



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

RAISSA RAQUEL DA SILVA GOMES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE
DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

**NATAL-RN
2016**

Raissa Raquel da Silva Gomes

Avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Jaquelígia Brito da Silva

Coorientadora: Prof^ª Dr^ª. Andreza Kelly Costa Nóbrega

Natal-RN
2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Gomes, Raissa Raquel da Silva.

Avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição / Raissa Raquel da Silva Gomes. - 2016.

15f.: il.

Artigo científico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Orientadora: Prof^a.Dr^a. Jaquelígia Brito da Silva.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Andreza Kelly Costa Nóbrega.

1. Engenharia civil – TCC. 2. Material de construção – Argamassa - TCC. 3. Resíduo de construção e demolição - TCC. 4. Resistência mecânica – TCC. I. Silva, Jaquelígia Brito da. II. Nóbrega, Andreza Kelly Costa.III.Título.

RN/UF/BCZM CDU 624

Raissa Raquel da Silva Gomes

Avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 16 de Novembro de 2016:

Prof^a Dr^a. Jaquelgia Brito da Silva – Orientadora

Prof^a Dr^a. Andreza Kelly Costa Nóbrega – Coorientadora

Prof. Dr. Leonardo Flamarion Marques Chaves – Examinador interno

Eng. Ruan Landolfo da Silva Ferreira – Examinador externo

Natal-RN

2016

RESUMO

Avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição

A construção civil, ao mesmo tempo em que é responsável pelo desenvolvimento de um país, é também um grande agente de degradação do meio ambiente, com a retirada de recursos minerais não renováveis e grande geração de resíduos. Uma alternativa que surge nesse cenário é a reciclagem desses materiais para a incorporação em argamassas de revestimento. O presente trabalho objetivou a caracterização, o estudo do desempenho mecânico e dos fatores que influenciam na durabilidade, de argamassas de revestimento produzidas com a substituição do agregado natural, pelo Resíduo de Construção e Demolição – RCD, nos percentuais de 0, 25, 50, 75 e 100%. Os resultados das propriedades mecânicas aos 28 e 91 dias foram satisfatórios, uma vez que se mostraram superiores, principalmente em relação à capacidade de deformação e a um maior ganho percentual na resistência à compressão. As propriedades tecnológicas que influenciam na durabilidade obtiveram valores inferiores à argamassa de referência.

Palavras-chave: argamassa de revestimento, resíduo de construção e demolição, caracterização, resistência mecânica.

ABSTRACT

Evaluation of the mechanical properties and durability of coating mortars produced with construction and demolition waste

The civil construction, at the same time it is responsible for the development of a country, is also a major environmental degradation agent, with the removal of non-renewable mineral resources and large waste generation. An alternative that arises in this scenario is the recycling of these materials for incorporation into coating mortar. This study aimed to characterize, the study of mechanical performance and the factors that influence the durability of coating mortars produced with the replacement of natural aggregate, the Construction and Demolition Waste - CDW, in percentages of 0, 25, 50, 75 and 100%. The results of mechanical properties to 28 and 91 days were satisfactory, since it showed superior especially in relation to the capacity of deformation and a bigger percentage gain in compressive strength. The technological properties that influence the durability obtained values lower than the reference mortar.

Keywords: Coating Mortar, construction and demolition waste, characterization, mechanical resistance.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é inegavelmente imprescindível para o desenvolvimento de um país, seja na geração de empregos (8,59% da população ocupada, segundo dados mais recentes do IBGE, relativos a 2013), impulsionando a economia, ou gerando infraestrutura para o desenvolvimento de outras atividades. Em contra partida essa mesma indústria é responsável por grandes impactos ambientais. Dentre eles pode ser citado o grande consumo de recursos naturais compreendido entre 20e 50% [1] e entre 40 a 75% segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) [2], dentre os quais estão recursos minerais que não são renováveis, além disso, a extração atinge o equilíbrio ambiental modificando de forma agressiva o meio; outro ponto importante é o impacto causado pelo beneficiamento da matéria-prima, como por exemplo, a produção de cimento que é responsável por quantidade significativa de liberação de CO₂ na atmosfera, estimado pela Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), em 9,5 toneladas em 2013, no Brasil [3]; os resíduos gerados durante todo o processo também impactam o ambiente uma vez que podem ser descartados de forma irregular em leitos de rio e estradas, e se descartados de forma regular requerem cada vez mais espaço para a sua deposição.

Considerando essa problemática, visando sustentabilidade, a diminuição da extração de matéria prima, do consumo de energia, da liberação de poluentes e da quantidade de resíduos, provenientes ou não da própria indústria, alguns materiais que seriam descartados vêm sendo estudados e alguns já vem sendo utilizados em substituição ao aglomerante [4], [5] e ao agregado [6] de argamassas e concretos. Países como Holanda, Dinamarca, Alemanha e Suíça já reciclam parte do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) produzidos [7].

O setor da construção civil, ao mesmo tempo em que é um grande gerador de resíduos, tem uma grande capacidade de absorvê-los, mas para isso é necessário conhecer as propriedades desses resíduos e a forma mais eficiente de empregá-los, considerando a qualidade do produto final, quanto ao atendimento dos critérios técnicos, e aos aspectos ambientais.

Desta forma o presente trabalho visa contribuir para o conhecimento das características das argamassas de revestimento com incorporação de RCD classe A, a partir da análise direta das suas propriedades mecânicas e das propriedades que influem na sua durabilidade, comparativamente a argamassa convencional.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização dos materiais

O cimento utilizado foi o CII-Z-32 RS (cimento Portland composto com adição de pozolana, resistente a sulfatos), especificado conforme NBR 11578 [8], devido à frequente utilização nas obras da região da Grande Natal/RN. As suas características físicas foram especificadas conforme as seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR NM 23 [9], NBR 7215[10].

A cal utilizada foi do tipo CH-I, especificada conforme NBR 7175 [11], escolhida por ter maior grau de pureza. As suas características físicas foram determinadas pelas informações dos fabricantes e conforme a NBR NM 23 [9].

Os agregados utilizados foram areia natural (AN), proveniente de rio localizado em Ielmo Marinho/RN e areia reciclada (AR) proveniente da Duarte Usina de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil Ltda, localizada em São José de Mipibu/RN. A coleta dos agregados reciclados foi realizada conforme especificação da NBR NM 26 [12] e reduzida por quartejamento, segundo NBR NM 27 [13], para a realização dos ensaios. As características físicas foram determinadas conforme normatização da ABNT: NBR NM 248 [14], NBR 6467 [15], NBR 7218 [16], NBR NM 46 [17], NBR NM 45 [18], NBR NM 52 [19] e NBR NM 30 [20]. A composição granulométrica foi realizada conforme NBR NM 248 [14]. Não foi realizado ensaio de teor de argila na areia natural por ser considerada improvável a presença de argila em areia proveniente de rio, além da análise visual. O coeficiente de uniformidade foi obtido pela razão entre os diâmetros correspondentes a passagem de 60 e 10% da areia.

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento, fornecida pela concessionária atuante em Natal/RN, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde.

A caracterização química, de todas as matérias-primas foi realizada por meio de Fluorescência de raios X (FRX).

2.2. Confecção das argamassas

Para a avaliação das argamassas com incorporação de agregado reciclado foram utilizadas substituições ao agregado natural de 0, 25, 50, 75 e 100% (100AN, 25AR, 50AR, 75AR e 100AR, respectivamente), em massa, pela areia reciclada.

As argamassas foram confeccionadas observando o traço usual para utilização em revestimentos de 1:1:6, em volume, posteriormente transformados em massa. A determinação da quantidade de água foi baseada no espalhamento requerido pela NBR 13276 [21] de 260mm, na determinação do índice de consistência, para isso foram feitas 4 adições de água e determinado seu espalhamento a cada adição. A partir dos dados obtidos foi possível traçar o gráfico, que relaciona o espalhamento *versus* o consumo de água/materiais secos e obter a quantidade de água necessária para cada traço. Na confecção das argamassas foi adotado um período de maturação da argamassa de cal de 24 h, conforme recomendado pela NBR 13276 [21], para argamassas mistas de cimento e cal hidratada.

2.3. Propriedades das argamassas no estado fresco

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram determinados conforme prescrições de NBR 13278 [22] e seus resultados foram obtidos a partir da média de duas determinações.

2.4. Propriedades das argamassas no estado endurecido

Corpos de prova prismáticos, medindo 40x40x160mm, foram utilizados para análise da argamassa no estado endurecido. Depois de moldados os corpos de prova permaneceram nos moldes por 48 horas (NBR 13279 [23]). Após esse período foram desmoldados, e a cura foi realizada ao ar livre durante 28 dias. A partir do 2º até o 28º dia foram realizadas pesagens para a determinação da variação de massa (dm/dt), seguindo procedimentos do CSTB [24].

A densidade de massa no estado endurecido foi calculada dividindo-se a massa dos corpos de prova pelos seus respectivos volumes e seu valor obtido a partir da média de 4 determinações.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão foram realizados conforme prescrições da NBR 15259 [25] e NBR 9778 [26], respectivamente, e seus valores de índice de vazios, massa específica e absorção foram obtidos pela média de 4 determinações para cada composição. Os tempos adotados para o ensaio de absorção por capilaridade foram 0, 10, 30, 60, 90, 150, 210, 270, 330, 1440 minutos.

O valor médio do módulo de elasticidade dinâmico foi determinado conforme NBR 15630 [27] a partir de 4 corpos de prova, os quais foram utilizados para os ensaios de resistência à tração na flexão e compressão aos 28 dias e 91 dias, obedecendo procedimentos

descritos na NBR 13279 [23]. Na determinação da resistência a compressão, foram utilizadas as metades resultantes do ensaio de tração na flexão. Devido à exiguidade do tempo para execução dos experimentos, não foram realizados os ensaios de compressão e tração aos 91 dias em 25AR. Será calculada a relação entre a resistência à tração e à compressão (f_t/f_c) como parâmetro adicional para verificar a deformabilidade das argamassas [28].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização física e química dos aglomerantes

Os resultados referentes à caracterização física e química dos aglomerantes são apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4

Tabela 1 - Caracterização física e mecânica do cimento -CPII-Z-RS

Propriedade		Norma	Resultado
Massa específica		NBR NM 23/01	3,15 g/cm ³
Resistência à compressão	7 dias	NBR 7215/97	16,5 MPa
Resistência à compressão	28 dias		24,5 MPa

Fonte: Autor

Tabela 2 - Caracterização física da cal - CH-I

Propriedade		Norma	Resultado
Massa específica		NBR NM 23/01	2,64 g/cm ³
Densidade aparente		Dados fornecidos pelo	0,5 g/cm ³
Finura(% retida acumulada)	0,600mm	fabricante - Mineração Ouro Branco	0%
	0,075mm		2%

Fonte: Autor

O cimento utilizado não atingiu a resistência esperada aos 28 dias, segundo critérios da norma, entretanto optou-se por utilizar o mesmo, por representar as possíveis condições adversas encontradas em uma situação real, fora do ambiente de laboratório. A cal obteve resultados compatíveis com os requeridos pela normatização, relativo à finura.

Conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4, o cimento utilizado atendeu aos parâmetros mínimos de SO₃, MgO e CO₂ [8] e a cal atendeu aos requisitos de pureza estabelecidos pela NBR 7175 [11].

Tabela 3 - Caracterização química do cimento - CPII-Z-RS

Óxidos	Composição	Óxidos	Composição
CaO	67,67%	SrO	0,65%
SiO ₂	14,20%	ZrO ₂	0,29%
Fe ₂ O ₃	5,22%	TiO ₂	0,25%
Al ₂ O ₃	4,57%	ZnO	0,08%
SO ₃	3,44%	Rb ₂ O	0,06%
K ₂ O	2,35%	MnO	0,04%
MgO	1,15%	CuO	0,03%

Fonte: Autor

Tabela 4 - Caracterização química da cal - CH-I

Óxidos	Composição	Óxidos	Composição
CaO	97,66%	Fe ₂ O ₃	0,37%
SiO ₂	0,79%	SrO	0,15%
K ₂ O	0,48%	SO ₃	0,15%
Al ₂ O ₃	0,38%	CuO	0,02%

Fonte: Autor

3.2. Caracterização física e química dos agregados

Os resultados relativos à caracterização física dos aglomerantes são apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Caracterização física da areia natural e da areia reciclada

Propriedade	Norma	AN	AR
Módulo de finura	NBR NM 248/03	1,37	2,12
D máx (mm)	-	0,60	4,75
Coefficiente de Inchamento	NBR 6467/06	1,33	1,19
Coefficiente de Uniformidade	-	2,60	3,60
Teor de argila (%)	NBR 7218/10	-	0,18
Teor de materiais pulv. (%)	NBR NM 46/03	2,00	7,00
% finos (<0,15mm)	-	13,90	10,30
Massa unitária (kg/m ³)	NBR NM 45/06	1500	1380
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52/09	2,64	2,52
Absorção de água (%)	NBR NM 30/01	5,94	17,14

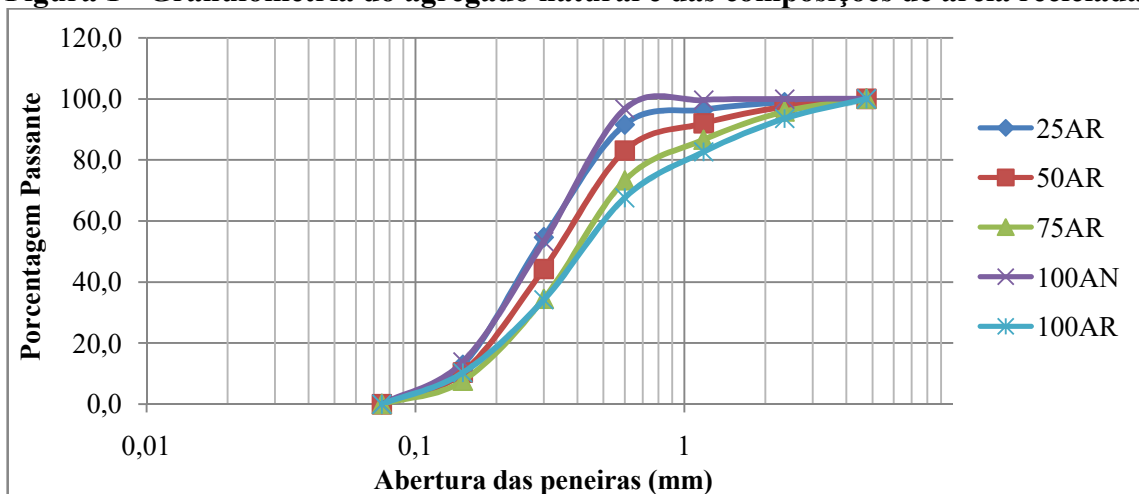
Fonte: Autor

Os valores dos módulos de finura foram coerentes, uma vez que AR possui maior diâmetro máximo. Através desses dados é possível classificar AN como areia fina e AR como areia média, conforme NBR 7211 [29]. O coeficiente de inchamento de AR apresentou menores valores e a absorção da AR foi 2,8 vezes maior do que a AN. A areia reciclada se mostrou ser um material mais leve, de acordo com os resultados de massa específica e massa

unitária, em comparação com a areia natural. Aguiar [30] explica que a baixa massa específica da AR, indica sua alta absorção e, conseqüentemente, justifica o fato das argamassas produzidas com estes agregados apresentarem maior porosidade.

Outro parâmetro para melhor avaliar as curvas de distribuição granulométrica das areias (Figura 1) é o coeficiente de uniformidade, oriundo da mecânica dos solos, definido pela relação entre diâmetro correspondente a 60% e 10% passante nas peneiras. Quando esse coeficiente é menor que 5 tem-se que o material apresenta uma granulometria uniforme, e menos uniforme quando superior a 15 [28]. As areias são, portanto, classificadas quanto ao seu comportamento granulométrico como sendo muito uniformes. Entretanto, a incorporação de AR provocou um leve aumento do coeficiente de uniformidade e, conseqüentemente, estas areias apresentam melhor distribuição dos grãos.

Figura 1 - Granulometria do agregado natural e das composições de areia reciclada



Fonte: Autor

Outro aspecto importante é a quantidade de finos presentes (fração inferior a 0,15mm), que influenciará no consumo de água da mistura. Observa-se, então, que ambas as areias apresentaram elevado teor de finos, especialmente AN, porém a AR destaca-se em função de sua maior área superficial e com isso, absorve maior quantidade de água.

A Tabela 6 apresenta a composição química da areia natural e da areia reciclada. Como esperado AN apresentou alta porcentagem de sílica, evidenciando sua natureza quartzosa. Os agregados reciclados apresentaram uma variedade maior de componentes químicos, em função da variabilidade dos materiais que os originaram, destacando o elevado teor de óxido de cálcio que se deve a presença de compostos cimentícios hidratados. Já a presença dos óxidos de ferro e de alumínio deve-se aos a presença de produtos cerâmicos [7].

Tabela 6 - Caracterização química da areia natural e da areia reciclada

Óxidos	A.N	A.R
SiO ₂	92,43%	40,40%
CaO	1,02%	29,80%
Al ₂ O ₃	2,29%	10,18%
Fe ₂ O ₃	1,32%	8,90%
TiO ₂	1,17%	0,96%
SO ₃	0,41%	5,10%
K ₂ O	0,19%	1,60%
SrO	-	1,20%
MgO	-	0,77%
Outros	1,17%	1,09%

Fonte: Autor

3.3. Propriedades das argamassas no estado fresco

3.3.1. Consumo de água

Tabela 7 - Relação água/cimento

Composição	100AN	25AR	50AR	75AR	100AR
Relação a/c	1,36	1,39	1,50	1,54	1,63

Fonte: Autor

Conforme mostrado na Tabela 7, a incorporação de AR provocou um aumento crescente na relação a/c das argamassas, devido à alta taxa de absorção do agregado reciclado, conforme também observado por outros autores [31], [32].

3.3.2. Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados obtidos para densidade de massa e teor de ar incorporado estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades das argamassas no estado fresco

Propriedade	100AN	25AR	50AR	75AR	100AR
Densidade de massa (kg/m ³)	2041,32	2014,62	2008,29	2022,58	2027,35
Teor de Ar incorporado (%)	5,44	5,70	4,23	2,57	0,84

Fonte: Autor

As composições 25AR e 50AR apresentaram valores decrescentes para a densidade de massa, sendo inferiores a argamassa de referência 100AN. Esse fato pode ser justificado

devido à menor massa específica do agregado reciclado em comparação ao agregado natural. As composições 75AR e 100AR apresentaram valores inferiores à argamassa de referência, porém com a tendência de crescimento. Tal fato pode ser justificado pelo empacotamento dos grãos, já que apresentam uma melhor distribuição granulométrica.

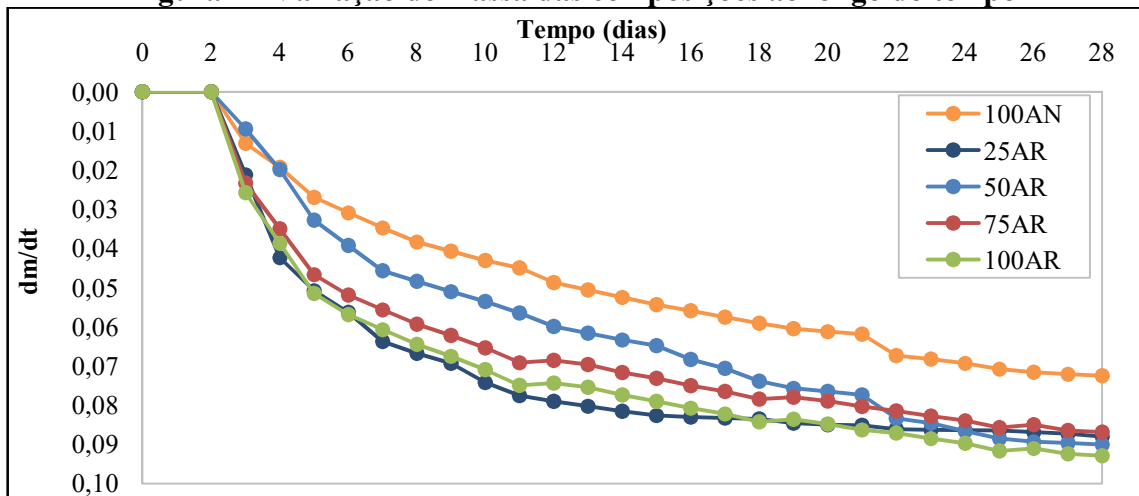
O teor de ar incorporado apresentou diminuição nas composições 50AR, 75AR e 100AR, sendo 100AR bem inferior à argamassa de referência, cerca de 6,5 vezes menor, interferindo negativamente na trabalhabilidade. Esse resultado decorre de um melhor preenchimento dos vazios em função da melhor graduação das composições e da quebra de partículas friáveis durante a mistura, o que aumenta a quantidade de partículas finas e conseqüentemente diminui a quantidade de macroporos ($>1\mu\text{m}$) e diminui o volume de ar incorporado [33].

3.4. Propriedades das argamassas no estado endurecido

3.4.1. Taxa de variação de massa

O comportamento das argamassas, relativo à variação de massa ao longo do tempo, está mostrado na Figura 2. Todas as composições de AR apresentaram valores de perda de massa superiores à argamassa de referência a qual apresentou menor variação, seguida por 75AR.

Figura 2 - Variação de massa das composições ao longo do tempo



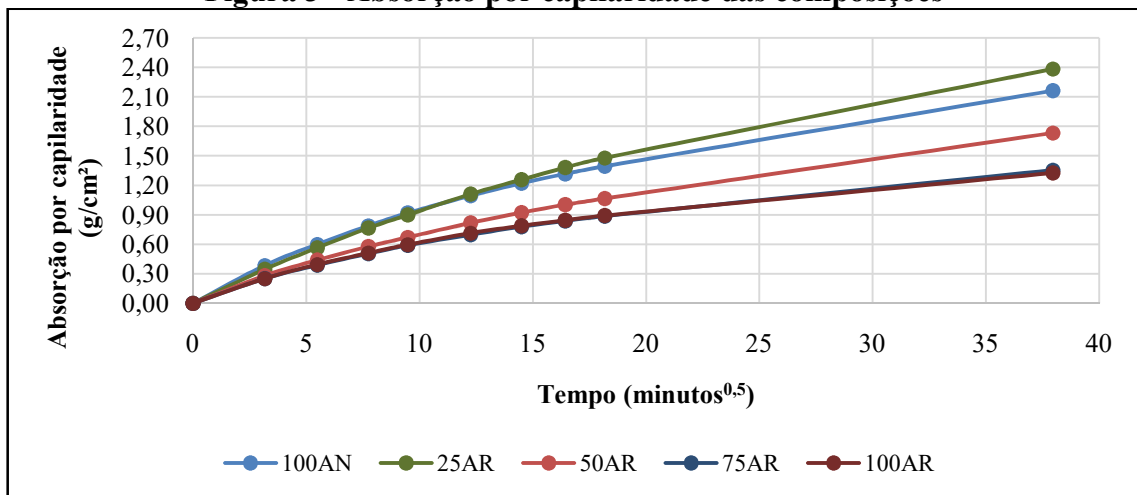
Fonte: Autor

A perda de massa está relacionada com uma maior perda de água por evaporação [28]. Segundo os resultados obtidos na caracterização dos agregados, AN possui maior quantidade de finos, influenciando na retenção de água, o que justifica os resultados de variação de massa. Essa característica tem implicação negativa na durabilidade da argamassa uma vez que propicia o aparecimento de fissuras devido à retração.

3.4.2. Absorção por capilaridade e absorção por imersão

Observa-se na Figura 3 que as argamassas apresentaram uma maior absorção nas primeiras idades e com o passar do tempo tende a se estabilizar. Tem-se, então, que o período crítico ocorre nas primeiras idades e o parâmetro que caracteriza esse comportamento é o coeficiente de capilaridade.

Figura 3 - Absorção por capilaridade das composições



Fonte: Autor

As argamassas obtiveram coeficientes de capilaridade semelhante, sendo 0% (8,50 g/dm².min^{1/2}), 25% (8,88 g/dm².min^{1/2}), 50% (6,27 g/dm².min^{1/2}) e 75% (5,45 g/dm².min^{1/2}) 100% (5,533 g/dm².min^{1/2}). Dessa forma, observa-se que a incorporação de AR resultou na diminuição da absorção por capilaridade, contrariando diversos estudos sobre o tema [34], [35]

Os bons resultados obtidos podem ser justificados pelo fato da presença dos finos que possuem a capacidade de preencher os vazios entre as partículas maiores e isso favorece a diminuição de permeabilidade das argamassas [31], bem como as reações pozolânicas entre AR e o cimento, o que resulta em uma matriz de cimento com diâmetro médio de poros

menor. Além disso, a fração mais fina de AR pode promover uma adesão superior entre o ligante e AR, o que limita a porosidade capilar [36].

Na Tabela 9 a seguir, observa-se os resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massas específicas. A absorção por imersão (A) apresentou valores crescentes com o aumento da porcentagem e AR na mistura, exceto para 75AR que apresentou o segundo menor teor de absorção. A mesma lógica foi seguida pelos resultados de índice de vazios (I_v). A massa específica seca (ρ_s), a massa específica saturada (ρ_{sat}) e a massa específica real (ρ_r), apresentaram valores decrescentes com o aumento da composição de AR, exceto 75AR e 100AR, que ainda assim, mostraram resultados menores do que a argamassa de referência.

Tabela 9 - Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica das composições

Composição	A(%)	I_v(%)	ρ_s(g/cm³)	ρ_{sat}(g/cm³)	ρ_r(g/cm³)
100AN	14,567	26,742	1,836	2,103	2,506
25AR	16,071	28,608	1,780	2,066	2,494
50AR	16,428	28,889	1,759	2,047	2,473
75AR	15,387	27,272	1,772	2,045	2,437
100AR	17,266	29,988	1,737	2,037	2,481

Fonte: Autor

As argamassas com AR apresentaram valores de absorção por capilaridade inferiores ao da argamassa de referência, porém a absorvidade por imersão seguiu o caminho inverso, o que leva a conclusão de que os vazios presentes na argamassa de referência estão mais conectados, favorecendo a capilaridade.

3.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 10, em comparação a argamassa produzida com AN, a incorporação do AR provocou diminuição do módulo de elasticidade dinâmica, o que era esperado em função da maior porosidade e menor rigidez da AR [32]. Esta característica é apreciada, uma vez que elevados valores de módulo de elasticidade contribuem para o desempenho insatisfatório da argamassa de revestimento [37], especialmente em termos de resistência de aderência [38].

Tabela 10 - Módulo de elasticidade dinâmico

Composição	100AN	25AR	50AR	75AR	100AR
E_d (GPa)	12,44	11,93	8,59	9,57	10,33

Fonte: Autor

3.4.4. Resistência à compressão e à tração na flexão

De acordo com a Tabela 11, a resistência à compressão (f_c) aos 28 dias de 100AR foi 10,3% maior do que 100AN, enquanto que na resistência à tração na flexão (f_t), na mesma idade, o maior valor apresentado foi de 25AR, com valor 14,5% superior. Aos 91 dias de idade, a argamassa com 75% de AR apresentou um ganho percentual de resistência à compressão, superior em comparação com os demais de 44,6%, porém em valores absolutos 100AR apresentou maior resistência na ordem de 10,52MPa. Já a argamassa 50AR teve maior ganho percentual relativo a resistência à tração na ordem de 75,7%, aos 91 dias, contudo ainda foi a menor resistência apresentada em comparação com as outras composições.

Tabela 11 - Densidade de massa e resistência mecânica das composições

Composição	Densidade de massa (kg/m ³)	28 dias			91 dias		
		f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_t/f_c	f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_t/f_c
100AN	1860,50	1,93	7,01	0,28	2,95	9,11	0,32
25AR	1817,76	2,21	6,82	0,32	-	-	-
50AR	1791,13	1,44	5,67	0,25	2,53	8,17	0,31
75AR	1804,50	1,69	6,84	0,25	2,82	9,89	0,28
100AR	1804,09	1,75	7,73	0,23	2,61	10,52	0,25

Fonte: Autor

As argamassas com incorporação de areia reciclada apresentaram bom desempenho mecânico uma vez que o menor resultado relativo à resistência à compressão aos 28 dias alcançou 80% da resistência da argamassa de referência, já aos 91 dias esse percentual alcançou 89,7%. Algumas composições de AR mostraram resistência maior à compressão mesmo tendo uma relação a/c maior, o que pode indicar uma atividade química do agregado apesar de não ter sido comprovada a sua pozolanicidade. Em relação aos esforços de tração o menor valor obtido aos 28 e 91 dias alcançou, respectivamente, 74,6% e 85,8% da resistência obtida por 100AN.

Ao contrário dos resultados obtidos na maioria dos estudos relacionados ao tema desta pesquisa, o aumento do teor de AR conduz à diminuição dos esforços mecânicos de argamassas e concretos. Silva, Brito e Dhir [32] comentam em seus estudos que há vários efeitos sobrepostos que podem levar a esse ganho de resistência, como: (i) A maior área superficial do AR que permite uma superfície mais irregular e porosa e, conseqüentemente, a zona de transição entre a matriz e o agregado é melhorada; (ii) Os finos do AR proporcionam um efeito de micro enchimento, aumentando, deste modo à resistência à compressão das

misturas resultantes; (iii) Além disso, é possível que a reação química proporcionada pelas partículas não hidratadas de cimento existentes no AR ou as reações pozolânicas entre o alto teor de alumina, a sílica e o conteúdo de hidróxido de cálcio do cimento hidratado presentes na AR.

Com dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e a tração, é possível obter a relação f_t/f_c , que é um indicativo da fragilidade, ou da capacidade de deformação das argamassas. Quanto mais distante de 1 for essa relação, mais frágil será a argamassa [28]. A relação f_t/f_c , ao contrário das expectativas, aumentou com o tempo, devido a um maior percentual de acréscimo da resistência à tração em relação à compressão em todas as composições, indicando um aumento na capacidade de deformação e atestando os resultados obtidos no módulo de elasticidade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das características dos materiais e das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, conclui-se:

- As argamassas produzidas com AR, em substituição parcial e total, tiveram desempenho superior em relação à capacidade de absorver deformações, em comparação com a argamassa convencional 100AN. Quanto ao desempenho mecânico, a utilização do agregado reciclado apresentou valores satisfatórios.
- Referente às características que influem na durabilidade, os resultados de absorção por imersão e por capilaridade, que caracterizam a argamassa quanto à permeabilidade, se apresentaram de forma divergente em relação ao aumento percentual de AR, não sendo possível concluir em parâmetros gerais qual foi o melhor desempenho. Em relação à propriedade de variação de massa, as argamassas com incorporação de AR tiveram desempenho inferior. Para uma melhor análise da durabilidade, recomenda-se a realização de ensaios mais específicos.

5. REFERÊNCIAS

- [1] BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Literature review: reuse of construction and demolition waste in the construction industry.** Cerâmica, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 178-189, jun. 2015.
- [2] CBCS, Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Materiais, Componentes e a Construção Sustentável.** 2009. Disponível em:<http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CT Materiais_Po sicionamento_Materiais%20componentes.pdf> Acesso em: 23/09/2016.
- [3] Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres. 2016. **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions.** Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. Disponível em: <http://cdiac.ornl.gov/CO2_Emission/timeseries/national>Acessoem: 24/09/2016
- [4] SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. **Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- [5] MENEGUINI, E. C. A. **Comportamento de argamassas com emprego de pó de borracha.** Campinas, SP: [s.n.], 2003. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.
- [6] LOPEZ, D. A. R; AZEVEDO, C. A. P. de; BARBOSA NETO, E. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino.** Cerâmica, São Paulo, v. 51, n. 320, p. 318-324, Dec. 2005.
- [7] ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos.** São Paulo, 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578- Cimento Portland composto - Especificação.** Rio de Janeiro, 1997.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23 - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175 - Cal hidratada para argamassas - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2003.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem.** Rio de Janeiro, 2009.

- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27 - Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro, 2001.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467 - Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2009.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218 - Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro, 2010.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2006.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.
- [24] CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT - CSTB. **Certifications des enduits monocouches d'imperméabilisation** - Modalités d'essais. Livrasion 341, cahier 2669-4, juillet-août 1993, 7p.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 2009.
- [28] CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- [30] AGUIAR, G. **Estudo de argamassas produzidas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. 2004. 282p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [31] JIMÉNEZ, J. R. *et al.* **Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing**. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 679-690, 2013.
- [32] SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. **Performance of cementitious renderings and masonry mortars containin greycled aggregates from construction anddemolition wastes**. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 400-415, 2016.
- [33] CORINALDESI, V. **Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings**. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 778-784, 2012.
- [34] MARTÍNEZ, Iván *et al.* **A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars**. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 384-392, 2013.
- [35] MARTÍNEZ, P. Saiz *et al.* **Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication**. *Journal of Cleaner Production*, v. 118, p. 162-169, 2016.
- [36] SAMIEI, Reza Raeis *et al.* **Properties of cement–lime mortars vs. Cement mortars containing recycled concrete aggregates**. *Construction and Building Materials*, v. 84, p. 84-94, 2015.
- [37] LEITE, M. B. *et al.* **Utilização de agregado reciclado de concreto para produção de argamassa**. IN: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...** Salvador: ENTAC, 2000.
- [38] CORINALDESI, Valeria. **Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars**. *Cementand Concrete Composites*, v. 31, n. 7, p. 505-510, 2009.