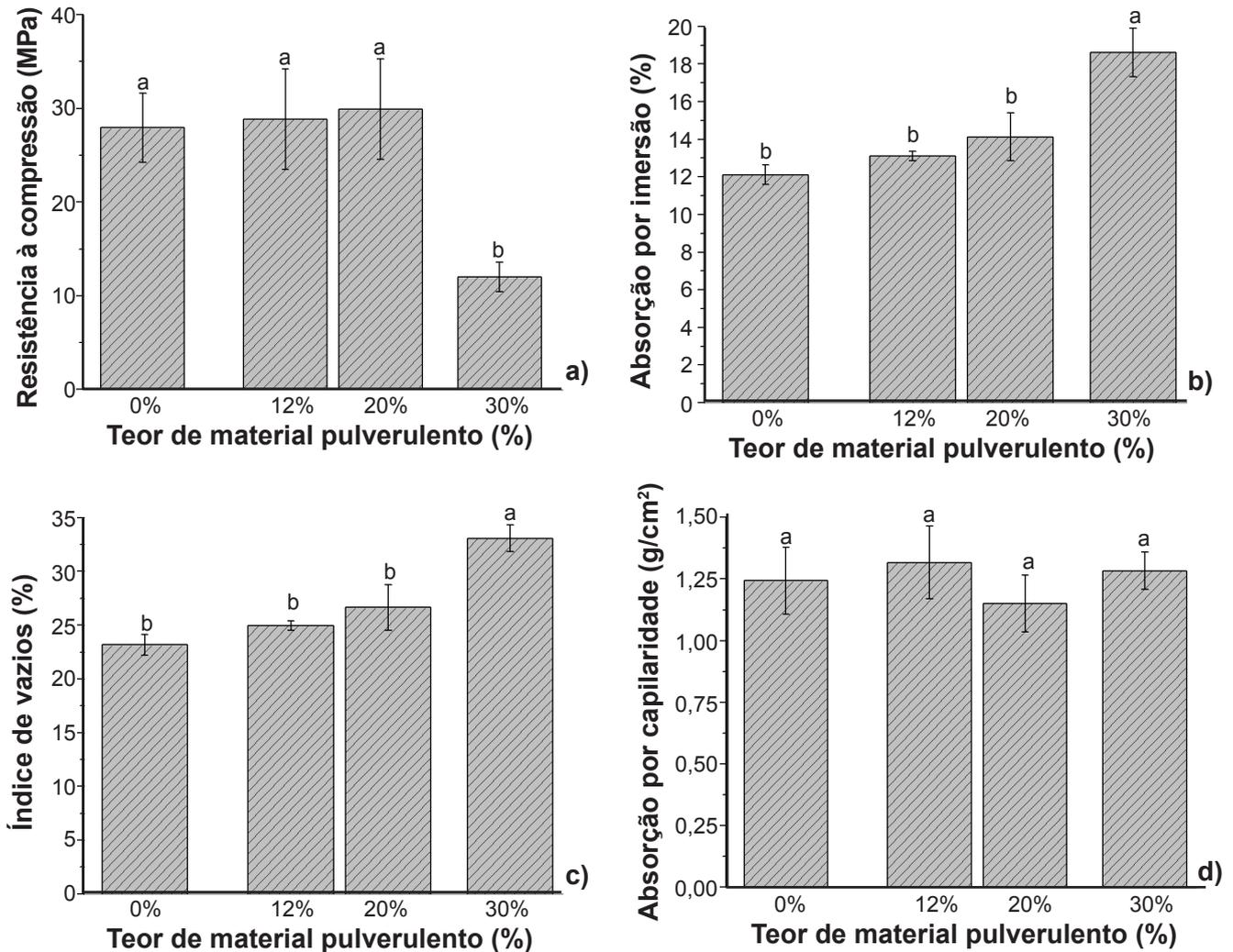


Figura 5: Resultados de resistência à compressão aos 28 dias (a), absorção por imersão (b), índice de vazio (c) e absorção por capilaridade (d) das argamassas com diferentes teores de material pulverulento de RCD.

[Figure 5: Results of compressive strength at 28 days (a), immersion absorption (b), void index (c), and capillary absorption (d) of mortars with different fine CDW aggregate contents.]

5c, respectivamente. Observou-se um aumento na absorção por imersão a partir do teor de 12% de adição de material pulverulento, assim como no índice de vazios. Outro ponto observado foi o aumento mais significativo de absorção com o aumento do teor de 20% para 30% de material pulverulento. Assim como os ensaios em agregados com maior quantidade de material fino apontaram uma maior absorção, o mesmo ocorreu nas misturas de argamassa. Diversos estudos [9, 13, 22, 24] têm observado que, para as frações de menor granulometria, a absorção de água é maior. Alguns atribuem a maior absorção das frações menores à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos de menor tamanho [45, 46]. Ainda, o fato de o material pulverulento acrescido ser formado principalmente por resíduo de materiais menos densos, como a argamassa e cerâmica vermelha, também acarreta maior absorção de água. Os resultados de absorção de água por capilaridade, de acordo com o teor de material pulverulento, estão apresentados na Fig. 5d. Observou-se que os resultados de absorção por capilaridade foram similares entre as argamassas, independentemente do teor

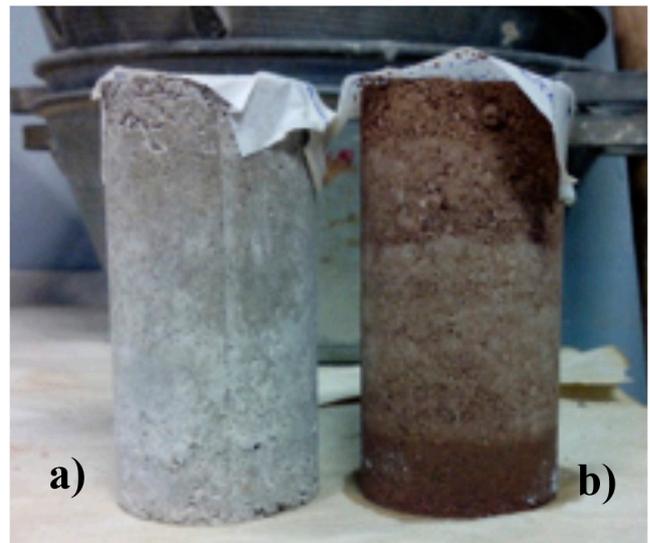


Figura 6: Argamassas com 0% (a) e 30% (b) de material pulverulento.

[Figure 6: Mortars with 0% (a) and 30% (b) of dusty material.]

de material pulverulento adicionado, sendo um indicativo de que o teor de partículas finas não contribuiu de forma significativa nesta propriedade.

Na Fig. 7 são apresentados os resultados de variação dimensional de barras de argamassa. Os resultados indicaram uma alteração na variação dimensional à medida que se aumentou o teor de material pulverulento. As barras, de forma geral, sofreram retração. Esse comportamento foi mais facilmente observado a partir de 7 dias e aos 28 dias, sendo que, neste período, a variação dimensional verificada para o teor de 30% de material pulverulento foi a mais significativa e distante dos valores dos demais teores. Foi possível observar que para valores dentro de limites de norma, tal como 12% e 20%, o comportamento das argamassas em relação à variação dimensional se apresentou similar. Alguns autores [13, 23] têm associado os agregados reciclados à alta retração em argamassas, o que é atribuído principalmente à alta taxa de absorção destes agregados, que

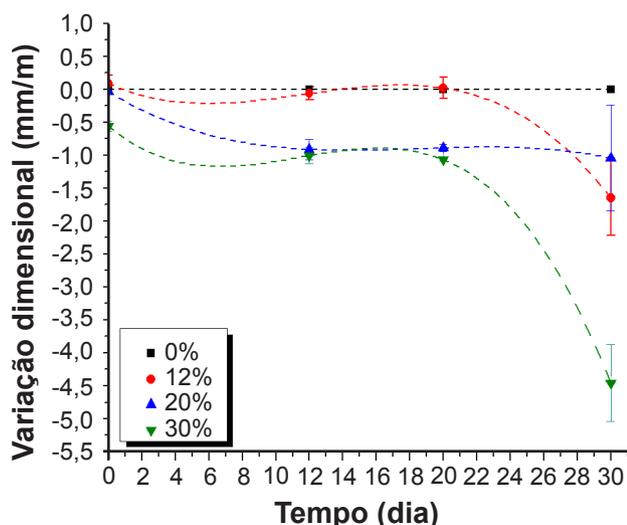


Figura 7: Variação dimensional das argamassas em função do tempo.

[Figure 7: Dimensional variation of mortars as a function of time.]

implica no uso de maiores fatores água/cimento, e o alto teor de finos. Neste caso, a relação água/cimento foi mantida o mesmo, alterando-se apenas o teor de finos. Confirmou-se, deste modo, que o aumento no teor de finos causou uma redução no diâmetro médio dos capilares da argamassa, gerando maior tensão na saída de água durante a secagem, aumentando a retração e a fissuração [47]. A maior absorção de água ocasionada pelo alto teor de finos também contribuiu para maior perda de água por secagem, principalmente para os teores mais altos de adição de material pulverulento. Na variação de massa, pôde-se observar que a partir da adição de finos na argamassa ocorreu perda de massa ao longo do tempo. A Fig. 8 apresenta a variação de massa versus teor de material pulverulento após 28 dias.

A Tabela VI apresenta o resumo das principais propriedades obtidas para as argamassas tanto no estado fresco quanto endurecido. As argamassas produzidas com teores de 20% e 30% de material pulverulento apresentaram comportamento bastante distinto das anteriores com relação à consistência. A argamassa com 20% de material pulverulento começou a

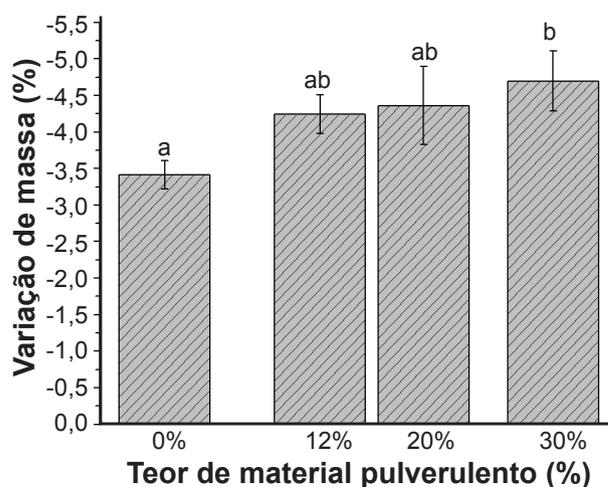


Figura 8: Variação de massa das argamassas após 28 dias.

[Figure 8: Mortar mass variation after 28 days.]

Tabela VI - Resumo das propriedades das argamassas com diferentes teores de material pulverulento.

[Table V - Summary of mortar properties with different fine CDW aggregate contents.]

Propriedade	0% (ref)	12%	20%	30%
Consistência (mm)	181,5	↓	↓	↓
Densidade (g/cm ³)	2,019	↓	↓	↓
Teor de ar incorporado (%)	7,79	↑	↑	↑
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	27,93	↑	↑	↓
Absorção por imersão (%)	12,11	↑	↑	↑
Índice de vazios (%)	23,17	↑	↑	↑
Absorção por capilaridade (g/cm ²)	1,243	=	=	=
Variação dimensional aos 28 dias (mm/m)	-0,56	↑	↑	↑
Variação de massa aos 28 dias (%)	-3,42	↑	↑	↑

Nota: seta para cima indica aumento dos valores em relação à referência e seta para baixo significa a diminuição dos valores; o sinal de igual significa que não houve alteração dos valores.

apresentar característica mais plástica apenas com relação água/cimento de 0,68 (H=17%), e a argamassa com 30% não chegou a apresentar comportamento plástico com os valores de H ensaiados. Quando analisadas as propriedades no estado endurecido, verificou-se que a resistência à compressão dos corpos de prova das argamassas, até o limite de norma de 20%, apresentou valores similares entre si. Entretanto, quando adicionado o teor de 30%, acima do limite da norma, apresentou queda de resistência à compressão. Analisando as absorções de água das argamassas, por imersão e por capilaridade, verificou um aumento na absorção por imersão a partir do teor 12%, assim como no índice de vazios. Outro ponto observado foi o aumento mais significativo de absorção com o aumento de 20% para 30% de material pulverulento. Porém, quanto à absorção por capilaridade, não houve diferença significativa entre os resultados apresentados, independentemente do teor de material pulverulento adicionado, sendo um indicativo que o teor de partículas finas não contribuiu de forma significativa nesta propriedade. Por fim, analisando a variação dimensional, os resultados indicaram uma alteração à medida que se aumentou o teor de material pulverulento. As barras de forma geral sofreram retração. Esse comportamento foi mais facilmente observado a partir de 7 dias e aos 28 dias, sendo que, neste período, a variação dimensional verificada para o teor de 30% de material pulverulento foi a mais significativa e distante dos valores dos demais teores. Foi possível observar que para valores dentro de limites de norma, tal como 12% e 20%, o comportamento das argamassas em relação à variação dimensional se apresentou similar.

CONCLUSÕES

Todos os ensaios realizados neste trabalho foram relacionados ao material pulverulento contido no agregado miúdo de RCD (resíduos de construção e demolição). Com base nos resultados obtidos, foi verificada a influência do material pulverulento nas características do próprio agregado e nas propriedades das argamassas. Pôde-se observar que as propriedades sofreram alterações à medida que se aumentou o teor de material pulverulento, demonstrando claramente a influência da parcela de finos nas propriedades das argamassas. Observou-se que, com o aumento de teor de finos, houve alterações negativas no comportamento das argamassas no estado fresco, ocorrendo diminuição da trabalhabilidade, redução da densidade e aumento de ar incorporado. No estado endurecido, pôde-se observar que ocorreu aumento da absorção de água por imersão, acima do limite de norma. Estas respostas demonstraram que ocorreu uma influência negativa sobre a resistência à compressão. Com a diminuição da densidade, percebeu-se uma maior porosidade das argamassas, confirmada pelo aumento da absorção. Este fator se mostrou positivo até o teor de 20% de adição de material pulverulento (limite de norma). Acima deste valor, a propriedade de resistência sofreu perdas significativas, dando indícios de que o uso nesta porcentagem não é recomendável. Com relação à variação volumétrica

e de massa, verificou-se que a adição de quantidades maiores de finos teve influência, apresentando retração da argamassa e perda de massa. Desse modo, foi possível notar que, até valores dentro do limite da norma NBR 15516, o material pulverulento não interferiu significativamente nas propriedades das argamassas, sendo até benéfico no caso da resistência à compressão. No entanto, a partir da fração limite, quanto maior foi o teor de material pulverulento utilizado, maiores foram os prejuízos às propriedades das argamassas. Para o teor de 30% de material pulverulento, observou uma queda de 40% da resistência à compressão, aumento de 28% da absorção por imersão e aumento da variação dimensional, quando comparado com a argamassa produzida com o teor de 20% de material pulverulento.

REFERÊNCIAS

- [1] ABRELPE, “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019”, Ass. Bras. Empr. Limp. Públ. Resíd. Esp., S. Paulo (2019).
- [2] CBCS, “Sustentabilidade na construção”, Cons. Bras. Constr. Sust., S. Paulo (2007).
- [3] L.L. Brasileiro, J.M.E. Matos, *Cerâmica* **61**, 358 (2015) 178.
- [4] D.J. Anderson, S.T. Smith, F.T.K. Au, *Constr. Build. Mater.* **117** (2016) 20.
- [5] P.O. Awoyera, J.M. Ndambuki, J.O. Akinmusuru, D.O. Omole, *HBRC J.* **14**, 3 (2018) 282.
- [6] C. Muñoz-Ruiperez, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, *Constr. Build. Mater.* **118** (2016) 139.
- [7] C. Rodríguez, C. Parra, G. Casado, I. Miñano, F. Albaladejo, F. Benito, I. Sanchez, *J. Clean. Prod.* **127** (2016) 152.
- [8] P. Saiz Martínez, M. González Cortina, F. Fernández Martínez, A. Rodríguez Sánchez, *J. Clean. Prod.* **118** (2016) 162.
- [9] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, *Constr. Build. Mater.* **105** (2016) 400.
- [10] J.S. González, F.L. Gayarre, C.L.C. Pérez, P.S. Ros, M.A.S. López, *Constr. Build. Mater.* **149** (2017) 507.
- [11] A. Katz, D. Kulisch, *Mater. Struct.* **50**, 4 (2017) 199.
- [12] Z.E.A. Tahar, T.T. Ngo, E.H. Kadri, A. Bouvet, F. Debieb, S. Aggoun, *Constr. Build. Mater.* **149** (2017) 91.
- [13] H. Carasek, A.C.C. Girardi, R.C. Araújo, R. Angelim, O. Cascudo, *Cerâmica* **64**, 370 (2018) 288.
- [14] R.A. Araújo, A.L.R. de Menezes, K.C. Cabral, A.K.C. Nóbrega, A.E. Martinelli, K.G.M. Dantas, *Cerâmica* **65**, 375 (2019) 461.
- [15] F. Brekailo, E. Pereira, E. Pereira, J. Hoppe Filho, M.H.F. de Medeiros, *Cerâmica* **65**, 375 (2019) 351.
- [16] R.L.S. Ferreira, M.A.S. Anjos, J.E.S. Pereira, N.J.M. Fonseca, A.K.C. Nóbrega, *Cerâmica* **65**, 373 (2019) 139.
- [17] J.T.M. Francisco, A.E. de Souza, S.R. Teixeira, *Cerâmica* **65**, suppl.1 (2019) 22.
- [18] J.O. Malta, V.S. Silveira, J.P. Gonçalves, R.D. Toledo Filho, *Amb. Constr.* **14**, 1 (2014) 85.

- [19] M. Stefanidou, E. Anastasiou, K. Georgiadis Filikas, *Waste Manage.* **34** 12 (2014) 2595.
- [20] P. Saiz-Martínez, M. Gonzalez-Cortina, F. Fernández-Martínez, *Mater. Constr.* **65**, 319 (2015) 1.
- [21] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, *Constr. Build. Mater.* **81** (2015) 179.
- [22] J. Silva, J. de Brito, R. Veiga, *Constr. Build. Mater.* **23**, 1 (2009) 556.
- [23] M. Braga, J. de Brito, R. Veiga, *Constr. Build. Mater.* **36** (2012) 960.
- [24] L.F.R. Miranda, C.S. Constantino, C.R. Monich, A.M. Neto, *J. Mater. Civ. Eng.* **25** 2 (2013) 236.
- [25] NBR 15116, “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos”, ABNT, Rio Janeiro (2004).
- [26] J.M.V. Gómez-Soberón, *Cem. Concr. Res.* **32**, 8 (2002) 1301.
- [27] D. Simieli, C. Mizumoto, A.A.S. Segantini, F.M. Salles, *Exacta* **5** (2007) 231.
- [28] G. Pan, M. Zhan, M. Fu, Y. Wang, X. Lu, *Constr. Build. Mater.* **154** (2017) 810.
- [29] J.J.L. Tenório, P.C.C. Gomes, C.C. Rodrigues, T.F.F. de Alencar, *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* **5**, 5 (2012) 692.
- [30] I.H.S. Costa, J. Santos, in *Anais 55º Congr. Bras. Concr.* (2013) 1.
- [31] I. Martínez, M. Etxeberria, E. Pavón, N. Díaz, *Constr. Build. Mater.* **49** (2013) 384.
- [32] L.F.R. Miranda, S.M.S. Selmo, *Constr. Build. Mater.* **20** (2006) 615.
- [33] V. Corinaldesi, G. Moriconi, *Constr. Build. Mater.* **23**, 1 (2009) 289.
- [34] NBR NM 45, “Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios”, ABNT, Rio Janeiro (2006).
- [35] NBR NM 52, “Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”, ABNT, Rio Janeiro (2009).
- [36] NBR NM 248, “Agregados: determinação da composição granulométrica”, ABNT, Rio Janeiro (2012).
- [37] NBR NM 46, “Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem”, ABNT, Rio Janeiro (2003).
- [38] NBR NM 30, “Agregado miúdo: determinação da absorção de água”, ABNT, Rio Janeiro (2001).
- [39] NBR 7215, “Cimento Portland: determinação da resistência à compressão”, ABNT, Rio Janeiro (2019).
- [40] NBR 13278, “Argamassas para assentamento e revestimento de tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado”, ABNT, Rio Janeiro (2005).
- [41] NBR 9779, “Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade”, ABNT, Rio Janeiro (2012).
- [42] NBR 9778, “Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”, ABNT, Rio Janeiro (2009).
- [43] NBR 15261, “Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da variação dimensional (retração linear)”, ABNT, Rio Janeiro (2005).
- [44] B.C.Q. Lye, R.K. Dhir, B.G.S. Ghataora, *Struct. Build.* **169** (2016) 867.
- [45] T.C. Hansen, H. Narud, *Concr. Int.* **5** (1983) 79.
- [46] C.S. Poon, D. Chan, *Constr. Build. Mater.* **20** (2006) 578.
- [47] P.K.X. Bastos, E.H. Nakamura, M.A. Cincotto, in *Simp. Bras. Tecnol. Argamas.* **6** (2005) 251.
- (*Rec. 17/04/2020, Rev. 07/06/2020, Ac. 29/06/2020*)