

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS
NAS PROPRIEDADES DE MICROCONCRETOS COM RELAÇÃO
ÁGUA/CIMENTO E TRABALHABILIDADE ESTABELECIDAS COM AUXÍLIO
DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE**

Autor: Gilberto Alves da Silva Neto
Orientadora: Profa. Dra. Adriana Guerra Gumieri
Coorientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Belo Horizonte, MG

2019

Gilberto Alves da Silva Neto

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS
NAS PROPRIEDADES DE MICROCONCRETOS COM RELAÇÃO
ÁGUA/CIMENTO E TRABALHABILIDADE ESTABELECIDAS COM AUXÍLIO
DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Guerra Gumieri

Coorientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Belo Horizonte, MG
Escola de Engenharia da UFMG

2019

S586i	<p>Silva Neto, Gilberto Alves da.</p> <p>Influência de diferentes agregados miúdos reciclados nas propriedades de microconcretos com relação água/cimento e trabalhabilidade estabelecidas com auxílio de aditivo superplastificante [recurso eletrônico] / Gilberto Alves da Silva Neto. – 2019.</p> <p>1 recurso online (xiii,64 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Adriana Guerra Gumieri. Coorientador: White José dos Santos.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 63-64.</p> <p>Bibliografia: f. 55-62. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Agregados (Materiais de construção) - Teses. 3. Cimento – Aditivos - Teses. I. Gumieri, Adriana Guerra. II. Santos, White José dos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691(043)</p>
-------	---

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

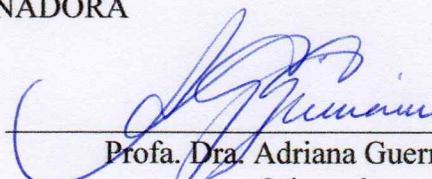
GILBERTO ALVES DA SILVA NETO

"INFLUÊNCIA DE DIFERENTES AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS NAS PROPRIEDADES DE MICROCONCRETOS COM RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO E TRABALHABILIDADE ESTABELECIDAS COM AUXÍLIO DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE"

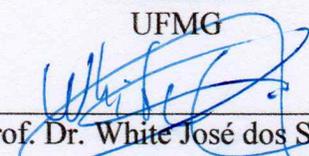
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 04 de julho de 2019

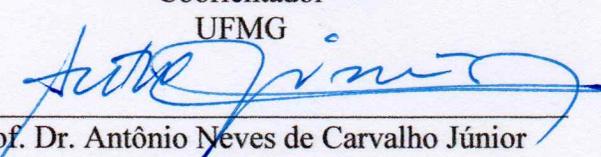
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Adriana Guerra Gumieri
Orientadora
UFMG



Prof. Dr. White José dos Santos
Coorientador
UFMG



Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
UFMG



Prof. Dr. Péter Ludvig
CEFET/MG

Dedico este trabalho aos meus pais,
por me ensinarem dentre outros
valores, o da Educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me acompanhar em cada fase de minha vida, me mostrando a cada dia que sou capaz do que outrora eu duvidava.

Aos meus pais, Roberto e Vitória, que nunca mediram esforços para investir quando se almeja um crescimento profissional, fazendo-me sempre crer na importância da busca pelo conhecimento e sonhando comigo os meus sonhos.

Aos meus irmãos, Raphael, Roberta e Rebeca, que mesmo de longe estavam sempre presentes, seja pela preocupação ou nas memórias de saudade.

À minha orientadora Profa. Dra. Adriana Guerra Gumieri e ao meu coorientador Prof. Dr. White José dos Santos por todo suporte dado durante esse período, sempre disponíveis quando solicitados. Bem como, pela confiança depositada em mim ao aceitarem me orientar nesta pesquisa.

Aos técnicos Ricardo e Ederson (Laboratórios de Concreto), Ricardo (Laboratório de Tecnologia de Rochas), Alberto (Laboratório de Tratamento de Minérios), Heron e Prof. Dr. Rodrigo Caldas (Laboratório de Análises Experimental de Estruturas – LAEES) da Escola de Engenharia da UFMG, que sempre se mostraram solícitos quando necessário. E aos alunos que me auxiliaram nas atividades realizadas em laboratório: Dyala, Juliano e Kaique.

RESUMO

A grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD), juntamente ao fato da construção civil ser a maior consumidora de recursos naturais não renováveis, têm impactado negativamente o meio ambiente. Uma possível solução é, portanto, a reciclagem do RCD. Contudo, algumas características dos agregados reciclados (ARs), podem comprometer as propriedades dos compósitos cimentícios nos estados fresco e endurecido. Assim, a combinação de efeitos dos ARs e dos aditivos redutores de água é vista como favorável para a produção de compósitos cimentícios reciclados. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tipo de resíduo de construção (cerâmico, argamassa ou concreto) utilizado como substituição parcial do agregado miúdo natural (AMN) para uma condição de trabalhabilidade constante obtida com auxílio de aditivo superplastificante. Foram moldados microconcretos, utilizando cimento CP V-ARI, aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, e substituição parcial do AMN por diferentes agregados miúdos reciclados (AMRs). A relação a/c e o teor de aditivo foram variados para cada tipo de AMR, considerando a consistência limite de 250 ± 15 mm. Avaliou-se o comportamento mecânico (resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico) e a durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, e resistividade elétrico-volumétrica) dos microconcretos. As características físicas dos AMRs foram diversas, mas no geral, constatou-se uma curva granulométrica de distribuição contínua, promovendo um melhor empacotamento dos constituintes na mistura dos microconcretos, e que juntamente com a redução da relação água/cimento efetiva na pasta, devido à maior absorção dos agregados reciclados, resultou no aumento da resistência à compressão e na redução da absorção de água dos microconcretos. Consequentemente, houve um aumento da resistividade elétrica dos microconcretos para a combinação do AMN com AMRs. Em relação ao efeito do aditivo superplastificante, em geral, observou-se que o mesmo ou não alterou ou melhorou as propriedades avaliadas do microconcretos.

Palavras-chave: Resíduos de construção civil. Agregados miúdos reciclados. Aditivo superplastificante. Microconcretos.

ABSTRACT

The large amount of construction and demolition waste (CDW), coupled with the fact that construction is the largest consumer of non-renewable natural resources, has negatively affected the environment. Therefore, a possible solution is to recycle the CDW. However, some characteristics of the recycled aggregates (RAs) may harm the properties of the cementitious composites in the fresh and hardened states. Thus, the combination of the effects of RAs and water reducing admixture is seen as favorable for the production of recycled cementitious composites. The aim of this work is to evaluate the influence of the type of construction waste (ceramic, mortar or concrete) used as partial replacement of the fine natural aggregate (FNA) for a condition of constant workability, obtained with the aid of superplasticizer additive. Microconcretes were casting using the Brazilian Portland cement CP V-ARI, polycarboxylates-based superplasticizer, and partial replacement of FNA by different fine recycled aggregates (FRAs). The w/c ratio and the superplasticizer content were varied for each type of FRA, considering the limit consistency of 250 ± 15 mm. The mechanical behavior (axial compression strength and dynamic modulus of elasticity) and durability (water absorption by immersion and by capillarity, and electrical-volumetric resistivity) of microconcretes were evaluated. The physical characteristics of the FRAs were diverse, but in general, a continuous particle-size distribution curve was obtained, promoting a better packaging of the constituents in the microconcrete mixture. Together with the reduction of the effective w/c ratio in the paste, due to the higher water absorption of RAs, the microconcretes showed out an increased compressive strength and a reduced water absorption. Consequently, there was an increase in the electrical resistivity of microconcretes for the combination of FNA and FRAs. In relation to the effect of the superplasticizer in the mixtures, in general, it did not alter or improved the evaluated microconcretes properties.

Keywords: Civil construction wastes. Fine recycled aggregate. Superplasticizer. Microconcretes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do programa experimental.	21
Figura 2 – Equipamentos utilizados no beneficiamento dos resíduos: (a) britador de mandíbula (b) moinho de rolos (c) peneira (# 4,8 mm) com agitador elétrico.	24
Figura 3 – Esquema da sequência de mistura da NBR 7215.	25
Figura 4 – Equipamento e montagem do ensaio de módulo de elasticidade.	30
Figura 5 – Ensaio de resistividade elétrico-volumétrica.	32
Figura 6 – Imagens de microscopia óptica digital dos grãos de dimensão 4,8mm dos agregados utilizados na pesquisa.	34
Figura 7 – Curvas granulométricas referentes ao AMR-1.	35
Figura 8 – Curvas granulométricas referentes ao AMR-2.	36
Figura 9 – Curvas granulométricas referentes ao AMR-3.	36
Figura 10 – Imagens de microscopia óptica digital da visão geral das diferentes frações granulométricas dos agregados utilizados na pesquisa.	37
Figura 11 – Consistência dos diferentes microconcretos.	39
Figura 12 – Absorção de água por imersão (A_i) e índice de vazios (I_v) dos microconcretos.	40
Figura 13 – Curva da absorção de água por capilaridade x tempo, dos microconcretos.	42
Figura 14 – Estrutura porosa dos microconcretos.	44
Figura 15 - Seções dos corpos de prova de microconcretos avaliadas quanto à porosidade.	45
Figura 16 – Resistência à compressão média (f_c) e relativa dos microconcretos.	47
Figura 17 – Módulo de elasticidade dinâmica médio (E_d) e relativo dos microconcretos.	49
Figura 18 – Resistividade elétrico-volumétrica média (ρ) e relativa dos microconcretos.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas de diferentes agregados miúdos reciclados	6
Tabela 2 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V – ARI.22	
Tabela 3 – Detalhamento das misturas produzidas	26
Tabela 4 – Resumo dos ensaios realizados na pesquisa	27
Tabela 5 – Propriedades físicas dos agregados miúdos utilizados.....	33
Tabela 6 – Propriedades granulométricas dos agregados miúdos utilizados	35
Tabela 7 – Resultados médios da absorção de água por imersão (A_i), índice de vazios (I_v) e massa específica real (γ_r) dos microconcretos	40
Tabela 8 – Levantamento semi-quantitativa da estrutura porosa dos microconcretos	43
Tabela 9 – Resultados médios da resistência à compressão axial (f_c) dos microconcretos.....	47
Tabela 10 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) dos microconcretos.....	49
Tabela 11 – Resultados médios da resistividade elétrico-volumétrica (ρ) dos microconcretos.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMN – Agregado Miúdo Natural

AMR – Agregado Miúdo Reciclado

AR – Agregado Reciclado

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

DMC – Dimensão Máxima Característica

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux e les Constructions*

RSA – Resíduo Sem Aditivo

RCA – Resíduo Com Aditivo

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – massa do corpo de prova em contato com a água, num determinado instante
- A_i – absorção de água por imersão
- B – massa do corpo de prova seco
- C – absorção de água por capilaridade
- CO₂ – gás carbônico
- Ca(OH)₂ – hidróxido de cálcio
- D – diâmetro médio do corpo de prova
- Ed = módulo de elasticidade dinâmico
- F – força máxima alcançada
- f_c – resistência à compressão
- f_{ck} – resistência característica à compressão
- I – corrente elétrica
- I_v – índice de vazios
- L – comprimento do corpo de prova
- m_{sat} – massa do corpo de prova saturado após imersão e fervura
- m_s – massa do corpo de prova seco em estufa
- m_i – massa do corpo de prova imerso em água após fervura (balança hidrostática)
- R – resistência elétrica
- S – área da seção transversal do corpo de prova
- V – diferença de potencial
- \emptyset – diâmetro
- μ – micro
- ρ – resistividade elétrica
- $\rho_{\text{água}}$ – massa específica da água
- ρ_v – massa específica real do corpo de prova
- Ω – ohm
- π – pi
- F – frequência do modo fundamental da vibração longitudinal;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
3	MICROCONCRETOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO	5
3.1	Propriedades dos Agregados Miúdos Reciclados	5
3.1.1	<i>Composição granulométrica</i>	6
3.1.2	<i>Teor de finos</i>	7
3.1.3	<i>Absorção de água</i>	9
3.2	Propriedades dos Microconcretos Reciclados	11
3.2.1	<i>Consistência</i>	11
3.2.2	<i>Propriedade mecânicas</i>	12
a)	Resistência à compressão	13
b)	Módulo de elasticidade dinâmico	15
3.2.3	<i>Parâmetros de durabilidade</i>	17
a)	Absorção de água	17
b)	Resistividade elétrica	19
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	21
4.1	Materiais	22
4.1.1	<i>Cimento Portland</i>	22
4.1.2	<i>Agregados miúdos</i>	22
4.1.3	<i>Água e aditivo</i>	24
4.2	Produção dos Microconcretos	25
4.3	Propriedades Avaliadas	26
4.3.1	<i>Propriedades dos microconcretos no estado fresco</i>	27
4.3.2	<i>Propriedades dos microconcretos no estado endurecido</i>	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	Caracterização dos Agregados Miúdos	33

5.1.1	<i>Massa específica, absorção de água e porosidade</i>	33
5.1.2	<i>Granulometria e teor de finos</i>	35
5.2	Consistência dos Microconcretos	38
5.3	Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica dos Microconcretos	39
5.4	Absorção de Água por Capilaridade	42
5.5	Estrutura Porosa dos Microconcretos	43
5.6	Resistência à Compressão Axial	47
5.7	Módulo de Elasticidade Dinâmico	49
5.8	Resistividade Elétrico-volumétrica	50
6	CONCLUSÕES	52
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXO A – Ficha Técnica Do Aditivo Superplastificante Viscocrete 6010 SA	63

1 INTRODUÇÃO

Mundialmente tem-se lidado com a grande quantidade de resíduos de construção e demolição, cuja geração está atrelada ao crescimento populacional, ao contínuo desenvolvimento industrial, e às construções de edificações e infraestruturas (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Segundo Akhtar e Sarmah (2018) e Contreras *et al.* (2016) é gerado mundialmente e no Brasil, respectivamente, 3 bilhões de toneladas e 70 milhões de toneladas por ano. Somado a isso, tem-se que o setor da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais. A produção mundial de agregados aumentou de 21 bilhões de toneladas em 2007, para 40 bilhões de toneladas em 2014, sendo a China a maior consumidora, responsável por 38% desse total estimado (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

Em meio a esse cenário, diversos países, incluindo o Brasil, vem adotando a reciclagem desses resíduos como solução dessa problemática, porém a insuficiência de normas regulamentadoras e a falta de conhecimento tem dificultado a utilização desse material na construção civil, que poderia ser em maior escala (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). A norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004) apresenta os requisitos para os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil a serem utilizados em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

A utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição é adequada, tanto na substituição parcial quanto integral do agregado natural (GUO *et al.*, 2018). No entanto, a aplicação desses agregados reciclados produzidos está condicionada às suas características, podendo ser utilizados em rodovias, drenagem, concreto estrutural e na produção de demais tipos de concretos (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). De acordo com XIAO *et al.* (2012 *apud* Guo *et al.*, 2018), a utilização de resíduos de concreto como agregado reciclado, comparada à produção dos agregados naturais, reduz o consumo de calcário em 60% e a emissão de CO₂ de 15 a 20%. Nayana e Kavitha (2017) constataram uma redução um pouco maior da emissão de CO₂ na produção de agregados reciclados, sendo de 23 a 28%, além de uma redução no custo de produção dos agregados ao adotar-se a reciclagem de 34 a 41%.

Portanto, frente a essa crescente geração de resíduos de construção e demolição, bem como ao excessivo consumo dos recursos naturais, traz-se à comunidade científica a necessidade de se aprimorar os estudos referentes à utilização desses resíduos, de tal forma que se produzam novos compósitos cimentícios, como concretos e argamassas, que atendam cada vez mais às necessidades da construção civil. A combinação de efeitos dos agregados reciclados, seja gráudo ou miúdo, e dos aditivos redutores de água já vem sendo estudada em diversas pesquisas (BARBUDO *et al.*, 2013; GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). Porém, tais pesquisas vêm focando principalmente em resíduos provenientes de concretos, sendo necessário estudar resíduos de origens diferentes, como aqueles provenientes de argamassas mistas de revestimento e de blocos cerâmicos, por exemplo.

No que concerne à utilização de aditivos redutores de água em compósitos cimentícios reciclados, no geral, eles são utilizados para corrigir o excesso de água requerido pela mistura dada à maior capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, e assim, manter a trabalhabilidade desejada. Nos estudos com concretos reciclados, diversos são os aditivos adotados pelos pesquisadores, tais como: plastificantes a base de uma mistura de polímeros orgânicos e aditivos (BARBUDO *et al.*, 2013); superplastificantes a base de lignossulfonato (PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a); e superplastificantes de alto desempenho a base de uma combinação de policarboxilatos modificados em uma solução aquosa (BARBUDO *et al.*, 2013; ETXEBERRIA; VEGAS, 2015; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). Nos diversos estudos realizados, o teor de aditivo redutor de água foi de 1% em relação à massa de cimento (ALVES *et al.*, 2014; BARBUDO *et al.*, 2013; ETXEBERRIA; VEGAS, 2015; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a) até 1,5% (GONZALEZ; ETXEBERRIA, 2014), porém deve-se ficar sempre atento às informações fornecidas pelo fabricante do aditivo quanto ao limite máximo a ser utilizado.

Vale destacar, ainda, que pouco se tem estudado a respeito da durabilidade de compósitos cimentícios reciclados, inclusive os efeitos dos aditivos redutores de água nos indicadores de durabilidades desses materiais. Agregados reciclados estudados por Salles (2018) apresentaram maiores valores de absorção de água e

volume de vazios, e também menor resistência à abrasão. No entanto, segundo esse autor, com relação à carbonatação, os agregados reciclados apresentaram melhores resultados em relação ao agregado natural estudado. Segundo Guo *et al.* (2018), deve-se entender melhor os efeitos desses agregados quanto a durabilidade em concretos reciclados, com foco em pesquisas futuras e buscando maximizar as possibilidades de aplicação desses materiais na engenharia civil.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do tipo de resíduo de construção (cerâmico, argamassa mista ou concreto) como substituição parcial ao agregado miúdo natural para uma condição de trabalhabilidade constante com auxílio de aditivo redutor de água, em microconcretos.

Para alcançar o objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Caracterizar física e morfologicamente os resíduos de três origens distintas (cerâmico, argamassa mista e concreto) obtido após processo de cominuição;
- Analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade de microconcretos com substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduos de origens distintas;
- Avaliar a influência do aditivo redutor de água em microconcretos com três diferentes resíduos com foco em trabalhabilidade constante;
- Identificar limitações e indicações de usos destes microconcretos com resíduos a partir das legislações pertinentes.

3 MICROCONCRETOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO

Os microconcretos são argamassas cuja dosagem é criteriosamente elaborada de tal forma que se alcance a semelhança com o concreto comum. Para tanto, o conhecimento dos materiais constituintes da mistura é primordial. Os microconcretos são comumente indicados para modelos em escala reduzida (MELO; BITTENCOURT, 2011). Segundo Klein (1985 *apud* Selistre, 2000), é quando se atende às exigências granulométricas e de dosagem, que se obtém um material com propriedades semelhantes às do concreto, tais como: módulo de elasticidade longitudinal, resistência característica à tração e à compressão, retração e trabalhabilidade. Esses compósitos cimentícios tem fins estruturais e são constituídos basicamente de cimento, agregado miúdo e água, podendo ainda incorporar aditivos e/ou adições minerais à mistura, a fim de melhorar determinadas propriedades do material, tanto no estado fresco quanto endurecido (POGGIALI, 2010).

Os microconcretos podem ser utilizados na execução de argamassas armadas, para fins estruturais de pequeno porte, como é o caso de reservatórios, painéis de divisão e peitoris. De acordo com a norma NBR 11173 (ABNT, 1990), as argamassas armadas, são constituídas basicamente da argamassa e tela de aço de malha de abertura limitada, distribuída em toda seção transversal. A referida norma apresenta alguns requisitos que essa argamassa deve atender, tais como: massa específica superior a 1,80 g/cm³; absorção de água por imersão inferior a 8%; e resistência característica a compressão de no mínimo 25 MPa.

3.1 Propriedades dos Agregados Miúdos Reciclados

O presente tópico visa apresentar e discutir algumas características dos agregados miúdos reciclados (AMRs) que influenciam nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos compósitos cimentícios produzidos com esses materiais. A Tabela 1 apresenta uma síntese das características físicas de agregados miúdos reciclados de diferentes origens, utilizados em diversos estudos para a produção

de compósitos cimentícios. As análises quanto a esta tabela encontram-se nos subtópicos referentes à cada característica física em particular.

Tabela 1 – Características físicas de diferentes agregados miúdos reciclados

Autores	Alves <i>et al.</i> (2014)	Etxeberria e Vegas (2014)	Martínéz <i>et al.</i> (2016)	Evangelista e De Brito (2010)	Martínéz <i>et al.</i> (2016)	Oliveira <i>et al.</i> (2010)	Silva Neto e Leite (2018)
Material Originário	Blocos cerâmicos	Blocos cerâmicos	Material cerâmico	Concreto	Concreto	Concreto	Argamassa
Cominuição	Britador de mandíbula	Britador de impacto	-	Britador de impacto	-	Britador de mandíbula	Britador de mandíbula
Dimensão máxima característica (mm)	4,0	5,0	4,0	1,2	4,0	2,4	2,4
Módulo de finura	-	-	4,77	2,38	4,26	2,70	1,88
Massa específica (g/cm ³)	1,95	1,98	2,13	1,91	2,10	2,68	2,48
Absorção de água (%)	12,2	14,7	7,48	13,1	6,12	4,10	7,2
Partículas < 75 µm (% em massa)	-	-	4,53	-	3,91	3,50	10,9
Massa unitária (kg/m ³)	1032	-	1272	1234	1330	-	-

Fonte: Adaptado de ALVES *et al.* (2014); ETXEBERRIA; VEGAS (2014); MARTÍNEZ *et al.* (2016); EVANGELISTA; DE BRITO (2010); OLIVEIRA *et al.* (2010); SILVA NETO; LEITE (2018).

3.1.1 Composição granulométrica

A granulometria dos agregados reciclados é influenciada, dentre outros fatores, pelo tipo de britador utilizado durante o processo de beneficiamento dos resíduos (CONSTRUÇÃO, 1996 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2015). Etxeberria e Vegas (2015), por exemplo, utilizando um britador de impacto, conseguiram obter uma curva granulométrica para o AMR cerâmico, de distribuição contínua, o que é bastante favorável para o empacotamento da mistura. Mesmo o AMR apresentando dimensão máxima característica das partículas maior que a do agregado natural, os autores perceberam que no caso de substituição parcial do agregado miúdo

natural (AMN) pelo AMR, a granulometria final da combinação se tornou adequada ao uso em concretos.

A Tabela 1 permite observar o alto módulo de finura do AMR chegando até a 4,77 nos estudos de Martínéz *et al.* (2016) com resíduo cerâmico, o que configura esse material como mais grosso, tendo influência no aumento da aspereza da mistura e, portanto, perda de trabalhabilidade da mesma. Além disso, destaca-se que quanto menor o tamanho da fração de agregados reciclados produzido, tende a ser maior o teor de argamassa aderida às suas partículas de agregado natural (DE JUAN; GUTIÉRREZ, 2009) no caso de resíduos originados de concreto e de argamassa.

Outra importante influência da granulometria do agregado é na absorção de água por capilaridade dos concretos, uma vez que quanto maior o tamanho das partículas, maior a conectividade entre eles, e assim, há um aumento da capacidade de absorção por capilaridade da mistura produzida (ETXEBERRIA; VEGAS, 2015).

A granulometria e a dimensão máxima do agregado têm um importante papel tanto na trabalhabilidade quanto no custo do concreto. Isto se dá, pois, uma areia muito grossa resultará em uma mistura mais áspera e, portanto, menos trabalhável, enquanto uma areia mais fina aumentará a demanda de água e de cimento para uma determinada relação água/cimento, sendo, portanto, menos econômica. Tem-se ainda, que uma granulometria de distribuição mais contínua produz um concreto mais trabalhável e econômico (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.1.2 Teor de finos

Segundo a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003a), o teor de finos de uma amostra de agregados se trata da quantidade de partículas passantes na peneira de malha de abertura 75 μm . Tais partículas de argila e demais materiais que se dispersam por lavagem, bem como aqueles solúveis em água, são removidos do agregado durante o ensaio.

No geral, os agregados reciclados tendem a apresentar uma grande quantidade de material mais fino que 75 μm , sendo da ordem de 10,9% (Tabela 1) ou até maior.

Os baixos valores encontrados para essa propriedade nos estudos de Martínéz *et al.* (2016), tanto para o AMR de origem cerâmica quanto o de origem de concreto (4,53 e 3,91%, respectivamente), deve-se ao fato dos autores descartarem a fração de agregado menor que 63 μm , por julgarem que tal fração teria efeito negativo na produção de suas argamassas.

A grande quantidade de material pulverulento nos agregados reciclados está relacionada à maior fragilidade dos materiais que compõem os resíduos de construção e demolição (RCD), e são gerados durante o processo de britagem (OLIVEIRA; CABRAL, 2011). Os autores, ao caracterizarem seu resíduo misto de RCD, triturado em britador de mandíbula, obtiveram um teor de finos (menores que 75 μm) superior ao dobro do obtido para o agregado natural utilizado, 11,42% contra 5,58%, respectivamente. Já o AMR utilizado por Silva *et al.* (2011), cujo RCD que o originou era constituído basicamente de cerâmica e argamassa, e triturado por britador de martelo, apresentou uma quantidade de finos ainda maior, variando de 16,1% a 17,9% para diferentes amostras estudadas, chegando a ser quase quatro vezes o teor de finos da areia natural de referência (3,3%). A comparação entre esses estudos permite inferir que o teor de finos do agregado reciclado está intimamente relacionado ao processo de cominuição adotado, bem como à composição/tipologia do resíduo/material que dará origem ao agregado reciclado.

Comumente, os finos dos agregados reciclados são mais angulosos, prejudicando, assim, a trabalhabilidade e fazendo com que a mistura requeira mais água livre (ZORDAN, 2000 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2015). A perda de trabalhabilidade e a requisição de mais água na mistura para lubrificar a mesma, também está atrelada à maior superfície específica dos finos, que o torna mais adsorvente (MARTÍNEZ *et al.*, 2016; NEVILLE, 2015). Neville (2015) complementa que, dessa forma, o alto teor de materiais mais finos contribui para a diminuição da durabilidade dos concretos em relação à resistência ao desgaste por abrasão.

No entanto, o teor de finos do AMR também pode ter efeito positivo nos compósitos cimentícios, uma vez que os mesmos alteram a estrutura porosa da mistura, reduzindo assim a conectividade dos poros e contribuindo para a redução da absorção de água por capilaridade, sobretudo quando esse agregado tem uma granulometria de distribuição mais contínua (SILVA NETO; LEITE, 2018). Somado

a esse efeito, tem-se ainda, que com o preenchimento dos poros pelos materiais mais finos (efeito filler), melhora-se a coesão da mistura no estado fresco, contribuindo assim para ganhos na resistência mecânica no estado endurecido da mesma (SANTOS, 2014). Além disso, no caso específico do agregado reciclado de origem cerâmica, tem-se observado que a presença de finos desse material pode desenvolver no compósito cimentício uma atividade pozolânica que venha proporcionar ganhos de resistência mecânica à compressão nos mesmos (COLANGELO; CIOFFI, 2017; ETXEBERRIA; VEGAS, 2015; KHATIB, 2005). De acordo com Khatib (2005), esse comportamento se dá pelas reações entre a sílica e alumina presentes no material cerâmico triturado com os produtos da hidratação do cimento, como a portlandita, por exemplo.

3.1.3 Absorção de água

Os agregados reciclados, em geral, tem uma massa específica menor (Tabela 1) que dos agregados naturais, devido à maior porosidade das partículas, resultando, portanto, numa maior absorção de água (EVANGELISTA; DE BRITO, 2010; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2015; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). Dada a maior porosidade desses agregados reciclados, os mesmos têm uma maior capacidade de absorção de água se comparados aos agregados naturais. Evangelista e De Brito (2010), por exemplo, que trabalharam com AMR de concreto, observaram, em seus estudos, que a absorção de água desse agregado chega a ser 16 vezes maior que a do agregado natural. Pereira, Evangelista e De Brito (2012a), que também trabalharam com AMR de concreto, complementam ainda, que os menores valores para massa específica e massa unitária podem ser atribuídos ao maior teor de argamassa aderida às partículas dos mesmos. De acordo com De Juan e Gutiérrez (2009), o agregado reciclado de concreto é composto basicamente de dois materiais diferentes, agregado natural e argamassa aderida. Esses autores concordam com a ideia de que esse último material é o responsável pelas propriedades dos agregados reciclados, como a baixa densidade e a elevada absorção de água.

A Tabela 1 permite também correlacionar a absorção de água de diferentes materiais. No caso dos AMRs originados de tijolos cerâmicos, tem-se observado em alguns estudos, a faixa entre 12,2% (ALVES *et al.*, 2014) e 14,72% (ETXEBERRIA; VEGAS, 2015). Valores esses similares ao encontrado por Evangelista e De Brito (2010) para o AMR de resíduo concreto (13,1%). Já Martínez *et al.* (2016) obtiveram uma menor taxa de absorção de água do AMR cerâmico, no valor de 7,48%, porém constataram que o mesmo apresenta uma maior capacidade de absorção que o AMR de concreto, que obteve um valor de 6,12%. Vale frisar que na pesquisa de Martínez *et al.* (2016) descartou-se as frações do agregado reciclado maior que 4 mm e menor que 63 μm , fato esse que pode justificar o valor inferior da capacidade de absorção de água em comparação aos demais estudos. No geral, tomando por base os valores levantados na Tabela 1, constata-se que o AMR cerâmico tem uma maior capacidade de absorção de água, se comparada ao de origem de concreto e argamassa individualmente.

A norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004), referente aos requisitos para o emprego dos agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil, não traz requisitos quanto à massa específica dos agregados reciclados. No entanto, a mesma é bastante restrita quanto à capacidade de absorção de água dos mesmos, além de limitar o teor de resíduos de alvenaria. De acordo com a referida norma, a absorção de água dos agregados reciclados classe A (aqueles que podem ser usados na produção de novos concretos sem função estrutural), não pode ser maior que 7% e 12% para agregados graúdo e miúdo reciclado de concreto, respectivamente, e não pode ser maior que 12% e 17% para agregado graúdo e miúdo reciclado misto, respectivamente.

Segundo Oliveira *et al.* (2015), essa maior absorção de água dos agregados reciclados possivelmente implicará na consistência dos concretos produzidos, caso não se adote um procedimento de pré-molhagem dos agregados. Além de dificultar o controle tecnológico dos compósitos cimentícios produzidos e prejudicar a qualidade dos mesmos, a absorção de parte da água da pasta influenciará negativamente nas reações de hidratação do cimento.

3.2 Propriedades dos Microconcretos Reciclados

Neste tópico serão abordadas importantes propriedades de compósitos cimentícios, tanto no estado fresco quanto no endurecido, que vem sendo discutidas em diversas pesquisas ao redor do mundo, nas quais se avaliam a influência da substituição parcial ou integral do agregado natural pelo reciclado, de diversas origens.

3.2.1 Consistência

Os microconcretos devem dispor de uma boa trabalhabilidade, sobretudo quando estes forem utilizados em espaços reduzidos nas formas ou entre as armaduras. De acordo com Klein (1985 *apud* Selistre, 2000), recomenda-se um índice de consistência, determinado pelo ensaio da mesa de consistência, de 260 a 300 mm para microconcretos utilizados em modelos reduzidos. No entanto, nos compósitos cimentícios com agregados reciclados, observa-se que a medida que se aumenta a incorporação desse agregado, há uma maior exigência de quantidade de água para atingir a mesma consistência. Tal comportamento está, possivelmente, atrelado a presença de partículas finas (menores que 75 μm), que aumenta a superfície específica a ser molhada, juntamente com a maior porosidade desse tipo de agregado (OLIVEIRA; CABRAL, 2011; SILVA NETO; LEITE, 2018). Bravo *et al.* (2017) e Silva Neto e Leite (2018), complementam ainda que a alta capacidade de absorção de água dos agregados reciclados aumenta a aspereza da mistura e a fricção entre as partículas do agregado. Essa aspereza da mistura também é resultado da forma irregular e da superfície rugosa dessas partículas.

Os concretos com AMR tendem a apresentar uma trabalhabilidade reduzida, quando não se utilizam aditivos redutores de água, indicando, assim, que a relação água/cimento ótima deveria ser um pouco maior nesses casos (PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). Essa redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de agregados reciclados está atrelada à maior capacidade de absorção desses agregados, e pode ser compensada pela incorporação de uma água adicional à mistura através de um procedimento de pré-molhagem (GARCÍA-

GONZÁLEZ *et al.*, 2014, 2017). Alguns estudos optam por adicionar à mistura uma água extra que seria aquela quantidade absorvida pelos agregados reciclados se fossem imersos em água por 10 minutos (ALVES *et al.*, 2014; BARBUDO *et al.*, 2013; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). Com essa pré-umidificação do agregado reciclado, García-González *et al.* (2014) conseguiram melhorar a consistência da mistura à medida que o intervalo de saturação do agregado aumentava. Porém, nem sempre esses acréscimos de água compensam a perda de trabalhabilidade devido à maior aspereza das partículas dos agregados reciclados (GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017). Sendo assim, a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes se torna uma solução satisfatória.

As ações dos aditivos plastificantes vão além da melhoria da trabalhabilidade, eles ainda reduzem o volume de vazios em concretos, melhorando assim o desempenho mecânico desse material. Essa melhoria é importante ser considerada quando se usa agregados reciclados, uma vez que se compensa a necessidade de adicionar água que seria absorvida por esses agregados para se obter a mesma trabalhabilidade dos concretos convencionais (BARBUDO *et al.*, 2013).

A relação a/c tem um importante papel na determinação da qualidade dos concretos, sendo que quanto menor esta relação, maiores serão a resistência e a durabilidade desse material. Porém, uma menor relação a/c pode comprometer a moldagem, dificultando-a, o que pode ser resolvida pela utilização de aditivos redutores de água (BARBUDO *et al.*, 2013). Tem-se, ainda, de acordo com Pereira, Evangelista e De Brito (2012a) e Matias *et al.* (2014), que a eficiência dos superplastificantes na melhoria da trabalhabilidade da mistura tende a reduzir com o aumento do teor de substituição do AMN pelo AMR. Segundo Bravo *et al.* (2017), essa perda de eficiência dos aditivos superplastificantes na trabalhabilidade gera um aumento da relação água/cimento para se alcançar a trabalhabilidade desejada, reduzindo assim a resistência do concreto e aumentando sua porosidade.

3.2.2 Propriedade mecânicas

No presente tópico serão apresentadas algumas propriedades referentes ao comportamento mecânico de compósitos cimentícios que utilizaram os agregados

reciclados originados de resíduos de construção civil. Tal análise de comportamento é de suma importância, sobretudo quando se almeja aplicar esse material para fins estruturais.

a) Resistência à compressão

No geral, a substituição do agregado natural pelo reciclado causa a perda de resistência à compressão dos concretos produzidos à medida que se aumenta o teor de substituição (BARBUDO *et al.*, 2013; GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; MATIAS *et al.*, 2014; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). De acordo com Pedro, De Brito e Evangelista (2014), esse comportamento está atrelado à argamassa aderida à superfície do agregado natural, nos agregados reciclados, que é responsável, ainda, pelo aumento da absorção de água desses agregados e da perda de densidade das partículas. Além disso, devido à maior porosidade dos agregados reciclados, estes tendem a apresentar uma resistência menor se comparada aos agregados naturais. Portanto, isso também pode contribuir para a perda de resistência mecânica dos concretos produzidos com esses agregados (ALVES *et al.*, 2014; BRAVO *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2015). Bravo *et al.* (2017), ainda, atribuem o desempenho mecânico reduzido dos concretos reciclados ao aumento da relação a/c adotado para se corrigir a perda da trabalhabilidade, gerada pelas causas apresentadas no tópico anterior.

Destaca-se que a técnica de pré-molhagem ou até mesmo pré-saturação do agregado reciclado, embora seja uma alternativa viável para se corrigir a perda de trabalhabilidade das misturas (dada à elevada porosidade e capacidade de absorção de água das partículas do agregado), tende a comprometer a resistência mecânica do concreto. García-González *et al.* (2014) observaram que agregados nas condições saturados e saturados superfície seca apresentaram piores resultados para a resistência do concreto, e os autores justificam pelo alto teor de água na mistura.

Tomada por referência a pesquisa de Etxeberria e Vegas (2015) que utilizou exclusivamente o resíduo de tijolos cerâmicos como agregado miúdo na produção de concretos. Os autores obtiveram uma resistência à compressão, aos 7 dias,

similar à do concreto convencional de referência. Porém, após 28 dias de cura, esses concretos reciclados apresentaram maior resistência que o convencional, sendo obtida a maior resistência para o teor de 35% de agregado miúdo cerâmico. Diferente dos resultados obtidos por Alves *et al.* (2014), que também trabalharam com AMR originado de tijolos cerâmicos, a resistência à compressão reduziu com o aumento do teor desse agregado reciclado. Essa redução é explicada pelos autores pelo aumento da relação água/cimento efetiva, que contribuiu para a redução da resistência da pasta cimentícia do concreto ao incorporar um agregado reciclado mais poroso e, conseqüentemente, de menor resistência.

Com relação à evolução da resistência à compressão ao longo das idades do concreto, Etxeberria e Vegas (2015) observaram em seus estudos que para os concretos reciclados com teor acima de 20% do resíduo cerâmico, o ganho de resistência entre 28 dias e um ano foi maior que para o concreto convencional. Similar comportamento foi observado por Alves *et al.* (2014) que constataram que com o passar do tempo reduzia-se a diferença de resistência à compressão do concreto reciclado para o convencional, mostrando, assim, uma maior taxa de desenvolvimento de resistência no concreto reciclado com resíduo de tijolos cerâmicos. Etxeberria e Vegas (2015) atribuem esse comportamento ao efeito pozolânico desse resíduo cerâmico. Colangelo e Cioffi (2017) complementam ainda, que esses ganhos de resistências também podem ser atribuídos à alta capacidade de absorção de água dos agregados de origem cerâmica, que contribui para a redução do excesso de água da mistura.

Nos estudos de Barbudo *et al.* (2013) com concretos com agregado graúdo reciclado de concreto, os pesquisadores constataram que a resistência à compressão aumentou com o aumento da capacidade de redução de água do concreto com o uso de aditivos (plastificantes e superplastificantes), assim como foi observado por García-González *et al.* (2017) e Pereira, Evangelista e De Brito (2012a) que também trabalharam com agregado reciclado de concreto, sendo que esses últimos autores trabalharam com a substituição do agregado miúdo. Dessa forma, os aditivos superplastificantes podem aumentar a compacidade da mistura, compensando, assim, parte da perda de resistência gerada pela incorporação de agregados reciclados (MATIAS *et al.*, 2014).

No que concerne à qualidade do resíduo que dará origem ao agregado reciclado, a mesma influencia na resistência dos novos concretos produzidos. Segundo De Juan e Gutiérrez (2009), concretos de resistência acima de 25 MPa produzem agregados reciclados de boa qualidade que podem ser utilizados na produção de concretos estruturais. Kou *et al.* (2012 *apud* García-González, 2017) complementam, ainda, que quanto maior o teor de impurezas no agregado reciclado, maior será a redução da resistência à compressão dos concretos produzidos. Por isso, pode se obter resultados completamente diferentes no desempenho de concretos reciclados, ainda que o teor de agregado reciclado seja o mesmo nas misturas comparadas.

A melhoria no desempenho mecânico de concretos reciclados com a utilização de superplastificantes pôde ser constatada nos estudos de Alves *et al.* (2014), que ao usar 1% de superplastificante, em relação à massa de cimento, em concretos com substituição em 100% do AMN pelo AMR proveniente de resíduos cerâmicos de louças sanitárias, obtiveram uma melhoria na resistência à compressão e à tração por compressão diametral de 28% e 17%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Os autores atribuem à essa melhoria, a capacidade do aditivo superplastificante de evitar a aglutinação das partículas de agregado. Semelhante comportamento foi observado por Pereira, Evangelista e De Brito (2012a) que trabalharam com concretos com AMR de resíduo de concreto, e obtiveram acréscimos na resistência à compressão de 34,8%, usando aditivo superplastificante comum, e de 69,5%, com superplastificante de alto desempenho. Portanto, os ganhos de resistência aumentam com o aumento da capacidade do aditivo de reduzir a água, uma vez que se reduz a relação água/cimento da mistura (BARBUDO *et al.*, 2013; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a). No entanto, o efeito positivo do superplastificante na resistência mecânica do concreto, pode ser dificultado pela presença de agregados reciclados de baixa qualidade, sendo que isso é mais evidente quando se trabalha com RCD (misto) e menos quando se trabalha com resíduo exclusivo de concreto (BRAVO *et al.*, 2017).

b) Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo dinâmico de elasticidade consiste em uma deformação instantânea muito pequena, sendo aproximadamente o módulo tangente inicial e, geralmente, 20% a

40% mais alto que o módulo de elasticidade estático. Tal grandeza é determinada mais precisamente por ensaio ultrassônico e é importante para analisar estruturas sob ação de terremotos ou carga de impacto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Khatib (2005), a substituição do AMN por AMR cerâmico reduz o módulo de elasticidade dinâmico de concretos e essa redução é intensificada com o aumento do teor de substituição. Além disso, o autor afirma que para um mesmo teor de substituição, os concretos com AMR cerâmico apresentam maior módulo de elasticidade que os concretos com AMR de concreto. Senthamarai e Manoharan (2005 *apud* Alves *et al.*, 2014) acrescentam ainda que quanto maior a relação água/cimento da mistura menor é o módulo de elasticidade do concreto.

Colangelo e Cioffi (2017) utilizaram a velocidade de pulso ultrassônico para determinar o módulo dinâmico de elasticidade de argamassas, após 90 dias de cura, com três diferentes tipos de AMRs (originados de concreto, bloco cerâmico e misto). Os autores observaram que todas as argamassas produzidas com AMR apresentaram valores para essa propriedade mecânica menores que a da argamassa de referência com 100% de AMN (aproximadamente 39 GPa), além de notarem que os valores reduzem com o aumento do teor de AMR. Os resultados variaram de 24 GPa, para as argamassas com 100% de AMR cerâmico, até 36 GPa, para as argamassas com 30% de AMR misto. Para as argamassas com 50% de AMR cerâmico e as com 50% de AMR de concreto, o módulo dinâmico de elasticidade foi praticamente o mesmo, aproximadamente 33 GPa.

Pereira, Evangelista e De Brito (2012b), avaliaram o efeito do superplastificante no comportamento mecânico de concretos reciclados, e observaram que para o módulo de elasticidade a substituição do AMN pelo AMR gerou uma redução dessa propriedade de até 13,2% em concretos sem aditivos, 17% em concretos com superplastificante à base de lignosulfonato e 9,5% em concretos com superplastificantes à base de policarboxilatos. Além disso, constataram que para um mesmo teor de substituição, os superplastificantes promoveram aumentos no módulo de elasticidade dos concretos reciclados, de até 20,7% quando se utilizou esse aditivo à base de lignosulfonato e de até 33,0% para o aditivo à base de policarboxilatos.

3.2.3 Parâmetros de durabilidade

Em relação à durabilidade, a substituição total do AMN pelo AMR pode apresentar uma perda de desempenho para os concretos, porém para baixos teores, essa substituição é possível, podendo inclusive, utilizar esse concreto reciclado para fins estruturais (EVANGELISTA; DE BRITO, 2010). A presença de argamassa aderida ao agregado reciclado é o que mais afeta a durabilidade de concretos reciclados, uma vez que quanto mais argamassa aderida às partículas de agregado, maior será a porosidade e absorção de água dos agregados, prejudicando, assim, a durabilidade desses concretos reciclados produzidos (GUO *et al.*, 2018), corroborando com De Schutter e Audenaert (2004), que afirmam que a durabilidade de concretos está relacionada à sua estrutura porosa.

Guo *et al.* (2018) apontam, ainda, que os maiores teores de agregado reciclado e de água na mistura podem prejudicar a durabilidade do concreto reciclado, sendo que os efeitos negativos são mais expressivos quando se utiliza agregados miúdos reciclados, se comparados aos agregados graúdos reciclados. De acordo com tais autores, problemas com a durabilidade podem ser resolvidos com a utilização de adições minerais ou utilizando agregados reciclados provenientes de concretos de alta resistência. Diferente do que foi apontado por Silva *et al.* (2015), que afirma que as adições minerais, utilizadas como substitutas de parte do cimento, causam um aumento da profundidade de carbonatação, uma vez que há o consumo do Ca(OH)_2 , reduzindo seu teor na mistura e o pH do concreto.

Com o intuito de aliviar a preocupação dos consumidores em relação à durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, Tam, Soomro e Evangelista (2018) sugerem o desenvolvimento e melhoramento das normas referentes a esses agregados, além de incluir requisitos de durabilidade nas mesmas, como deformação (retração e fluência) e permeabilidade (carbonatação, penetração de ar e água, e penetração de cloreto).

a) Absorção de água

A impermeabilidade de concretos com agregados reciclados é determinada principalmente pelo teor de agregado reciclado, relação a/c, resistência do concreto que originou o agregado, idade de cura e a presença de adições minerais.

Comumente, essa propriedade é mais fraca em concretos reciclados do que nos convencionais (GUO *et al.*, 2018), dependendo, ainda, da porosidade e da conectividade dos poros do compósito cimentício, ou seja, quanto mais aberta for a estrutura porosa do concreto, mais estará predisposto a degradação devido a entrada de substâncias (DE SCHUTTER; AUDENAERT, 2004).

A absorção de água de compósitos cimentícios pode ser determinada por imersão ou por capilaridade. Porém, embora a absorção de água por imersão dê uma boa estimativa do volume total de poros no concreto, ela não é um bom parâmetro para estimar propriedades de durabilidade do concreto, como a resistência à carbonatação e à penetração de íons cloreto, já que não dispõe de uma boa indicação da permeabilidade do mesmo (DE SCHUTTER; AUDENAERT, 2004). Desse modo, a durabilidade dos compósitos cimentícios é mais dependente da absorção de água por capilaridade, sendo então mais confiável.

Quanto à absorção de água por imersão dos concretos reciclados, a mesma tende a ser aumentada com a incorporação de agregados reciclados, dada à alta absorção de água desses (GUO *et al.*, 2018; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014). Assim como foi observado nos experimentos de Evangelista e De Brito (2010), cujo concreto com fração de agregado miúdo da mistura composto 100% de AMR de concreto, aumentou essa propriedade em 46%, enquanto que com o teor de 30%, o incremento na absorção de água por imersão foi de apenas 16,8%.

De acordo com Evangelista e De Brito (2010), a presença do AMR de resíduo de concreto tem efeito mais danoso à absorção de água por capilaridade que por imersão, uma vez que este agregado proporciona uma maior quantidade de capilares e também de forma alongada, consequência dos poros de suas partículas que aumentam, assim, a tensão capilar. No entanto, segundo Silva Neto e Leite (2018), a presença de material pulverulento na composição granulométrica desses agregados pode amenizar a absorção de água por capilaridade, uma vez que, os finos tendem a preencher os vazios da matriz cimentícia, impedindo a conexão dos poros e, portanto, dificultando a formação de capilares. Porém, independente de se usar agregados reciclados graúdos ou miúdos, a absorção de água tende a aumentar linearmente com o aumento do teor de substituição do agregado natural, que é de se esperar devido à estrutura mais porosa das partículas que deixa a

matriz do concreto também mais porosa (EVANGELISTA; DE BRITO, 2010; MATIAS *et al.*, 2014). Papadakis (2000 *apud* Evangelista e De Brito, 2010) indica a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares como sílica ativa, escória de alto forno ou cinza volante, para corrigir os efeitos negativos desses AMRs na capilaridade dos compósitos cimentícios produzidos.

Nos estudos de Etxeberria e Vegas (2015), o concreto com AMR originado de tijolos cerâmicos apresentou uma maior capacidade de absorção de água por capilaridade quando comparado ao concreto com AMR misto e ao concreto convencional. Os autores apontam como provável justificativa para esse comportamento, a granulometria desses agregados, já que no AMR originado de tijolos cerâmicos houve maior presença de partículas maiores que 4,0 mm, 25% contra 14% no AMR misto e 1% no AMN. Além disso, como já foi observado na Tabela 1, o resíduo de tijolo cerâmico é bastante poroso, influenciando, assim, também na absorção de água do compósito cimentício produzido.

No que tange a ação de aditivos redutores de água nessa propriedade, Matias *et al.* (2014) concluíram em seus estudos que nem a adição de superplastificantes, nem o tipo de superplastificante (utilizaram o padrão e o de alto desempenho), para as condições de ensaios adotadas, tiveram influência na absorção de água por imersão, estando essa propriedade condicionada pela porosidade aberta do agregado reciclado. Em relação à absorção de água por capilaridade os autores observaram uma maior absorção de água dos concretos reciclados se comparado ao convencional, justificando pela presença de argamassa aderida nas partículas do agregado reciclado, que é um material poroso. Quanto a influência dos superplastificantes nessa propriedade, observou-se um acréscimo de 80% na capacidade de absorção de água por capilaridade, que os autores justificam pelo retardo das reações de hidratação do cimento gerado por esse aditivo, que tende a coagular as estruturas da pasta no estado fresco, juntamente com a conexão de uma rede de poros capilares contínuos (MATIAS *et al.*, 2014).

b) Resistividade elétrica

A resistividade elétrica pode ser obtida por um ensaio não destrutivo que disponibiliza uma boa estimativa da probabilidade de corrosão no concreto, que por

sua vez consiste em um processo eletroquímico no qual há fluxo de elétrons pelo concreto. Quanto maior a resistividade elétrica do concreto, menor será sua taxa de corrosão (SINGH; SINGH, 2016). Em relação ao risco de corrosão da armadura do concreto, segundo Gonzalez e Etxeberria (2014), um concreto de resistividade elétrica menor que 5.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ apresenta um risco muito alto, entre 5.000 e 10.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ um alto risco, entre 10.000 e 20.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ risco moderado e acima de 20.000 $\Omega \cdot \text{cm}$ baixo risco de corrosão das armaduras.

Gonzalez e Etxeberria (2014) classificaram os concretos reciclados de alto desempenho produzidos como de baixo à moderado risco de corrosão. O melhor desempenho quanto à resistividade elétrica foi no concreto com teor de 20% de agregado graúdo reciclado originado de concreto de 100 MPa (cerca de 33.000 $\Omega \cdot \text{cm}$) e o pior desempenho foi obtido no concreto com teor de 100% de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado originado de concreto de 40 MPa (cerca de 10.000 $\Omega \cdot \text{cm}$). Ou seja, a resistividade elétrica dos concretos reciclados está relacionada ao teor de substituição do agregado natural pelo reciclado e à qualidade do agregado reciclado, sendo que o aumento do risco de corrosão está atrelado ao aumento da porosidade proveniente da argamassa aderida aos agregados reciclados. Vale destacar que nesse estudo os autores utilizaram aditivos superplastificantes em todas as misturas, não avaliando, portanto, o efeito desses aditivos na resistividade elétrica dos concretos reciclados.

Já nos estudos de Singh e Singh (2016), realizados com concreto auto adensável feito com agregado graúdo reciclado de concreto, a resistividade elétrica encontrada para diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado, variou de 5.700 $\Omega \cdot \text{cm}$ até 11.200 $\Omega \cdot \text{cm}$, sendo o maior valor para o concreto referência e o menor para o concreto com 100% desse agregado reciclado. Os autores, portanto, corroboram com a afirmação de Gonzalez e Etxeberria (2014) de que a probabilidade de ocorrência de corrosão no concreto aumenta com o aumento do teor de agregado graúdo reciclado de concreto. Porém, assim como nos estudos de Gonzalez e Etxeberria (2014), Singh e Singh (2016) utilizaram o aditivo superplastificante, nesse caso a base de éter policarboxílico, em todas as misturas, para correções na trabalhabilidade, o que impede de se fazer uma análise da influência desse aditivo na resistividade elétrica do concreto.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos traçados para este presente trabalho, elaborou-se o programa experimental dividido nos seguintes tópicos:

- Materiais: apresentação dos materiais utilizados na produção dos microconcretos;
- Produção dos microconcretos: informações sobre o traço adotado, sequência de mistura, bem como as dimensões dos corpos de prova moldados;
- Propriedades avaliadas: apresentação dos ensaios realizados nos microconcretos produzidos, juntamente com as respectivas normas vigentes que determinam tais procedimentos experimentais.

O programa experimental deste presente trabalho encontra-se esquematizado no fluxograma apresentado na Figura 1.

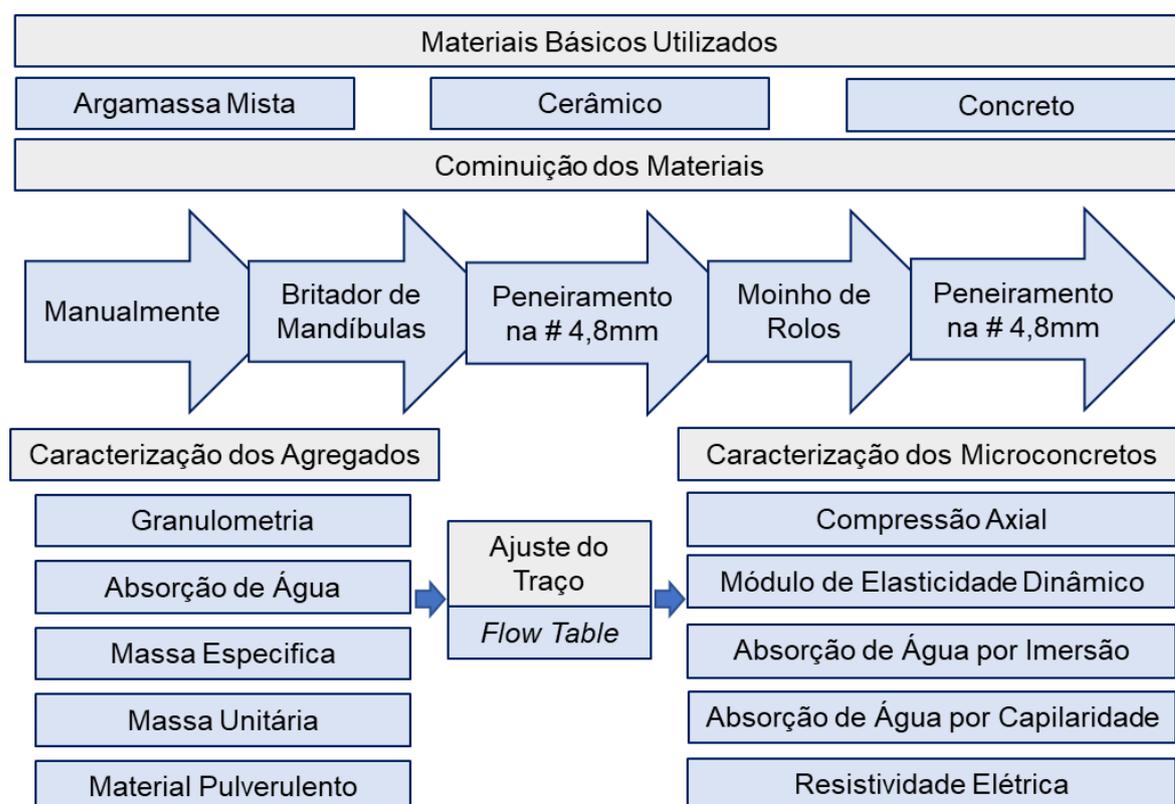


Figura 1 – Fluxograma do programa experimental.

4.1 Materiais

Apresenta-se a seguir os materiais que foram utilizados para a produção dos microconcretos, juntamente com as informações necessárias para caracterização dos mesmos.

4.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado para a produção dos microconcretos foi o CP V-ARI, por ser um cimento comumente utilizado em microconcretos. Além disso, este cimento contém baixo teor de adições, o que nos permite melhor investigar a influência dos diferentes resíduos, utilizados como agregados miúdos, no comportamento dos microconcretos produzidos. Os dados quanto às propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento Portland adotado foram provenientes da caracterização realizada pelo fabricante e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V – ARI

Ensaio	Característica	Resultados	
Físicos	<i>Blaine</i> (m ² /kg)	549,0	
	Massa Específica (g/cm ³)	3,07	
	Tempo de Pega (min)	Início	125
		Fim	160
	Teor de Água (%)	30,0	
	Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	28,2
		3 dias	40,3
		7 dias	43,7
		28 dias	53,8
	Químicos	Perda ao Fogo (%)	3,09
Resíduo Insolúvel (%)		0,71	
SO ₃ (%)		2,92	
MgO (%)		1,63	
CO ₂ (%)		1,89	

Fonte: Liz Cimentos (2018)

4.1.2 Agregados miúdos

O AMN utilizado na produção dos microconcretos foi a areia quartzosa lavada fina peneirada de dimensão máxima característica de 4,8 mm, originada em Esmeralda e Inhaúma no estado de Minas Gerais. Quanto aos AMRs, foram utilizados resíduos de três origens distintas:

- Cerâmico (AMR-1): blocos cerâmicos de vedação de dimensões 14 cm de largura, 19 cm de altura e 29 cm de comprimento, e 5,55 kg foram britados, moídos e peneirados para a produção do AMR-1;
- Argamassa (AMR-2): foram produzidos corpos de prova de argamassas mistas de cimento e cal de traço 1:0,77:5,25 (cimento:cal:areia quartzosa, em massa), pelo método de dosagem de Santos (2014), e relação água/cimento igual à 1,55, que garantiu uma consistência de 260 ± 15 mm e uma resistência média aos 28 dias de 6,0 MPa. Tais corpos de prova foram britados, moídos e peneirados para produção do AMR-2;
- Concreto (AMR-3): foram produzidos, segundo método de dosagem ABCP, corpos de prova de concreto de traço 1:1,32:2,09 (cimento:areia quatzosa:brita gnaisse, em massa) e relação a/c de 0,48, que garantiu uma resistência média aos 28 dias de 30 MPa. Após atingir essa idade, o concreto foi britado, moído e peneirado para produção do AMR-3.

O procedimento de beneficiamento do AMR foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola de Engenharia da UFMG, sendo que primeiramente foi utilizado o britador de mandíbula, seguido do moinho de rolos que foram utilizados para as frações não passantes na peneira de abertura 4,8 mm, a fim de se obter esta dimensão máxima característica das partículas. Os equipamentos utilizados encontram-se na Figura 2.

Os materiais utilizados para a produção dos agregados miúdos não foram provenientes diretamente de resíduos de canteiros de obra. Optou-se por produzir esse material para garantir a homogeneidade e o conhecimento da origem destes, além de se ter um maior controle tecnológico.

Tanto os agregados naturais quanto os reciclados passaram por procedimentos de caracterização no Laboratório de Concreto da Escola de Engenharia da UFMG, para determinação das propriedades físicas desses materiais como: composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT, 2003b)); absorção de água (NBR NM 30 (ABNT, 2001)); massa específica e massa específica aparente (NBR NM 52, (ABNT, 2009a)); massa unitária (NBR NM 45, (ABNT, 2006)); e teor de material pulverulento (NBR NM 46 (ABNT, 2003a)).

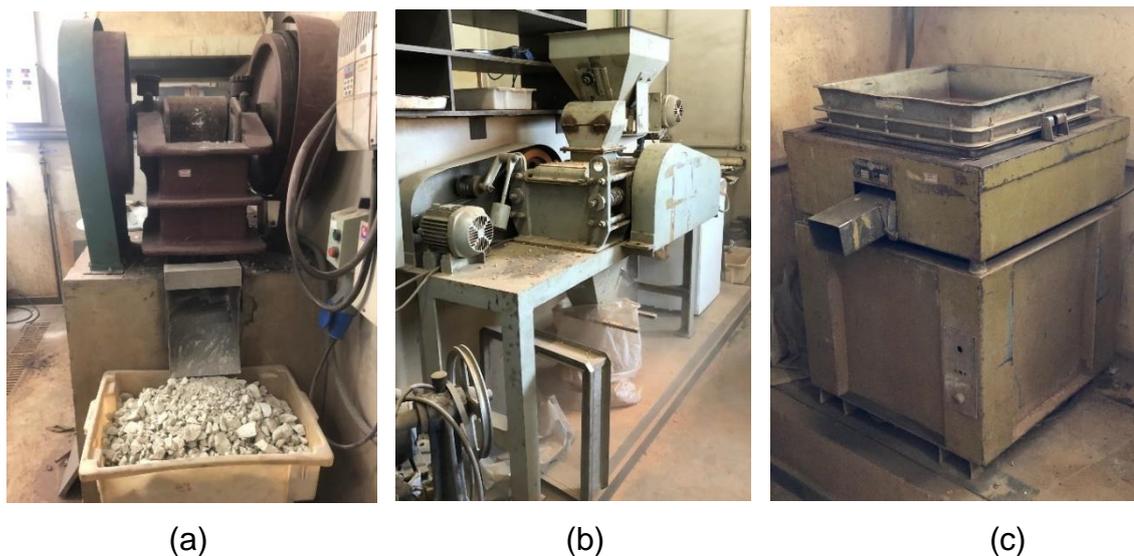


Figura 2 – Equipamentos utilizados no beneficiamento dos resíduos: (a) britador de mandíbula (b) moinho de rolos (c) peneira (# 4,8 mm) com agitador elétrico.

4.1.3 Água e aditivo

Foi utilizada a água potável proveniente da rede de abastecimento local, fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

Quanto ao aditivo redutor de água, foi adotado um superplastificante a base de policarboxilatos, por ser amplamente utilizado em pesquisas de concretos reciclados (BARBUDO *et al.*, 2013; BRAVO *et al.*, 2017; ETXEBERRIA; VEGAS, 2015; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014; PEREIRA; EVANGELISTA; DE BRITO, 2012a), além de ser mais eficiente em concretos com agregado reciclado do que os superplastificantes a base de lignosulfonatos (BRAVO *et al.*, 2017). Utilizou-se o aditivo superplastificante Viscocrete 6010 SA (ficha técnica encontra-se no Anexo A), que age por adsorção superficial e separação esférica das partículas de cimento, proporcionando uma alta taxa de redução de água, com manutenção de uma excelente fluidez e ótima coesão da massa durante um maior período (SIKA, 2015).

4.2 Produção dos Microconcretos

Foram produzidos microconcretos com agregados miúdos reciclados e de referência para o traço 1:3 (cimento:agregado miúdo, em massa), e moldados em corpos de prova cilíndricos de \varnothing 5 cm e 10 cm de altura (para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água) e \varnothing 10 cm e 20 cm de altura (para os ensaios de resistividade elétrica e módulo de elasticidade dinâmico).

A sequência de mistura adotada, esquematizada na Figura 3, foi a preconizada pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019), adicionando a etapa em que o superplastificante é inserido à mistura, quando se completava o primeiro minuto da mistura, sendo que o aditivo se encontrava diluído em parte da água de amassamento.



Figura 3 – Esquema da sequência de mistura da NBR 7215.

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Concreto da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando como misturador para produção dos microconcretos, uma argamassadeira da marca Contenco®, modelo I-3010, com capacidade útil de 5 litros.

Quanto aos teores de substituição parcial do AMN pelo AMR, foram adotados os teores de 0% e 50%, sendo utilizados os resíduos de concreto, de argamassa mista e de bloco cerâmico, individualmente, em cada microconcreto produzido. A relação a/c foi determinada, por tentativa, partindo do valor de $a/c=0,5$, por meio do ensaio de determinação do índice de consistência (mesa de consistência) de tal forma que as misturas com AMR e sem aditivo se apresentassem no limite entre seco e plástico, permitindo, assim, a moldagem dos corpos de prova. O índice de consistência de 250 ± 15 mm das misturas com AMRs foi alcançada por meio da utilização do aditivo superplastificante.

O teor de aditivo redutor de água adotado também foi determinado a partir do ensaio de determinação do índice de consistência (mesa de consistência), sendo aquela quantidade necessária para garantir uma consistência adequada ao microconcreto, sem ultrapassar o limite máximo de aditivo determinado pelo seu fabricante e não promover exsudação e/ou segregação do material, sendo que essa quantidade foi uma porcentagem em função da massa de cimento utilizada na mistura. O detalhamento das misturas de microconcretos produzidas encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Detalhamento das misturas produzidas

Mistura	Teor de Agregados	Relação Água/Cimento	Teor de Aditivo
REF	100% AMN	0,8	-
RSA-1	50% AMN + 50% AMR-1	0,8	-
RCA-1	50% AMN + 50% AMR-1	0,8	2,0%
RSA-2	50% AMN + 50% AMR-2	0,7	-
RCA-2	50% AMN + 50% AMR-2	0,7	0,4%
RSA-3	50% AMN + 50% AMR-3	0,6	-
RCA-3	50% AMN + 50% AMR-3	0,6	0,4%

Nota: AMR-1 (agregado miúdo reciclado cerâmico); AMR-2 (agregado miúdo reciclado de argamassa); AMR-3 (agregado miúdo reciclado de concreto); RSA-1 (mistura com resíduo cerâmico e sem aditivo); RCA-1 (mistura com resíduo cerâmico e com aditivo); RSA-2 (mistura com resíduo de argamassa e sem aditivo); RCA-2 (mistura com resíduo de argamassa e com aditivo); RSA-3 (mistura com resíduo de concreto e sem aditivo); RCA-3 (mistura com resíduo de concreto e com aditivo).

4.3 Propriedades Avaliadas

A seguir será apresentada a metodologia adotada para determinação das propriedades dos microconcretos que foram analisadas nessa pesquisa, a partir das respectivas normas que preconizam esses procedimentos experimentais.

O ensaio de consistência foi realizado no Laboratório de Concreto e os ensaios de determinação do comportamento mecânico foram realizados no Laboratório de Análises Experimental de Estruturas (LAEES) (resistência à compressão axial) e no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica (módulo de elasticidade dinâmico).

Já os ensaios de durabilidade, estes foram executados no Laboratório de Síntese de Materiais e Ensaio Químicos (LaSMEQ) (absorção de água por imersão e por

capilaridade) e no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica (resistividade elétrico-volumétrica). Todos esses laboratórios citados são da Escola de Engenharia da UFMG. A Tabela 4 resume a metodologia utilizada nesta pesquisa.

Tabela 4 – Resumo dos ensaios realizados na pesquisa

Propriedades Avaliadas	Normas Utilizadas	Número de Corpos de Prova	Dimensão dos Corpos de Prova	Idades dos Ensaios
Índice de Consistência	NBR 13276 (ABNT, 2005)	-	-	0 dias
Resistência à Compressão Axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)	4	Ø 5 cm H= 10 cm	20 dias
Absorção de Água por Capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2012)	4	Ø 5 cm H= 10 cm	15 dias
Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica	NBR 9778 (ABNT, 2005)	4	Ø 5 cm H= 10 cm	21 dias
Resistividade Eléctrico-volumétrica	NBR 9204 (ABNT, 2012)	2	Ø 10 cm H= 20 cm	28 dias
Módulo de Elasticidade Dinâmico	ASTM C215 (ASTM, 2008)	2	Ø 10 cm H= 20 cm	28 dias

As idades dos ensaios foram definidas tomando-se por base a utilização na produção dos microconcretos, do cimento CPV-ARI que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), atinge já aos 14 dias cerca de 92% de sua capacidade total de resistência, não comprometendo assim os resultados obtidos nesta pesquisa. Isto também pode ser constatado pela Tabela 2, na qual consta os resultados da caracterização do cimento utilizado nesta pesquisa e que se observa que com 7 dias o cimento já atingiu cerca de 82% de sua resistência total (que se atinge aos 28 dias). Especificamente em relação aos dois ensaios de absorção de água, como foram utilizados os mesmos corpos de prova, o ensaio por capilaridade foi iniciado aos 15 dias e ao término deste, iniciou-se o ensaio de absorção de água por imersão.

4.3.1 Propriedades dos microconcretos no estado fresco

No estado fresco foi avaliada a consistência dos microconcretos produzidos, a partir do ensaio de determinação do índice de consistência (mesa de consistência), de acordo com os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2005). Tal procedimento foi

importante para determinação da relação água/cimento dos microconcretos produzidos, bem como do teor de aditivo empregado. Foi possível, ainda, obter informações visuais acerca de coesão, exsudação e segregação dos compósitos cimentícios produzidos.

O procedimento consiste no enchimento do tronco de cone sobre a mesa de consistência, ambos previamente umedecidos, em três camadas de alturas aproximadamente iguais. Utilizando um soquete, a primeira camada recebe 15 golpes, a segunda 10 golpes e a terceira 5 golpes. É feito, então, o rasamento da superfície do tronco de cone e o mesmo é suspenso verticalmente. A partir daí, aciona-se a manivela que compõe a mesa de consistência, de modo que se tenha 30 quedas em 30s e imediatamente após a última queda mede-se o espalhamento da amostra a partir de três diâmetros em três pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro. O índice de consistência consiste na média das três medidas de diâmetro, sendo aproximada ao valor inteiro mais próximo.

4.3.2 Propriedades dos microconcretos no estado endurecido

O comportamento dos microconcretos no estado endurecido foi avaliado a partir da determinação da resistência mecânica à compressão (NBR 5739 (ABNT, 2018)), do módulo de elasticidade dinâmico (ASTM C215 (ASTM, 2008) e adaptações na equação de LEE *et al.* (2015)), da absorção de água por capilaridade (NBR 9779 (ABNT, 2012b)) e por imersão (NBR 9778 (ABNT, 2005)), e da resistividade elétrica-volumétrica (NBR 9204 (ABNT, 2012a)). Foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos (4 corpos de prova por ensaio: compressão axial e absorção de água) de \varnothing 5 cm e 10 cm de altura, para cada uma das 7 misturas, totalizando 56 corpos de prova, além de 2 corpos de prova cilíndricos de \varnothing 10 cm e 20 cm de altura, para cada uma das 7 misturas, para os ensaios de resistividade e módulo de elasticidade dinâmico (mesmos corpos de prova), totalizando 14 corpos de prova de \varnothing 10 cm e 20 cm de altura. Todos os corpos de prova ficaram imersos em água com cal até atingirem a idade de ensaio.

a) Resistência à compressão axial

Inicialmente os corpos de prova tiveram suas superfícies (superior e inferior) retificadas com auxílio de uma politriz no Laboratório de Tecnologia de Rochas da UFMG. Em seguida, mediu-se duas vezes o diâmetro do corpo de prova cilíndrico, na metade da altura do mesmo, seguido do cálculo do diâmetro médio. Feito isso, os corpos de prova foram posicionados ao centro entre os pratos, previamente limpos, da prensa EMIC SSH300, com capacidade de carga de 300 kN. Iniciou-se, então, o carregamento a uma velocidade de 0,45 MPa/s, até que se atingisse a carga de ruptura dos mesmos. A partir do valor dessa carga, calculou-se a resistência à compressão dos corpos de prova pela Equação 1.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Sendo: f_c = Resistência à compressão (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro médio do corpo de prova (mm).

b) Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico que corresponde à rigidez ou resistência à deformação elástica do compósito cimentício é determinado pelo método de frequência ressonante forçada no modo longitudinal em corpos de prova cilíndricos de \emptyset 10 cm e 20 cm de altura. Essa frequência ressonante é aferida pelo equipamento *Erudite MKII Ressonante Frequency Test System*, e a partir da velocidade de propagação de onda ultrassônica, as características físicas do material são avaliadas de forma não destrutiva.

A montagem do ensaio é apresentada na Figura 4, na qual o corpo de prova é posicionado entre dois terminais, gerador e receptor, permitindo que o pulso ultrassônico o atravesse o mesmo. Varia-se a frequência de condução até que a resposta da amostra medida atinja uma amplitude máxima, que é considerada a frequência de ressonância do material. Em posse desses resultados e pela Equação 2, desenvolvida por LEE *et al.* (2015), é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico do material.

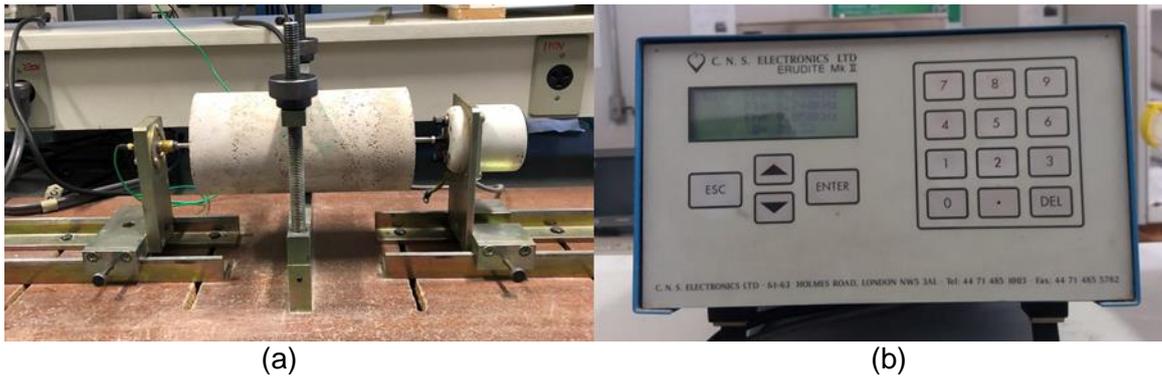


Figura 4 – Equipamento e montagem do ensaio de módulo de elasticidade.

$$Ed = 5,093 \times \frac{L}{D^2} \times M \times F^2 \times 10^{-9} \quad (2)$$

Sendo: Ed = Módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

L = Comprimento do corpo de prova (m);

D = Diâmetro do corpo de prova (m);

F = Frequência do modo fundamental da vibração longitudinal (Hz);

M = Massa do corpo de prova seco (kg).

c) Absorção de água por capilaridade

Os corpos de prova foram inicialmente secados em estufa por 72 h à uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, sendo então determinada sua massa seca, após atingir a temperatura ambiente. Feito isso, foi realizada a imersão parcial dos corpos de prova, colocando os corpos de prova sobre um suporte de modo que a superfície inferior dos mesmos ficasse imersa numa lâmina de (5 ± 1) mm, sem que se molhassem outras superfícies. A partir de então, foi feita a determinação da massa dos corpos de prova com 10 e 90 minutos e 3, 6, 24, 48 e 72 horas, considerando a contagem do tempo a partir do contato dos corpos de prova com a lâmina de água. Os mesmos foram devidamente enxugados (para retirada do excesso de água) com pano úmido, previamente a cada pesagem, e após a determinação da massa, foram recolocados imediatamente no recipiente do ensaio. Em posse dos valores dessas massas, calculou-se a capacidade de absorção de água por capilaridade a partir da Equação 3.

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (3)$$

Sendo: C = Absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

A = Massa do corpo de prova em contato com a água, num determinado instante (g);

B = Massa do corpo de prova seco (g);

S = Área da seção transversal do corpo de prova (cm²).

d) Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção por capilaridade foram utilizados no ensaio de absorção por imersão. Inicialmente, os corpos de prova foram colocados imersos em água por 72 h à temperatura de (23 ± 2) °C. Ao fim dessa etapa de saturação dos corpos de prova, os mesmos foram colocados num recipiente com água progressivamente levada à ebulição, sendo mantida por 5 h. Após essa água esfriar naturalmente, os corpos de prova foram pesados na balança hidrostática, seguido do enxugamento dos mesmos com pano úmido e determinação da massa dos corpos de prova saturados. A partir desses valores de massa determinados, calculou-se a absorção de água por imersão (Equação 4), índice de vazios (Equação 5) e massa específica real do material (Equação 6).

$$A_i = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (5)$$

$$\rho_v = \frac{m_s}{m_s - m_i} \times \rho_{\text{água}} \quad (6)$$

Sendo: A = Absorção de água por imersão (%);

I_v = Índice de vazios (%);

ρ_v = Massa específica real do corpo de prova (g/cm³);

$\rho_{\text{água}}$ = Massa específica da água (g/cm³);

m_{sat} = Massa do corpo de prova saturado após imersão e fervura (g);

m_s = Massa do corpo de prova seco em estufa (g);

m_i = Massa do corpo de prova imerso em água após fervura (balança hidrostática) (g).

e) Resistividade elétrico-volumétrica

O ensaio consiste na leitura da corrente elétrica contínua que é aplicada por meio de uma diferença de potencial entre dois eletrodos posicionados nas superfícies (inferior e superior) dos corpos de prova cilíndricos. Para tal fim, utilizou-se o equipamento Gerador de Função Digital FG-8102 da Politerm (Figura 5), que é responsável por gerar uma diferença de potencial de aproximadamente 8V. Os corpos de prova, previamente saturados com água, foram colocados entre duas

placas de cobre com palhas de aço úmidas nas superfícies de contato entre eles, garantindo, assim, a passagem da corrente elétrica, sem interferência das irregularidades da superfície dos corpos de prova. Em posse dos valores para a tensão total do circuito e a corrente que passa no corpo de prova (lida no equipamento), se obteve a resistência elétrica do corpo de prova e, em seguida, a partir da geometria do material e da Lei de Ohm, calculou-se a resistividade elétrico-volumétrica do material, por meio da Equação 7.

$$\rho = \frac{R \times S}{L} = \frac{V \times S}{L \times I} \quad (7)$$

Sendo: ρ = Resistividade elétrica (Ωm)

R = Resistência elétrica (Ω)

I = Corrente (A)

V = Diferença de potencial (V)

L = Comprimento do corpo de prova (m)

S = Área da seção transversal (m^2)



Figura 5 – Ensaio de resistividade elétrico-volumétrica.

f) Análise da estrutura porosa

Foram realizadas cinco imagens com microscópio óptico digital com capacidade de ampliação de 1000x ao longo das seções dos corpos de prova \varnothing 5 cm e 10 cm de altura cortados horizontalmente ao meio e pintados com caneta de cor preta para destacar os poros. As imagens obtidas foram tratadas no software ImageJ® versão 1.52a, que permitiu ainda realizar o levantamento semi-quantitativo da estrutura porosa dos microconcretos produzidos nesta pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos Agregados Miúdos

5.1.1 Massa específica, absorção de água e porosidade

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para a caracterização dos agregados miúdos natural e reciclados adotados para produção dos microconcretos.

Tabela 5 – Propriedades físicas dos agregados miúdos utilizados

Propriedade Avaliada	AMN	AMR-1 (Cerâmico)	AMR-2 (Argamassa)	AMR-3 (Concreto)	
Massa específica (g/cm ³)	Seca	2,57	1,91	1,94	2,48
	Saturada superfície seca	2,69	2,27	2,26	2,67
	Real	2,91	2,98	2,86	3,06
Massa unitária (kg/m ³)	1200	930	1000	1150	
Absorção de água (%)	4,4	16,0	14,2	7,1	

Quanto à massa específica seca desses agregados, observou-se menores valores (variando para menos de 3,5%, no AMR-3, a 25,7%, no AMR-1) para essa propriedade física dos agregados reciclados quando comparados ao agregado natural, que pode ser explicado pela maior porosidade dos AMRs que tende a deixá-los mais leves. A porosidade desses agregados é evidenciada na Figura 6, que ilustra imagens de microscopia óptica digital dos agregados utilizados nesta pesquisa. Destaca-se que o AMR-3, devido à presença da brita (material mais denso e menos poroso que o material cerâmico e as argamassas) no resíduo de concreto, apresentou uma maior massa específica seca, se assemelhando inclusive à do AMN (3,5% menor) utilizado nas misturas. O mesmo comportamento foi observado na massa unitária desses materiais.

Esta questão da porosidade pode ser evidenciada, ainda, pela capacidade de absorção de água desses AMRs (Tabela 5), uma vez que os resíduos AMR-1 e AMR-2, por serem mais porosos apresentaram maior absorção de água de aproximadamente 3 vezes maior que a do AMN, 16,0% e 14,2%, respectivamente. Já o AMN e o AMR-3, por serem menos porosos apresentaram menores taxas de absorção de água, 4,4% e 7,1%, respectivamente.

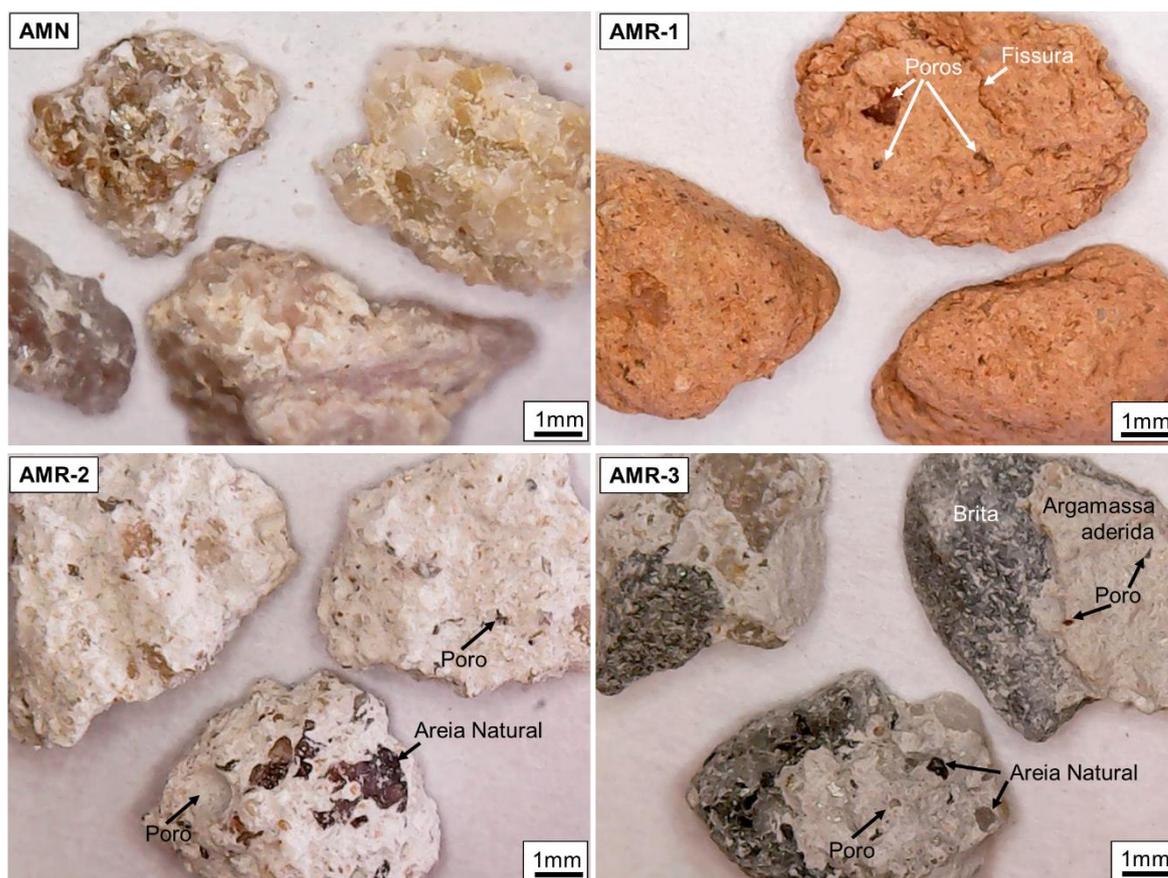


Figura 6 – Imagens de microscopia óptica digital dos grãos de dimensão 4,8mm dos agregados utilizados na pesquisa.

Na Figura 6 fica evidente a presença de poros de diferentes tamanhos nos grãos do AMR-1 e AMR-2 e fissuras nos resíduos cerâmicos, o que reflete diretamente na alta capacidade de absorção de água dos mesmos. O AMR-3, por sua vez, apresenta partículas compostas por britas, que foram trituradas, e argamassa aderida. Isto justifica a menor capacidade de absorção de água deste agregado reciclado originado de resíduo de concreto, já que a porosidade da brita é muito baixa e, portanto, a absorção de água é referente à argamassa aderida à brita. Além disso, constata-se que devido à resistência dos materiais que originaram esses agregados reciclados, o AMR-1 e AMR-2 apresentam um formato mais esférico, por serem materiais mais friáveis facilitando o desgaste superficial durante o processo de cominuição dos resíduos, enquanto que o AMR-3 apresenta partículas mais angulosas, algumas vezes até lamelares, dada a maior dificuldade de trituração desse resíduo de concreto de maior resistência mecânica.

Destaca-se na Figura 6, ainda, uma maior rugosidade superficial dos grãos de agregado tanto do AMN quanto dos AMRs, que tende a deixar a mistura mais

áspera, comprometendo a trabalhabilidade da mistura. Portanto, essa superfície irregular das partículas, combinada à alta absorção de água e o alto teor de material pulverulento dos AMRs, contribuíram para as misturas solicitarem uma alta relação *a/c* para se atingir uma consistência adequada dos microconcretos, assim como constatou-se nos estudos de Oliveira e Cabral (2011), Bravo *et al.* (2017) e, Silva Neto e Leite (2018).

5.1.2 Granulometria e teor de finos

A Tabela 6 e as Figuras 7 a 10, apresentam os resultados obtidos para a granulometria dos agregados miúdos natural e reciclados adotados para produção dos microconcretos, além das curvas granulométricas limites da norma NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Tabela 6 – Propriedades granulométricas dos agregados miúdos utilizados

Propriedade Avaliada	AMN	AMR-1 (Cerâmico)	AMR-2 (Argamassa)	AMR-3 (Concreto)
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	4,8	4,8	4,8
Módulo de finura	2,14	3,30	3,03	4,05
Módulo de finura da composição granulométrica	-	2,72	2,59	3,10
Material pulverulento (%)	7,4	12,0	16,8	6,3

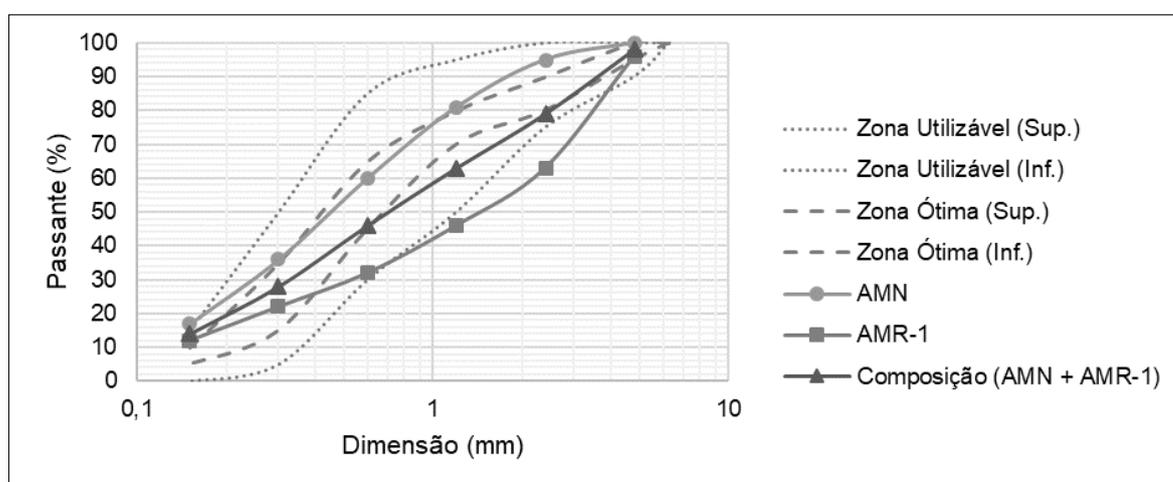


Figura 7 – Curvas granulométricas referentes ao AMR-1.

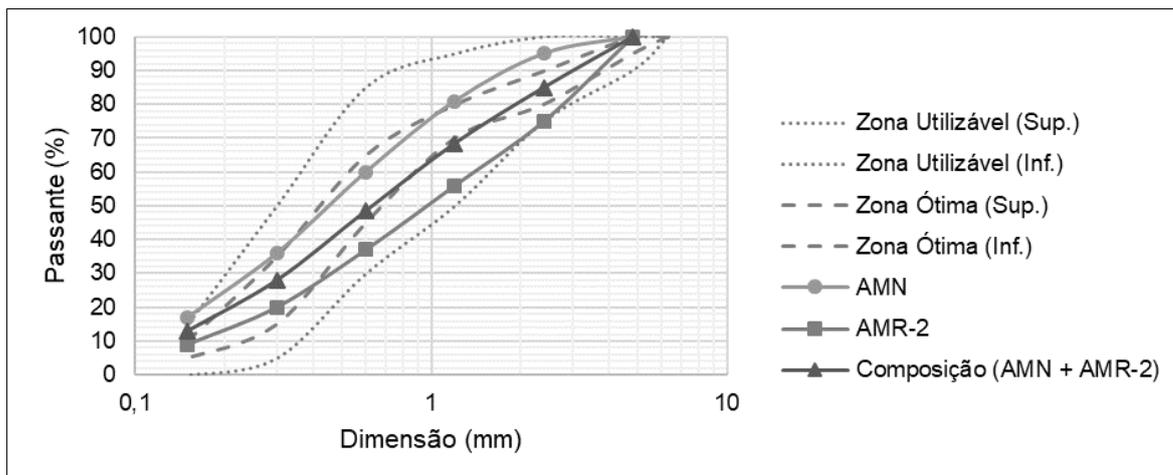


Figura 8 – Curvas granulométricas referentes ao AMR-2.

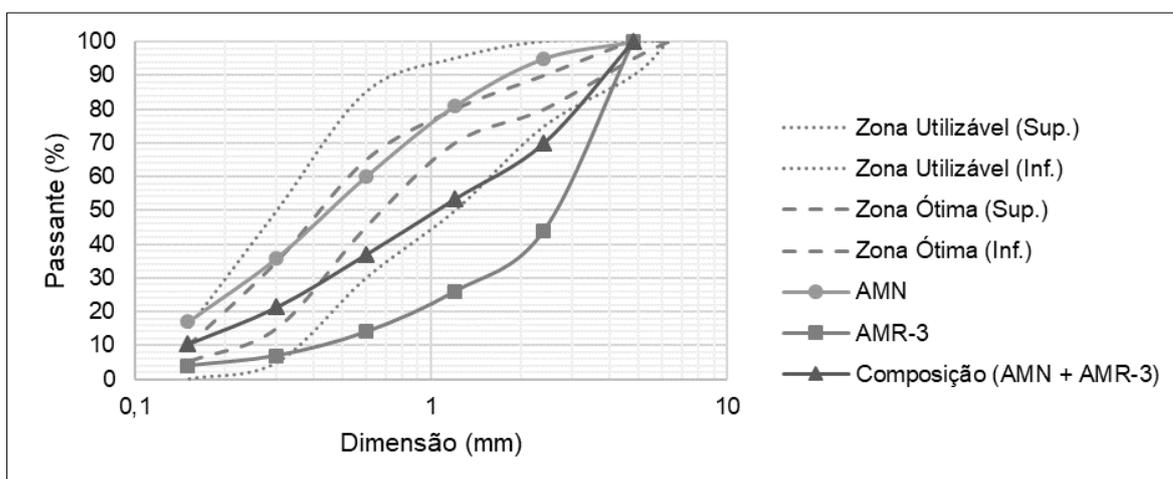


Figura 9 – Curvas granulométricas referentes ao AMR-3.

A partir das características granulométricas dos agregados utilizados na produção dos microconcretos (Tabela 6 e Figuras 7 a 10), observou-se que há uma semelhança entre as curvas do AMR-1 e AMR-2, que inicialmente se encontravam próximas ao limite superior da zona utilizável (areias mais grossas), porém ambas ao serem combinadas com o AMN, no teor de 50%, se aproximam mais da zona ótima, com uma melhor distribuição granulométrica, o que é benéfico para o empacotamento da mistura. Quanto ao AMR-3, este apresenta uma granulometria mais afastada dos limites de norma, devido à grande quantidade da fração de partículas de dimensão 2,4 mm. Porém, a combinação do AMR-3 com o AMN gera uma granulometria de distribuição que mais se aproxima do limite superior da zona utilizável.

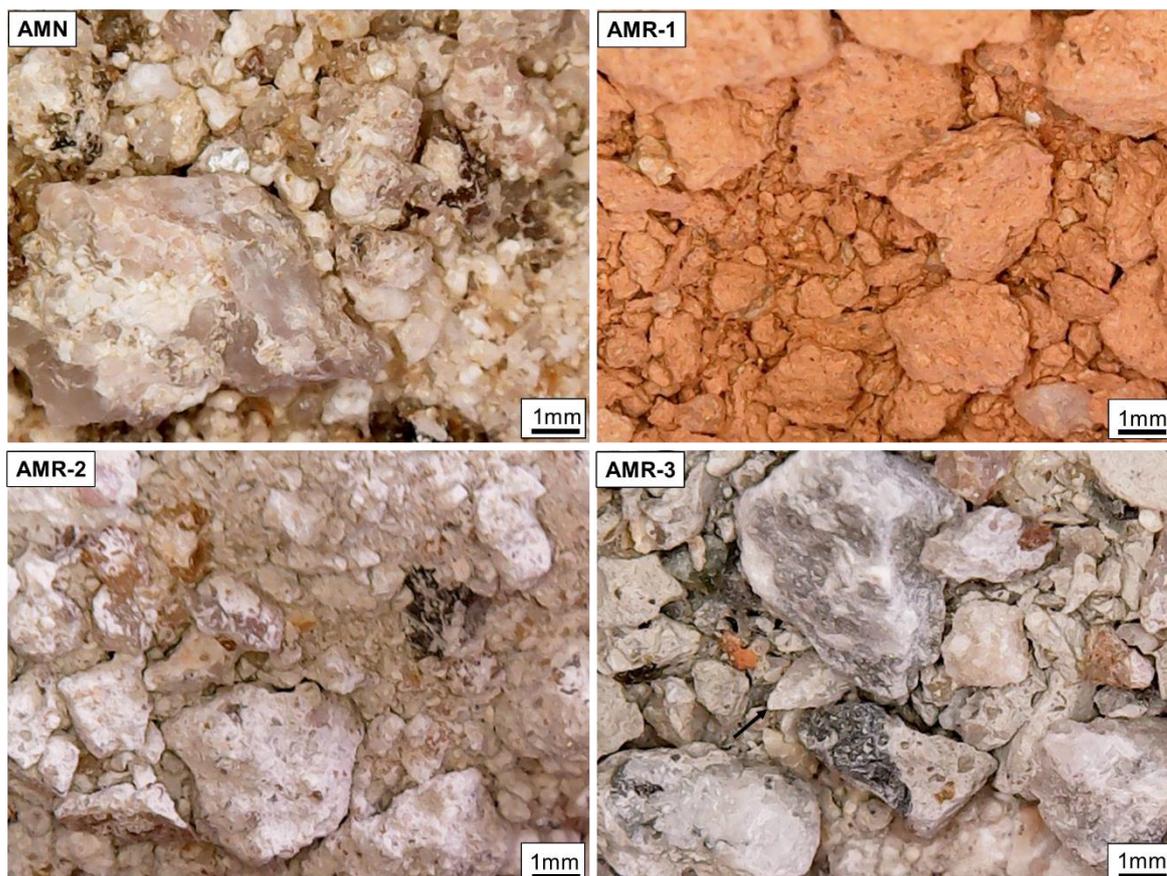


Figura 10 – Imagens de microscopia óptica digital da visão geral das diferentes frações granulométricas dos agregados utilizados na pesquisa.

Por meio da visão geral dos agregados (Figura 10) é possível observar as frações de diferentes dimensões granulométricas destes, sendo a granulometria do AMR-3 visivelmente mais grossa, enquanto o AMR-1 e AMR-2 apresentam uma maior variedade de tamanhos de partículas, incluindo muitos finos. Confirma-se na Figura 10 o observado na Tabela 6, onde os três AMRs apresentaram uma granulometria mais grossa que o AMN, evidenciado pelo maior módulo de finura destes. No entanto, esses módulos de finura foram reduzidos ao se realizar a composição dos agregados no teor de 50% do AMN com 50% do AMR-1, AMR-2 e AMR-3 (individualmente), obtendo-se como resultado os valores 2,72, 2,56 e 3,10, respectivamente.

No que concerne o teor de material pulverulento desses agregados, os maiores teores foram encontrados nos AMR-1 e AMR-2 (12,0% e 16,8%, respectivamente), já que os materiais que originaram esses agregados são mais friáveis, gerando mais pó no processo de cominuição. O baixo teor de finos do AMR-3 (menor

inclusive que o do AMN), está atrelado à maior resistência do concreto residual (30 MPa), que gerou inclusive uma maior dificuldade de cominuir esse material.

É importante salientar que o processo de cominuição foi exatamente o mesmo para os resíduos de bloco cerâmico e os de argamassa mista, para produção do AMR-1 e AMR-2, respectivamente. Já o resíduo de concreto, devido à maior resistência desse material, foi necessário um processo mais demorado para conseguir triturar todo o resíduo disponível. O beneficiamento desses três resíduos, como já foi explanado no tópico 4.1.2, consistiu em três etapas: uma no britador de mandíbula, outra no moinho de rolos e uma intermediária que foi o peneiramento na peneira de malha de abertura 4,8 mm. Sendo que para transformar completamente os respectivos resíduos em AMR-1 e AMR-2, foram necessárias duas passadas dos resíduos no britador de mandíbula, duas passadas na peneira, e as frações retidas nesta passaram duas vezes no moinho de rolos. Diferentemente, para produção do AMR-3 ao invés de duas passadas em cada equipamento foram necessárias cinco passadas, e ainda assim, obteve-se uma granulometria mais grossa, rica em grãos de agregados de dimensão 2,4 mm.

Do ponto de vista econômico, tem-se o custo e o gasto de energia do processo de beneficiamento do resíduo de concreto acabou sendo mais elevado que os dos outros dois resíduos. Desse modo, talvez este resíduo seja mais adequado para produção de agregados graúdos reciclados, que exigiria menos etapas de cominuição, ou ainda poderia se pensar na utilização de equipamentos mais potentes, que conseguissem triturar esse resíduo de forma mais eficiente, gerando agregados miúdos com esforço reduzido e em menos passadas do resíduo pelo mesmo.

5.2 Consistência dos Microconcretos

A Figura 11 ilustra os resultados obtidos no ensaio de determinação do índice de consistência dos sete diferentes microconcretos produzidos.



Figura 11 – Consistência dos diferentes microconcretos.

As misturas apresentaram índice de consistência atendendo o limite de 250 ± 15 mm, com exceção das misturas RSAs, nas quais intencionalmente foram deixadas num limite de consistência entre secas e plásticas, para que se pudesse avaliar o efeito do aditivo superplastificante, mas que ainda assim fosse possível realizar as moldagens dos corpos de prova. As misturas REF e RCAs apresentaram-se bastante trabalháveis e coesas, sem presença de segregação e/ou exsudação significativa (já que se observou uma leve exsudação na mistura REF).

Devido as menores capacidade de absorção de água (Tabela 5) e porosidade (Figura 6) do AMR-2 e AMR-3, em comparação com AMR-1, as misturas RSA-2 e RCA-2, e RSA-3 e RCA-3 requereram menos água, apresentando menores relações água/cimento, 0,7 e 0,6, respectivamente, em comparação às misturas com AMR-1 (relação água/cimento de 0,8). Além disso, foi possível reduzir o teor de aditivo superplastificante nas misturas RCA-2 e RCA-3, utilizando um teor de 0,4%, contra 2,0% utilizado da mistura RCA-1.

5.3 Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica dos Microconcretos

A Tabela 7 apresenta os resultados médios, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação referentes aos ensaios de absorção de água por imersão,

índice de vazios e massa específica, enquanto que a Figura 12 apresenta o gráfico de barras que permite comparar essas referidas propriedades para cada mistura.

Tabela 7 – Resultados médios da absorção de água por imersão (A_i), índice de vazios (I_v) e massa específica real (γ_r) dos microconcretos

Prop.	Misturas						
	REF	RSA-1	RCA-1	RSA-2	RCA-2	RSA-3	RCA-3
A_i (%)	13,54 ±	14,19 ±	15,62 ±	12,90 ±	12,72 ±	8,32 ±	7,97 ±
±SD (CV)	0,5 (3,6)	1,1 (7,6)	1,7 (10,7)	0,3 (2,0)	0,3 (2,0)	0,1 (1,1)	0,1 (0,8)
I_v (%)	25,0 ±	26,2 ±	27,9 ±	23,7 ±	23,1 ±	16,9 ±	16,2 ±
±SD (CV)	0,7 (2,7)	1,5 (5,8)	2,6 (9,2)	0,3 (2,0)	0,4 (1,8)	0,2 (1,0)	0,1 (0,7)
γ_r (g/cm ³)	2,47 ±	2,51 ±	2,48 ±	2,40 ±	2,36 ±	2,44 ±	2,43 ±
±SD (CV)	0,0 (0,1)	0,0 (0,5)	0,0 (0,2)	0,0 (0,2)	0,0 (0,5)	0,0 (0,1)	0,0 (0,2)

Prop. – Propriedades; SD – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação

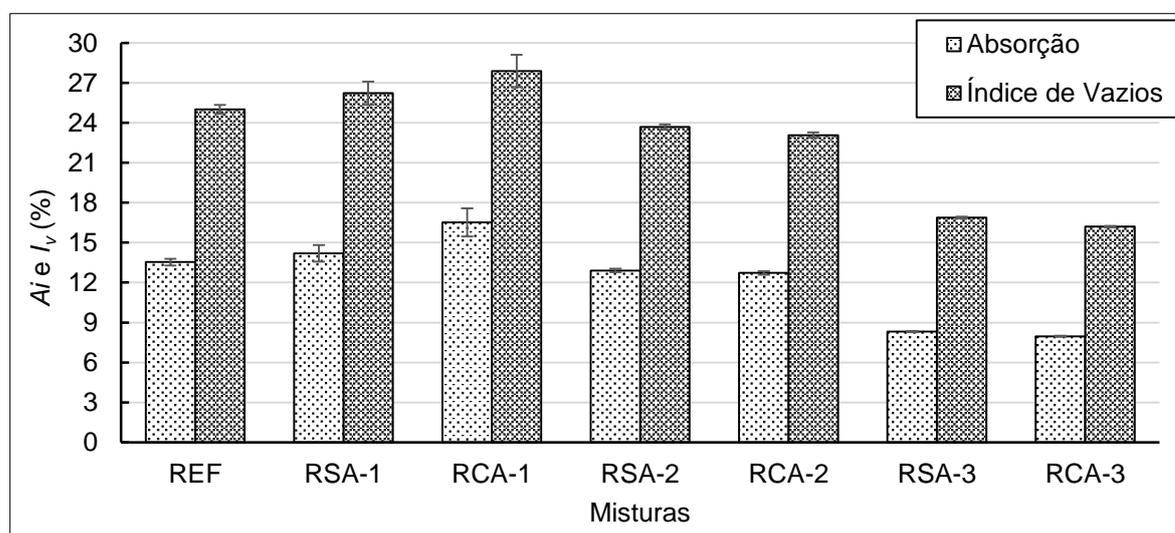


Figura 12 – Absorção de água por imersão (A_i) e índice de vazios (I_v) dos microconcretos.

Pode-se observar em Tabela 7 e Figura 12, comparando as misturas RSA-1 e RSA-2 com a REF, que a substituição do AMN pelo AMR no teor de 50%, resultou em uma variação pouco significativa, cerca de 5% para mais (RSA-1) ou para menos (RSA-2), no índice de vazios e na capacidade de absorção de água por imersão dos microconcretos. Tal comportamento pode estar atrelado à curva granulométrica mais bem distribuída, gerada pela combinação granulométrica (50% AMN + 50% AMR), que tende a beneficiar o empacotamento da mistura e, assim, houve uma amenização do efeito da porosidade das partículas de agregado reciclado.

Porém, em se tratando da mistura RSA-3, em relação à REF, constou-se uma redução mais expressivas dessas propriedades, de 38,6% para a absorção de água por imersão e 32,5% para o índice de vazios dos microconcretos. Este comportamento está atrelado à grande presença de partículas de britas trituradas

no AMR-3, que apresentam porosidade muito baixa, além de demandar a menor relação água/cimento desta mistura em comparação às demais.

Levando-se em consideração o efeito do aditivo superplastificante adotado nas misturas, comparando as misturas RCAs com as RSAs, observou-se que nas misturas com o AMR-2 e o AMR-3, o teor de 0,4% de aditivo superplastificante promoveu uma redução nas referidas propriedades, ainda que pouco expressiva, melhorando a compacidade da mistura.

No entanto, diferente do esperado, na mistura RCA-1, comparando-se à mistura RSA-1, notou-se aumentos de 6,5% no índice de vazios e de 10% na absorção de água por imersão. Esse efeito contraditório acredita-se estar atrelado ao elevado teor de aditivo superplastificante (2,0%), necessário para manter a trabalhabilidade da mistura, que pode ter promovido a incorporação de ar nesse tipo de microconcreto. Tal hipótese pode ser validada pelo estudo de Oliveira (2016), que observou que em concretos com aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos, há uma maior tendência à incorporação de ar (Figura 12).

Analisando as massas específicas dos microconcretos produzidos, também apresentadas em Tabela 7, não foram observadas variações significativas dessa propriedade, com variação máxima de 4,5% para menos (RCA-2 em relação à REF). Isto corrobora para se concluir que embora os AMRs utilizados nas misturas sejam mais leves que o AMN, as misturas encontram-se mais compactas, promovendo, assim, a manutenção do valor para essa propriedade nos diferentes microconcretos. O elevado teor de finos, mais elevados para os resíduos cerâmico e de argamassa mista, também resultam na compacidade do microconcreto, uma vez que preenchem os menores espaços entre os agregados.

Portanto, frente aos requisitos apresentados pela NBR 11173 (ABNT, 1990) para argamassa armada, a única mistura que atende ao requisito da absorção de água por imersão máxima de 8%, é a RCA-3. No entanto, a adoção de aditivos redutores de água mais potentes para o caso das misturas com AMR-1, ou a elevação do teor do aditivo combinado à redução da relação água/cimento, no caso das misturas com AMR-2 e com AMR-3 poderia promover o melhoramento dessa propriedade em questão, fazendo com que as demais misturas atendessem ao requisito da

referida norma brasileira. No que tange a massa específica dos microconcretos, todas as sete misturas produzidas atendem ao requisito da massa específica de ser no mínimo de $1,80 \text{ g/cm}^3$, sendo que os valores variaram de $2,36$ a $2,51 \text{ g/cm}^3$.

5.4 Absorção de Água por Capilaridade

A partir da Figura 13 pode-se observar que apenas os microconcretos com AMR-2 (misturas RSA-2 e RCA-2) apresentaram uma maior capacidade de absorção de água por capilaridade, o que pode estar atrelado ao maior teor de finos (16,8%) desse referido agregado reciclado, que pode ter promovido o refinamento dos poros do microconcreto o que facilita a ascensão da água pelos capilares existentes.

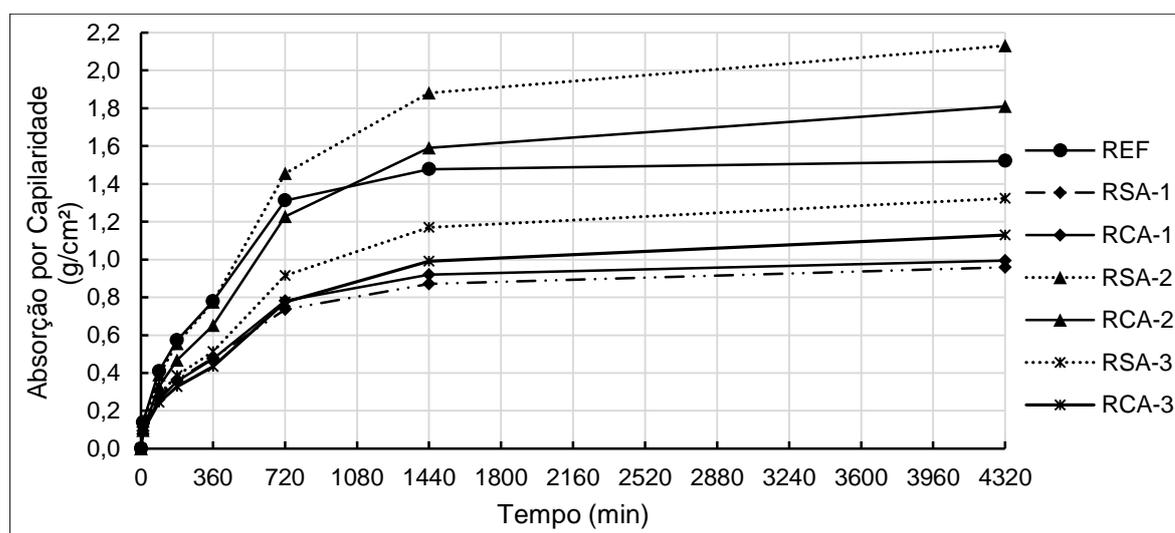


Figura 13 – Curva da absorção de água por capilaridade x tempo, dos microconcretos.

Nas misturas com AMR-1, embora este agregado também apresente um elevado teor de finos (12,0%), acredita-se que há uma maior presença de poros isolados na matriz cimentícia, como constatou-se no tópico 5.2 com a maior absorção de água por imersão e índice de vazios de RSA-1 e RCA-1 em relação à REF. Esses poros isolados dificultam a percolação da água no sentido ascendente, promovendo uma redução nos valores da absorção de água por capilaridade em RSA-1 e RCA-1.

Quanto ao comportamento dos microconcretos RSA-3 e RCA-3 frente à absorção de água por capilaridade, que também apresentaram uma redução dessa propriedade, isto está atrelado tanto à menor porosidade do AMR-3 quanto ao

menor índice de vazios da matriz cimentícia de RSA-3 e RCA-3, como observou-se nos tópicos 5.1 e 5.3.

Comparando-se as misturas com e sem superplastificante (RCAs e RSAs, respectivamente), pode-se observar um comportamento favorável ao se inserir este aditivo, visto que o mesmo agiu, como esperado, melhorando a compacidade da mistura, reduzindo assim a capacidade de absorção de água por capilaridade dos microconcretos (RCA-2 e RCA-3), logo, aumentando a durabilidade por reduzir a capacidade de entrada de agentes agressivos. Destaca-se que, comparando-se as misturas RSA-1 e RCA-1, não se constatou uma variação significativa desta propriedade avaliada.

5.5 Estrutura Porosa dos Microconcretos

A Tabela 8 e Figura 14 apresentam um levantamento semi-quantitativo referente à estrutura porosa dos diferentes microconcretos produzidos nesta pesquisa, obtidas pelo microscópio óptico digital e tratadas no software ImageJ® (capacidade de leitura de 4 µm). Já a Figura 15 apresenta fotos das seções ao meio dos corpos de prova que nos permitem uma visão geral da porosidade dos microconcretos produzidos.

Tabela 8 – Levantamento semi-quantitativa da estrutura porosa dos microconcretos

Misturas	Máxima Área de Poro Detectada (mm ²)	Tamanho Médio dos Poros (mm)	Porcentagem Média de Área de Poros na Matriz (%)
REF	2,101	0,048	6,468
RSA-1	1,669	0,034	4,934
RCA-1	1,151	0,032	2,717
RSA-2	1,388	0,038	7,834
RCA-2	0,939	0,031	5,459
RSA-3	1,070	0,038	3,855
RCA-3	1,046	0,051	2,970

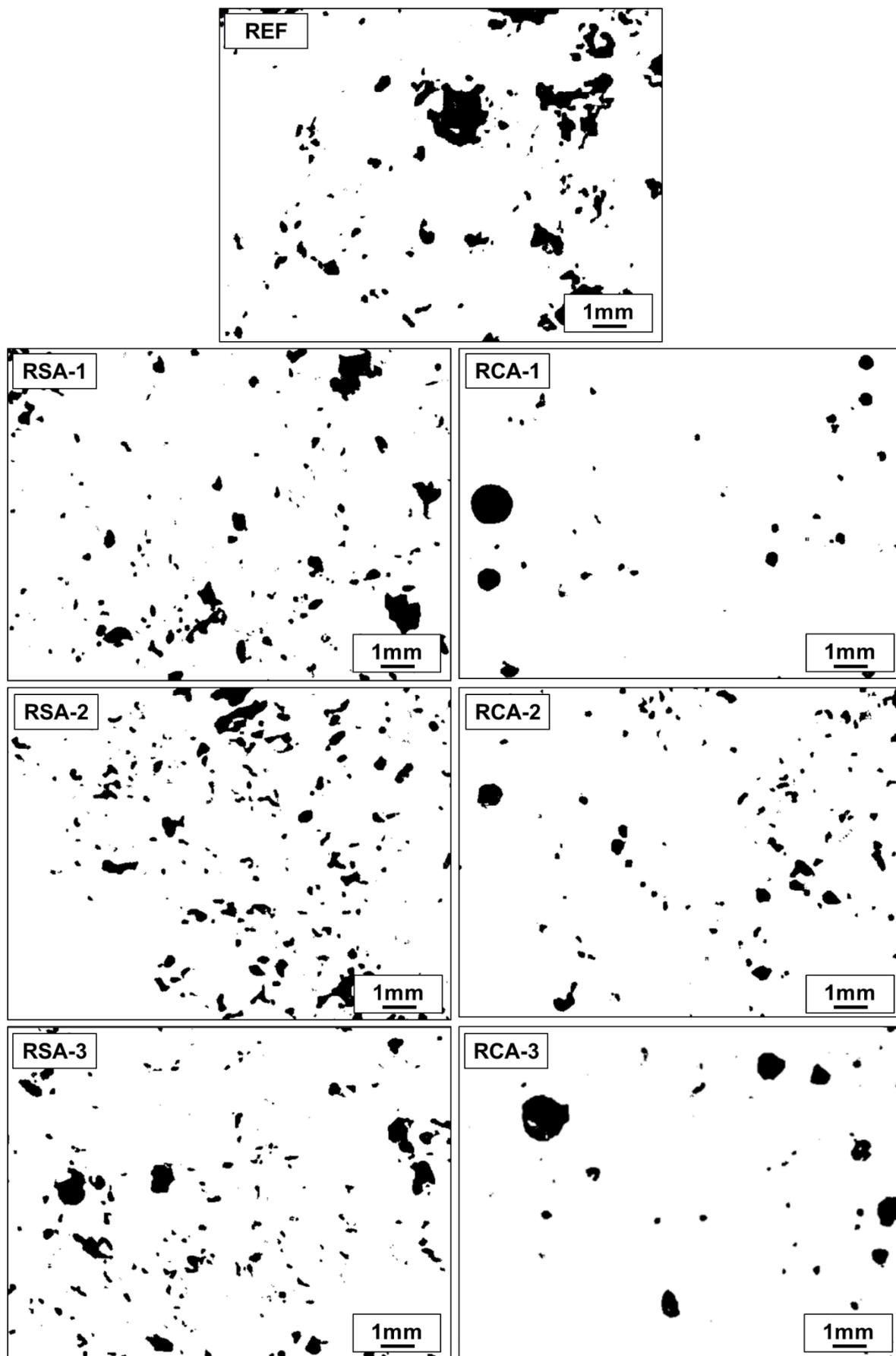


Figura 14 – Estrutura porosa dos microconcretos.

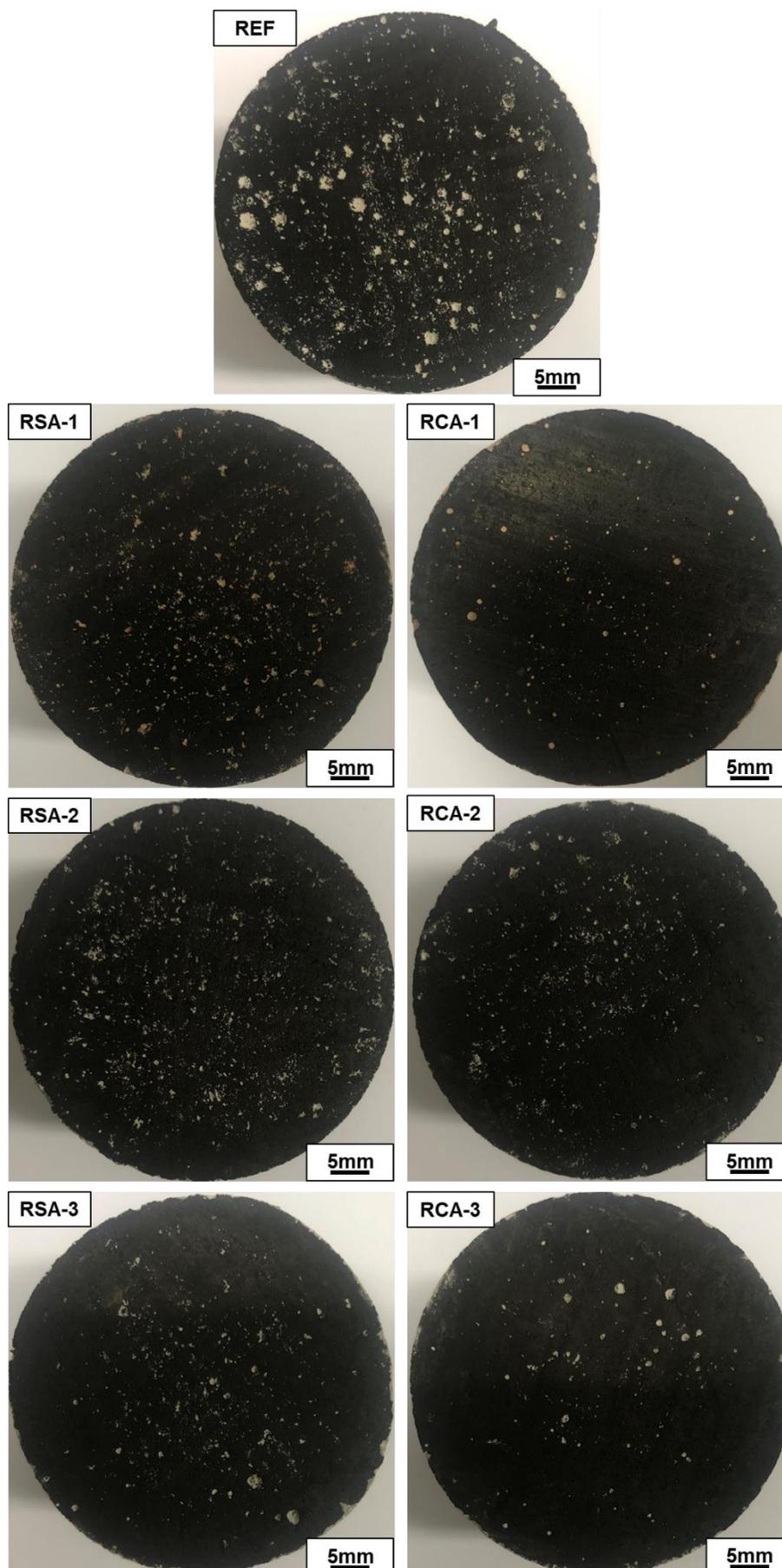


Figura 15 - Seções dos corpos de prova de microconcretos avaliadas quanto à porosidade.

Percebe-se na Tabela 8 e Figuras 14 e 15, que os microconcretos REF apresentaram poros de maiores dimensões e em maior quantidade (considerando a área média dos poros em relação à área da seção avaliada), reflexo da elevada relação água/cimento que gerou poros com a evaporação da água livre e do menor módulo de finura da areia quartzosa. Comparando-se as misturas RSAs com REF, nota-se uma redução dos tamanhos dos poros, consequência do melhor empacotamento da mistura, dada à combinação granulométrica do AMN com AMRs, bem como a maior capacidade de absorção de água dos AMRs em relação a AMN reduzindo a quantidade de água livre da mistura. Em relação aos microconcretos RSA-2 e RCA-2, constata-se um refinamento dos poros que apresentaram menores dimensões, refletindo na elevação da capacidade de absorção por capilaridade dessas misturas, como foi observado no tópico 5.4.

No que tange o efeito do aditivo superplastificante na formação de poros nas misturas, notou-se uma redução da quantidade de poros na matriz cimentícia, ao comparar as misturas RCAs com as RSAs, conforme já havia sido constatado nos tópicos anteriores. Observou-se, ainda, a presença de poros mais esféricos, diferente dos de formato irregular presentes nas misturas REF e RSAs. Esses poros esféricos são típicos da incorporação de ar, que os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos tendem a gerar na mistura, conforme afirma Oliveira (2016). Como também foram detectados poros esféricos maiores que 200 μm , isto indica a existência de poros de ar aprisionado, gerados nos processos de mistura e moldagem. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), poros esféricos menores de 50 à 200 μm são originados pela incorporação de ar de aditivos, enquanto que poros maiores de até 3 mm são originados pelo aprisionamento de ar durante o processo de mistura.

No caso específico, da mistura RCA-1, a combinação de efeitos: agregados reciclados cerâmicos muito porosos, juntamente com os poros da incorporação de ar gerado pelo aditivo, podem justificar o maior índice de vazios e absorção de água por imersão desta mistura em relação às demais. Mesmo com as duas imagens realizadas na seção do microconcreto RCA-1 (Figuras 14 e 15), não foram observadas grandes quantidades de poros, que justifique o aumento do índice de vazios (12% maior) e absorção de água (15% maior) em relação à REF, o que indica que provavelmente os poros existentes em RCA-1 são de menores

dimensões, não sendo detectados pelo limite de leitura dos equipamentos e do software utilizado.

5.6 Resistência à Compressão Axial

A Tabela 9 apresenta os resultados médios obtidos para a resistência à compressão axial dos sete microconcretos produzidos, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados. Enquanto que a Figura 16 apresenta o resultado da resistência à compressão média dos microconcretos, juntamente com a resistência à compressão relativa dos microconcretos com AMR em relação à REF.

Tabela 9 – Resultados médios da resistência à compressão axial dos microconcretos

Propriedade	Misturas						
	REF	RSA-1	RCA-1	RSA-2	RCA-2	RSA-3	RCA-3
f_c (MPa)	24,8 ±	32,4 ±	40,3 ±	28,0 ±	29,6 ±	44,7 ±	47,1 ±
± SD (CV)	2,3 (9,4)	0,3 (0,8)	1,4 (3,4)	0,6 (2,0)	0,1 (0,4)	0,6 (1,4)	1,4 (3,0)

SD – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação

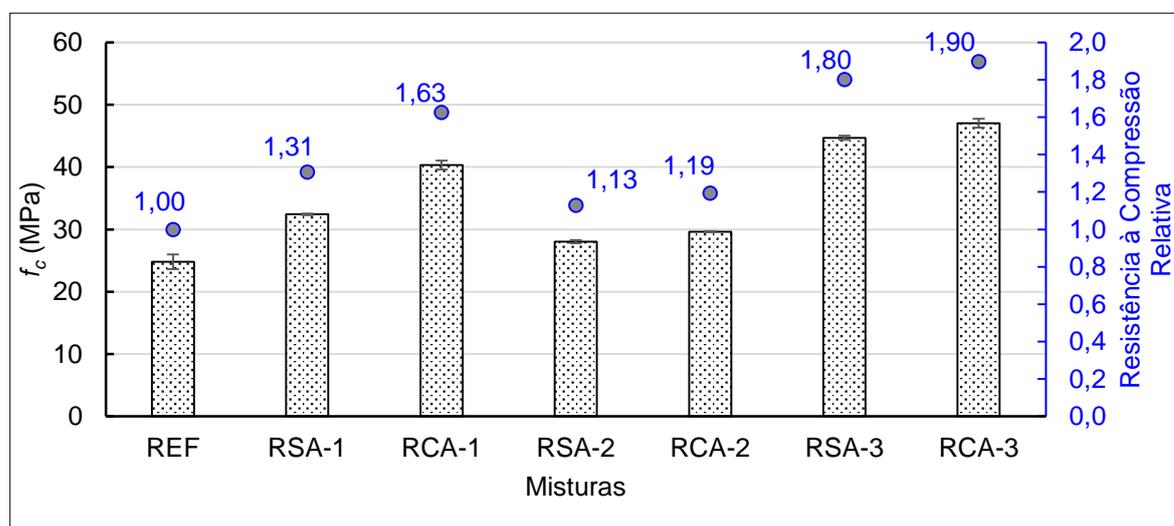


Figura 16 – Resistência à compressão média (f_c) e relativa dos microconcretos.

Através da Figura 16, observa-se que a utilização dos AMRs nos microconcretos geraram ganhos de resistência que variaram de 13% (para a mistura RSA-2) até 90% (para a mistura RCA-3), atingindo uma resistência máxima de 47,1 MPa com a combinação do teor de substituição de 50% do AMN pelo AMR-3 com o aditivo superplastificante (mistura RCA-3). Esses ganhos de resistência estão atrelados sobretudo pela melhor distribuição granulométrica (visto que o módulo de finura

ficou mais próximo ao limite da zona ótima que é de 2,20 à 2,90, de acordo à NBR 7211 (ABNT, 2009b)) que tende a beneficiar o empacotamento da mistura. Além disso, tem-se a redução da relação água/cimento efetiva dada à absorção de água de amassamento pelos AMRs que são mais porosos que o AMN.

Como a resistência do compósito cimentício depende da resistência do AMR utilizado (ALVES *et al.*, 2014; BRAVO *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2015), isto também serve para justificar porque os maiores ganhos de resistência à compressão ocorrerem nas misturas RSA-3 e RCA-3, dado que o AMR-3 foi originado de um material de maior resistência (30 MPa) no caso do concreto, do que uma argamassa mista de revestimento, por exemplo (6 MPa). Concordando ainda com De Juan e Gutiérrez (2009), que citam que concretos de resistência acima de 25 MPa produzem agregados reciclados de boa qualidade podendo ser incorporados em concretos estruturais.

O resíduo de bloco cerâmico, particularmente, embora não tenha uma elevada resistência mecânica, gerou consideráveis ganhos às misturas RSA-1 e RCA-1. Acredita-se que devido ao alto teor de finos do AMR-1, originados de argila calcinada na queima dos blocos cerâmicos, o mesmo pode ter desenvolvido atividade pozolânica na mistura contribuindo para esses ganhos, assim como foi observado por Colangelo e Cioffi (2017), Etxeberria e Vegas (2015) e Khatib (2005), ou ainda devido à elevada capacidade de absorção de água desse agregado reciclado ter deixado a zona de transição pasta-agregado com menor relação água/cimento.

Os maiores valores de resistência à compressão axial dos microconcretos com AMR-3, também se justificam pela menor relação água/cimento utilizada nas misturas RSA-3 e RCA-3, além da resistência mecânica proveniente do agregado de rocha gnaisse (brita presente no concreto que originou o resíduo).

Observa-se, ainda, no geral, que o aditivo superplastificante promoveu ganhos (variando de 5,2% a 24,4%) na resistência à compressão, que pode estar atrelado ao melhor adensamento das misturas promovido por esse aditivo, bem como a redução da relação água/cimento, e conseqüentemente, a redução dos poros na matriz cimentícia como constatou-se nos tópicos 5.3 e 5.5. De acordo com Alves *et*

al. (2014), que trabalharam com AMR cerâmico, porém de louças sanitária, o ganho de resistência ao se utilizar o superplastificante, pode ser atribuído à capacidade desse aditivo evitar a aglomeração das partículas desses agregados.

Frente aos requisitos apresentados pela NBR 11173 (ABNT, 1990) para argamassa armada, constata-se que os seis microconcretos produzidos com AMRs, apresentam resistência à compressão acima do limite mínimo de 25 MPa da referida norma brasileira.

5.7 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A Tabela 10 e Figura 17 apresentam os resultados médios obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico dos sete microconcretos produzidos, assim como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados obtidos.

Tabela 10 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico dos microconcretos

Propriedade	Misturas						
	REF	RSA-1	RCA-1	RSA-2	RCA-2	RSA-3	RCA-3
E_d (GPa)	34,20 ±	33,51 ±	35,70 ±	34,79 ±	34,62 ±	35,68 ±	37,17 ±
± SD (CV)	1,2 (3,5)	2,0 (6,0)	0,1 (0,3)	0,2 (0,4)	0,4 (1,2)	0,2 (0,4)	0,3 (0,9)

SD – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação

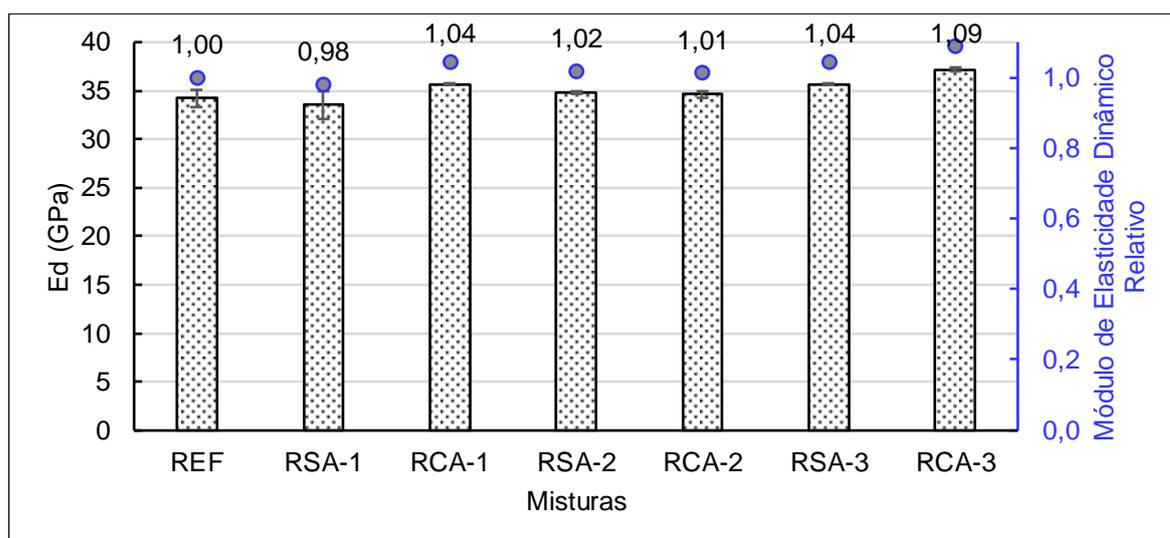


Figura 17 – Módulo de elasticidade dinâmico médio (E_d) e relativo dos microconcretos.

Conforme observa-se no gráfico da Figura 17, a substituição parcial do AMN por AMR no teor de 50%, não gerou variações significativas no módulo de elasticidade dinâmico dos microconcretos ensaiados. Os resultados variaram entre 33,51 e

37,17 GPa, sendo que o maior módulo elástico obtido foi na mistura RCA-3 (9% maior em relação à REF), que também foi a que apresentou a maior resistência à compressão axial (47,1 MPa). Tais resultados foram próximos aos obtidos por Colangelo e Cioffi (2017) em seus ensaios com argamassas de semelhante traço. A manutenção da propriedade, está relacionada à melhor compactidade da mistura, devido à combinação granulométrica no teor de 50% do AMN com AMR.

Ao se comparar os microconcretos com e sem aditivo superplastificante, observou-se incrementos nessa propriedade, embora pequenos, de 4%, comparando RCA-3 com RSA-3, e de 7% comparando RCA-1 com RSA-1. O que está atrelado ao melhoramento da compactidade das misturas, que esse aditivo também proporciona.

5.8 Resistividade Elétrico-volumétrica

A Tabela 11 apresenta os resultados médios obtidos para a resistividade elétrico-volumétrica média dos microconcretos produzidos, juntamente com seus desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados. Enquanto que a Figura 18 apresenta os gráficos para os resultados da resistividade elétrico-volumétrica média e relativa (misturas com AMRs em relação à REF) dos microconcretos.

Tabela 11 – Resultados médios da resistividade elétrico-volumétrica dos microconcretos

Propriedade	Misturas						
	REF	RSA-1	RCA-1	RSA-2	RCA-2	RSA-3	RCA-3
ρ ($\Omega \cdot m$)	16,7 \pm	74,6 \pm 1,4	56,9 \pm	19,3 \pm	19,6 \pm	26,8 \pm	30,0 \pm
\pm SD (CV)	0,3 (2,0)	(1,9)	1,0 (1,7)	1,4 (1,0)	0,3 (0,2)	0,7 (0,5)	1,8 (1,3)

SD – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que todos os microconcretos produzidos com AMRs apresentaram incrementos na resistividade elétrica ao compará-los com REF, com ganhos variando de 15% (RSA-2) até 347% (RSA-1). Isto está atrelado diretamente à redução da absorção de água por capilaridade das misturas RSAs e RCAs. As misturas RSA-2 e RCA-2, mesmo apresentando uma absorção de água por capilaridade maior que as demais misturas, esta também apresentou valores de resistividade elétrica maiores que o de REF. No entanto, essa elevação dos valores para resistividade nas misturas com AMR-2 foi muito

menor se comparada as demais, que pode estar relacionada à esse aumento da absorção por capilaridade dessas misturas em relação a REF.

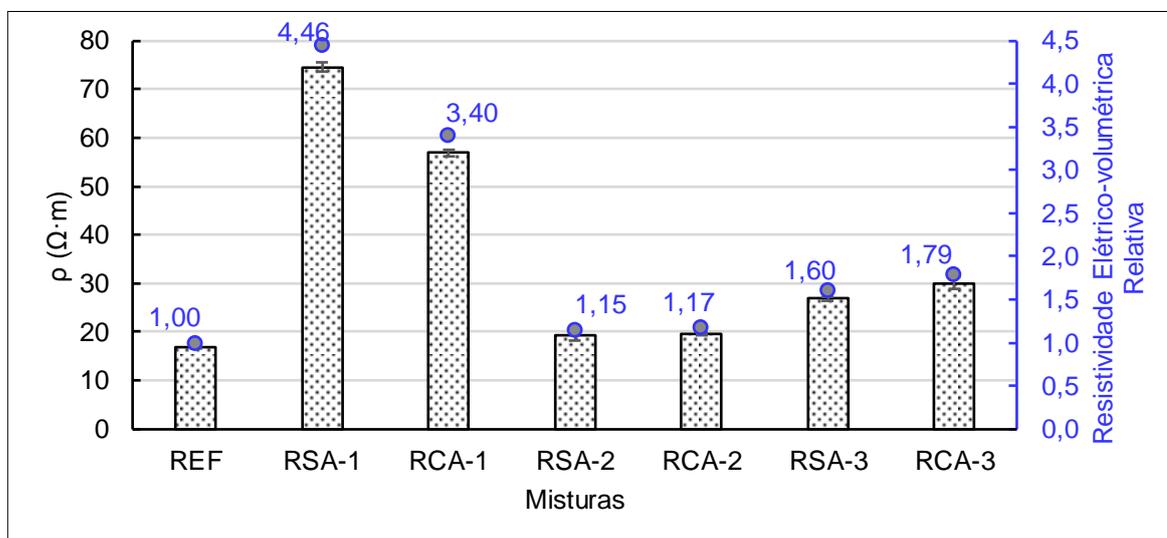


Figura 18 – Resistividade elétrico-volumétrica média (ρ) e relativa dos microconcretos.

Os maiores valores de resistividade elétrica foram obtidos nas misturas com AMR-1, 74,6 e 56,9 $\Omega \cdot m$, para as misturas RSA-1 e RCA-1, respectivamente. Tais misturas foram as que apresentaram a menor absorção de água por capilaridade entre os sete microconcretos produzidos, que ajuda a justificar seu melhor desempenho quanto à esta propriedade.

No que concerne o efeito do aditivo superplastificante nesta propriedade, constatou-se que o mesmo proporcionou incrementos na resistividade elétrica das misturas, atrelados à melhor compactidade das mesmas, com exceção da mistura RCA-1, que pode ser consequência da provável incorporação de ar, que provocou um aumento do índice de vazios desse microconcreto.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu avaliar a influência de diferentes tipos de resíduos de construção civil, originados de bloco cerâmico, argamassa mista de revestimento e concreto estrutural, como substituição parcial ao agregado miúdo natural em microconcretos com e sem aditivo superplastificante a base de policarboxilados.

Em relação aos três agregados miúdos reciclados produzidos, observou-se uma granulometria mais grossa destes se comparados ao agregado miúdo natural, tomando por base o módulo de finura. Porém, o AMR-3 foi o que apresentou granulometria mais grossa, e curva granulométrica mais uniforme, dada a maior dificuldade de triturar esse resíduo de concreto de maior resistência mecânica. No entanto a combinação granulométrica do AMN com o AMR no teor de 50% tornou a distribuição das curvas mais contínuas (bem distribuída). Quanto ao teor de finos, este esteve mais significativamente presente nos AMR-1 e AMR-2, enquanto no AMR-3 este teor foi menor, inclusive, do que o do AMN, reflexo do processo de cominuição dos respectivos resíduos.

Morfologicamente os grãos dos AMRs apresentaram superfície rugosa, e dada à resistência dos materiais que compõem os resíduos utilizados, observou-se que o AMR-1 e AMR-2 por serem mais friáveis, tiveram um desgaste superficial dos grãos facilitado, tornando-os mais esféricos, enquanto o AMR-3 apresentou partículas mais angulosas, algumas vezes até lamelares. A presença de poros de diferentes tamanhos foi evidente nos AMRs, sendo mais nítido no AMR-1. Essa porosidade das partículas de AMR tornou-os mais absorventes se comparados ao AMN utilizado nesta pesquisa, característica física importantíssima para a dosagem dos microconcretos.

No geral, a combinação granulométrica do AMN com o AMR no teor de 50%, provocou um melhor empacotamento nos microconcretos produzidos, fundamental dentre outros fatores para o melhoramento das propriedades avaliadas nos microconcretos.

No que concerne ao comportamento mecânico dos microconcretos, observou-se ganhos de resistência à compressão axial em todos os microconcretos produzidos, independente do AMR utilizado, sendo importante destacar que a resistência do

material que originou o resíduo foi um fator influenciador importante no ganho de resistência à compressão, já que os maiores ganhos ocorreram nas misturas com resíduos de concreto, e os menores ganhos, nas misturas com resíduos de argamassa. Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, observou-se que a substituição parcial do AMN pelo AMR no teor de 50% não gera variações significativas nesta propriedade, acreditando-se que o melhor empacotamento da mistura promoveu uma manutenção dos resultados.

Em relação aos parâmetros de durabilidade, no geral, observou-se uma redução do índice de vazios e da absorção de água por imersão e por capilaridade dos microconcretos, com exceção das misturas com AMR-2 que devido ao alto teor de finos, houve um refinamento dos poros que aumentou a capacidade de absorção de água por capilaridade. A porosidade do AMR e a relação água/cimento foram bastante determinantes nestas propriedades, destacando as misturas com AMR-3 que por apresentar a menor porosidade e a menor relação água/cimento foi a que apresentou menores resultados para essas três propriedades supracitadas. Quanto a resistividade elétrica dos microconcretos produzidos, notou-se uma elevação dessa propriedade nas misturas com AMR em comparação com REF. Esta referida propriedade está intimamente ligada à porosidade do compósito cimentício, sendo de suma importância para garantir a proteção da armadura frente à corrosão.

O aditivo superplastificante à base de policarboxilatos influenciou de forma benéfica os microconcretos independentemente do tipo AMR utilizado. Os benefícios foram além da melhoria da trabalhabilidade, já que se constatou elevação de resistência mecânica (comparando-se as misturas RSAs com RCAs), com ganhos de resistência à compressão de até 24,4% (em microconcretos com AMR-1), e no módulo de elasticidade dinâmico de até 7% (em microconcretos com AMR-3). Tendo em vista a durabilidade dos microconcretos, no geral, este aditivo promoveu a redução da quantidade de poros dos microconcretos, o que é benéfico contra a penetração de agentes agressivos.

Tomando por base os resultados obtidos, há indícios da possibilidade de aplicação para fins estruturais desses microconcretos, já que se observou que a combinação de efeitos da substituição parcial do AMN pelo AMR com a presença do aditivo superplastificante a base de policarboxilatos proporcionou microconcretos com

propriedades adequadas para tais fins. Tomando por base os requisitos da norma brasileira NBR 11173 (ABNT, 1990), dentre os microconcretos produzidos, o que atende a todos os requisitos para utilização como argamassa armada é o RCA-3.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Com o intuito de aprofundar os estudos acerca da substituição parcial do AMN pelo AMR, com utilização de aditivo superplastificante a base de polycarboxilatos, algumas sugestões foram levantadas para que futuramente determinadas lacunas encontradas durante a presente pesquisa sejam fechadas:

- Avaliação da variação do teor dos diferentes AMRs trabalhados nesta pesquisa, em relação às consequências tanto na composição granulométrica da combinação AMN + AMR, quanto nas propriedades dos microconcretos;
- Realizar o estudo misturando-se os três AMRs deste trabalho com o AMN (no teor de 50%) com as proporções dos AMRs simuladas tomando-se como base amostra de entulho realizada em uma obra padrão;
- Realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para se estudar a microestrutura dos microconcretos produzidos, a fim de analisar a zona de transição pasta-agregado;
- Realização de ensaios de difração de raio-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG) em amostras de AMR-1 objetivando validar a hipótese de que os ganhos de resistência à compressão dos microconcretos com esse resíduo deveu-se à possível atividade pozolânica dos finos presentes nesse material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.

ALVES, A. V.; VIEIRA, T. F.; DE BRITO, J.; CORREIA, J. R. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 103–113, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C215: **Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens**. Pennsylvania, p. 7. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003a

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 9204: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 11173: Projeto e execução de argamassa armada.** Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

BARBUDO, A.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; BRAVO, M.; AGRELA, F. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 93–98, 2013.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. Superplasticizer 's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete : Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 129–138, 2017.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composites Part B: Engineering**, v. 115, p. 43–50, 2017.

CONSTRUÇÃO. Do caos à solução. São Paulo: Pini. n. 2505, 1996a. p. 4-7. *apud*

OLIVEIRA, T. T. A.; OLIVEIRA, V. T. A.; DO AMARAL, D. L.; BRAGA, S. R. O. Q.; OLIVEIRA, A. L. R. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de laboratórios de ensaio de materiais visando aplicações não estruturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., Bonito. **Anais...**, p. 1–13, 2015.

CONTRERAS, M.; TEXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; DA SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; DE SOUZA, A. E.; DOS SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594–600, 2016.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.

DE SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v. 37, n. 273, p. 591–596, 2004.

ETXEBERRIA, M.; VEGAS, I. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 12, p. 645–655, 2015.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; RODRÍGUEZ-ROBLES, D.; JUAN-VALDÉS, A.; MORÁN-DEL POZO, J. M.; GUERRA-ROMERO, M. I. Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. **Materials**, v. 7, n. 9, p. 6224–6236, 2014.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; BARROQUEIRO, T.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J.; DE BELIE, N.; MORÁN-DEL POZO, J.; JUAN-VALDÉS, A. Fracture energy of coarse recycled aggregate concrete using the wedge splitting test method: influence of water-reducing admixtures. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, p. 1–15, 2017.

GONZALEZ, A.; ETXEBERRIA, M. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 227–235, 2014.

GUO, H.; SHI, C.; GUAN, X.; ZHU, J.; DING, Y.; LING, T.; ZHANG, H.; WANG, Y. Durability of recycled aggregate concrete – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251–259, 2018.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 763–769, 2005.

KLEIN, D. L. **Microconcreto - Método e Dosagem**. Porto Alegre, 1985. Caderno de Engenharia - CE-03, Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul *apud* SELISTRE, S. L. C. **Análise teórico-experimental de uma laje nervurada de microconcreto armado submetida a um carregamento uniformemente distribuído**. Porto Alegre: 2000, 115 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

KOU, S. C; POON C. S.; WAN, H. W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 881–889, 2012 *apud* GARCÍA-GONZÁLEZ, J. *et al.* Fracture energy of coarse recycled aggregate concrete using the wedge splitting test method: influence of water-reducing admixtures. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, p. 1–15, 2017.

LEE, B. J.; KEE, S. H.; OH, T.; KIM, Y. Y. Effect of Cylinder Size on the Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Concrete from Static and Dynamic Tests. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, p. 12, 2015.

LEVY S.; HELENE P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1975–1980, 2004 *apud* EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

MARTÍNEZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTÍNEZ, F. F.; SÁNCHEZ, A. R. 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.

MATIAS, D.; DE BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 7, p. 1–5, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, L. R. T.; BITTENCOURT, T. N. Estudo experimental e analítico do comportamento estrutural de um modelo em escala reduzida em microconcreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53, Florianópolis. **Anais...**, p. 1–26, 2011.

NAYANA, A. Y., KAVITHA, S. Evaluation of CO₂ emission for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)**, v. 8, n. 5, p. 703–708, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OLIVEIRA, M. E. D.; CABRAL, A. E. B. Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE, Brasil. **Engenharia Civil**, v. 41, p. 21–34, 2011.

OLIVEIRA, M. E. P. **Estudo comparativo das propriedades reológicas e mecânicas dos concretos produzidos com diferentes aditivos redutores de água**. Belo Horizonte: 2016, 89 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2016.

OLIVEIRA, T. T. A.; OLIVEIRA, V. T. A.; DO AMARAL, D. L.; BRAGA, S. R. O. Q.; OLIVEIRA, A. L. R. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de laboratórios de ensaio de materiais visando aplicações não estruturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., Bonito. **Anais...**, p. 1–13, 2015.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete

resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 291–299, 2000 *apud* EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 141–151, 2014.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 722–729, 2012a.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1044–1052, 2012b.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Belo Horizonte: 2010, 150 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RILEM. **C 18 - Measurement of hardened concrete carbonation depth**. 1988

SALLES, P. V. **Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduos de construção e demolição**. Belo Horizonte: 2018, 82f. Dissertação de Mestrado, CEFET-MG, 2018.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento**. Viçosa: 2014, 155 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Viçosa, 2014.

SELISTRE, S. L. C. **Análise teórico-experimental de uma laje nervurada de microconcreto armado submetida a um carregamento uniformemente distribuído**. Porto Alegre: 2000, 115 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 5, p. 2413–2419, 2005 *apud* ALVES, A. V.; VIEIRA, T. F.; DE BRITO, J.; CORREIA, J. R. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 103–113, 2014.

SIKA. **Manual técnico de produtos Sika**. 5. ed. São Paulo: Sika, 2015.

SILVA, E. C. R.; BEZERRA, A. J. V.; DA SILVA, C. F. C.; MIRANDA, L. F. R. Desempenho de revestimentos de argamassa com Areias recicladas produzidas em canteiro de obras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 9., Belo Horizonte. **Anais...**, p. 1–14, 2011.

SILVA NETO, G. A.; LEITE, M. B. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 53–69, 2018.

SILVA, R. V.; NEVES, R.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 22–32, 2015.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 400–409, 2016.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

XIAO, J. J.; LI, W. G.; FAN, Y. H.; HUANG, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 364–383, 2012 *apud* GUO, H. *et al.* Durability of recycled aggregate concrete – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251–259, 2018.

ZORDAN, S.E. **Utilização do Entulho Como Agregado para Concreto**. Dissertação (Mestrado), Faculdade Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas. 1997, 140 p. *apud* OLIVEIRA, T. T. A.; OLIVEIRA, V. T. A.; DO AMARAL, D. L.; BRAGA, S. R. O. Q.;

OLIVEIRA, A. L. R. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de laboratórios de ensaio de materiais visando aplicações não estruturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., Bonito. Anais..., p. 1–13, 2015.

ANEXO A – Ficha Técnica Do Aditivo Superplastificante Viscocrete 6010 SA (continua)

Sika® ViscoCrete®-6010 SA

Aditivo superplastificante de última geração para concreto de alto desempenho

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Sika® ViscoCrete®-6010 SA é um aditivo líquido de pega normal, de terceira geração, para concretos de alto desempenho (CAD) e concretos autoadensáveis (CAA). O Sika® ViscoCrete®-6010 SA mantém por mais tempo a trabalhabilidade desses concretos. Atende aos seguintes requisitos técnicos:

- ABNT NBR 11768:2011, tipo SP-I N, na dosagem de 0,3% a 0,65%;
- ABNT NBR 11768:2011, tipo SP-II N, na dosagem de 0,7% a 1,5%.

USOS

Sika® ViscoCrete®-6010 SA permite uma alta taxa de redução de água, mantendo excelente fluidez e ótima coesão da massa por um período maior, em comparação com outros superplastificantes. Permite a confecção de concretos com altíssima fluidez, autoadensáveis e com baixas relações a/c. Sika® ViscoCrete®-6010 SA é utilizado nos seguintes tipos de concreto:

- Concretos sujeitos a transporte;
- Concretos autocompactantes;
- Concretos com elevada redução na água de amassamento;
- Concretos de alto desempenho (CAD);
- Concreto dosado em central;
- Concretagem de peças esbeltas e densamente armadas;
- Concreto bombeado.

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

Sika® ViscoCrete®-6010 SA atua por diferentes mecanismos, através dos efeitos de adsorção superficial e separação estérica nas partículas do cimento e no processo de hidratação. Com o seu uso, as seguintes propriedades são obtidas:

- Autocompactação;
- Aumento no tempo de trabalhabilidade do concreto;
- Extremo poder redutor de água, resultando em altas resistências à compressão;
- Excelente fluidez, resultando em grandes reduções nos custos de lançamento e adensamento do concreto;
- Reduz retrações e fissuras no concreto;
- Reduz a taxa de carbonatação do concreto;
- Concreto fluido com mínimo fator a/c, sem segregação e exsudação;
- Melhora a aderência e a textura da superfície do concreto;
- Aumenta o módulo de elasticidade;
- Aumenta a impermeabilidade e a durabilidade do concreto.

Não contém cloretos intencionalmente adicionados.

DADOS DO PRODUTO

Forma / Aspecto	Cor	Embalagem
Líquido	Castanho	Tambor de 200 L, contêiner de 1.000 L e a granel

ANEXO A – Ficha Técnica do Aditivo Superplastificante ViscoCrete 6010 SA (conclusão)



ESTOCAGEM

Validade e condições de armazenamento

12 meses após a data de fabricação, se estocado apropriadamente em embalagem original e intacta, em temperatura entre +5 °C e +35 °C, protegido do gelo e da luz direta do sol.

DADOS TÉCNICOS

Composição básica	Densidade	pH
Solução de policarboxilato em meio aquoso	1,11 kg/L ± 0,02 kg/L	2,5 ± 1,0

INFORMAÇÃO DO SISTEMA

Detalhes da aplicação

Sika® ViscoCrete®-6010 SA deve ser adicionado à água de amassamento ou diretamente à mistura de concreto fresco. Nunca adicione Sika® ViscoCrete®-6010 SA aos componentes secos do concreto (cimento e agregados).

Influência da temperatura

Em temperaturas entre +5 °C e +35 °C, o produto não sofrerá nenhuma alteração físico-química que possa afetar seu desempenho.

Consumo / Dosagem

Dosagem recomendada:

- Como superplastificante de pega normal tipo I (SP-I N), segundo a Norma ABNT NBR 11768:2011, de 0,3% a 0,65% sobre o peso dos aglomerantes (cimento e adições, se houver);
- Como superplastificante de pega normal tipo II (SP-II N), segundo a Norma ABNT NBR 11768:2011, de 0,7% a 1,5% sobre o peso dos aglomerantes (cimento e adições, se houver).

A dosagem ótima deverá ser determinada por meio de ensaios experimentais com o traço e os materiais da obra, podendo estar, eventualmente, fora das faixas indicativas acima.

Efeitos em caso de superdosagem

Em casos de superdosagem, o concreto poderá apresentar forte exsudação, segregação e retardamento excessivo. A superdosagem pode levar também ao não endurecimento ou à perda de resistência do concreto.

Compatibilidade

Como este aditivo é compatível com outros da linha Sika, sugere-se entrar em contato com o Departamento Técnico Sika Brasil para mais informações.

Armazenamento a granel e limpeza dos tanques

Para esse tipo de estocagem, seguir as recomendações da Sika no documento técnico *Instruções de armazenamento a granel e limpeza dos tanques de aditivos e adições Sika*, que pode ser encontrado no site da Sika ou solicitado ao Departamento Técnico da Sika Brasil.

Para informações sobre base dos valores, segurança, primeiros socorros, proteção ambiental e nota legal, consulte a p. 689.