

Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland

Effects of CDW aggregates variability on the mechanical performance of Portland Concrete

Luís Antônio da Cunha Viana Neto¹, Angela Teresa Costa Sales¹,
Lucila Costa Sales¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PROEC/POSGRAP/UFS CEP: 49100-000, São Cristóvão, SE
e-mail: lucamopolos@hotmail.com; angelasales@ufs.br; lucilacs@gmail.com

RESUMO

A geração de resíduos de construção e demolição (RCD) pelas empresas construtoras é uma grave questão ambiental. Usinas de reciclagem de RCD têm surgido no país. Estas instalações recebem resíduos de várias fontes, cuja diversidade de composição influencia no comportamento dos agregados para argamassas e concretos. A variabilidade de composição leva à diminuição da qualidade do agregado produzido, restringindo-os a aplicações de baixa exigência de desempenho. Neste trabalho, agregados produzidos por uma usina de reciclagem foram caracterizados de acordo com a norma brasileira vigente, visando à aplicação em concretos. Foram feitas duas coletas dos agregados reciclados, com intervalo de seis meses, obtendo-se três frações granulométricas para cada coleta, correspondentes a areia, brita 0 e brita 1. Para cada amostra coletada, determinou-se a composição gravimétrica dos agregados reciclados graúdos por análise visual e agregados graúdos foram classificados como agregado de resíduo misto (ARM). Os concretos com substituição de ARM miúdos apresentaram resultados satisfatórios de resistência à compressão, com 18% de acréscimo em relação ao concreto de referência, enquanto que os concretos com agregados graúdos obtiveram redução de até 20,6%. Ensaios de resistência à tração indireta mostraram que as quatro misturas com substituição total de ARM graúdos apresentaram redução entre 5,2% e 19,5%, em relação à referência. Os demais concretos obtiveram resultados similares ou superiores à referência. A maior variação, entre os concretos das duas coletas, nessa propriedade, foi de 13,2%. Com a inserção de agregados graúdos de RCD, houve redução do módulo de elasticidade dos concretos, em relação ao concreto de referência. As reduções obtidas nessa propriedade ficaram no intervalo de 15,8% a 40,6%. A maior variação dessa propriedade, de 13,3%, entre os concretos com agregados obtidos nas duas coletas, foi para o concreto com substituição de 100% de agregado miúdo. Foram obtidos melhores resultados para concretos com ARM miúdos.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, Agregado reciclado, Variabilidade, Concreto de cimento Portland.

ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) generation is a serious environmental issue. Waste recycling plants have emerged in Brazil. These companies receive waste from various sources, whose composition diversity influences the behavior of aggregates for mortars and concretes. The variability of composition leads to a decrease in the quality of the aggregate produced, restricting them to applications with a low performance requirement. In this work, aggregates produced by a recycling plant were characterized according to the current Brazilian standard, aiming at the application in concretes. Two collections of the recycled aggregates were made, with interval of six months, obtaining three particle size fractions for each collection, corresponding to sand, gravel 0 and gravel 1. For each sample collected, the gravimetric composition of the recycled aggregates was determined by visual analysis and coarse aggregates were classified as mixed residue aggregates (MRA). Concretes with recycled fine aggregate replacement showed satisfactory results of compressive strength, with an increase of 18% in relation to reference concrete, while concretes with recycled

coarse aggregates obtained a reduction of 20.6%. Indirect tensile strength tests showed that the four mixtures with total MRA replacement showed a decrease between 5.2% and 19.5%, relative to the reference. The other concretes have obtained results similar or superior to the reference. The largest variation, among the concrete of the two collections, in this property was 13.2%. With the insertion of recycled coarse aggregates, there was a reduction of the modulus of elasticity of the concrete, in relation to the reference concrete. The reductions obtained in this property were in the range of 15.8% to 40.6%. The largest variation of this property, of 13.3%, between the concretes with aggregates obtained in the two collections, was for the concrete with substitution of 100% of fine aggregate. Better results were obtained for concrete with fine MRA.

Keywords: Construction and demolition residues, Recycled aggregate, Variability, Portland cement concrete.

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são subprodutos da construção civil e, normalmente, compreendem uma grande variedade de materiais, como fragmentos de concreto de cimento Portland, argamassas, blocos de alvenaria, telhas e placas cerâmicas, aço, plástico, papel, madeira etc. Em qualquer atividade construtiva pode haver desperdício de materiais, além da incorporação em excesso e, pela diversidade de componentes, os resíduos de obras são ditos heterogêneos [1]. As restrições à produção dos agregados naturais, o caráter nefasto dos impactos ambientais que surgem pela exploração de matéria prima natural e a amplitude da geração de RCD, além das inadequadas práticas de deposição dos resíduos, são os principais estímulos à realização de estudos voltados à reciclagem dos resíduos de construção e demolição [2].

A implantação de usinas de reciclagem de RCD configura-se como solução para a destinação destes resíduos. Com a reciclagem, além da inserção de um novo produto no mercado da construção civil, os agregados reciclados (AR), também serão mitigados os problemas ambientais correlatos [3]. Tornar a construção civil um complexo de atividades com menor agressividade ao ambiente é indispensável, devido à expectativa de crescimento dessa indústria, em face do desenvolvimento dos centros urbanos, bem como à garantia das condições de igualdade de acesso a construções compatíveis com as necessidades das próximas gerações. Parte do processo de diminuição de tal agressividade passa pelo reuso ou reciclagem do RCD [4].

Apesar das vantagens evidentes, a reciclagem de RCD e o uso dos AR ainda precisam ser incrementados. Até mesmo em países onde a reciclagem de RCD é uma prática, as utilizações mais frequentes dos resíduos reciclados destinam-se a aterros e sub-bases de estradas. Muito pouco do produto da reciclagem é utilizada como agregado para concreto e outras funções mais nobres [5].

Em 2010, aproximadamente 75% de todo o resíduo de construção e demolição produzido na Europa foi rejeitado. Contudo, alguns países como Holanda, Dinamarca e Alemanha superaram a marca de 80% de aplicação de agregados reciclados de RCD. Assim, tendo em vista o avanço na recuperação desses resíduos e redução do consumo dos agregados naturais, foi estabelecido que os países membros da União Europeia deveriam tomar as medidas necessárias para alcançar a meta de reciclagem de 70% de RCD produzidos até o ano de 2020 [6,7].

A baixa utilização de agregados reciclados em determinadas aplicações na Engenharia ocorre devido às propriedades inadequadas do material reciclado, como a baixa resistência mecânica e tenacidade; baixa densidade e elevada absorção de água, além da heterogeneidade na composição desses insumos, pois um componente ruim, dentro da mistura, pode torná-la inviável para a aplicação tecnológica, ainda que haja componentes qualificados [8].

A variabilidade na composição dos RCD pode ser entendida por diversos fatores, tais como, a diversidade de tipologia das obras, das fases da obra, qualidade dos materiais empregados e das equipes em serviço, utilização de boas práticas de gestão de resíduos na construção, regionalismo e sazonalidade da construção civil.

A construção civil apresenta características e necessidades que são sazonais. Neste setor, as condições climáticas, por exemplo, impedem a realização de diversas tarefas [9, 10]. Em consequência às variações que ocorrem na construção civil, os resíduos apresentam variabilidade em suas propriedades e composição.

A variabilidade do RCD e, conseqüentemente, dos agregados reciclados, é um obstáculo a ser contornado na produção de concretos e argamassas com este tipo de agregado, impedindo que sejam desenvolvidos métodos e modelos precisos para controle e predição das propriedades dos agregados reciclados e sua influência nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais cimentícios [11]. MIRANDA et al. [12] reuniram dados de estudos de agregados reciclados, que apresentaram variação dos valores obtidos para determinadas propriedades (Tabela 1).

Tabela 1: Variabilidade de propriedades dos agregados reciclados encontrada por pesquisadores

AGREGADO	PARÂMETRO	LOCAL E FONTE	INTERVALO	AMPLITUDE
Graúdo	Teor de cerâmica vermelha (%)	Ribeirão Preto [13]	14,6-25,9	11,30
		Santo André [14]	0,10-13,0	12,90
		Vinhedo [15]	0,79-6,90	6,11
	Contaminantes (%)	Ribeirão Preto [13]	0,20-0,80	0,60
		Santo André [14]	0,94-3,17	2,23
		Vinhedo [15]	0,03-1,22	1,19
	Teor de finos (%)	Ribeirão Preto [13]	2,50-4,40	1,90
		Santo André [14]	0,00-7,36	7,36
	Absorção de água (%)	Santo André [14]	3,92-11,28	7,36
Madri [16]		5,00-11,50	6,50	
Miúdo	Teor de finos (%)	Socorro [12]	13,00-30,00	17,00
	Absorção de água (%)	Santo André [14]	7,00-15,56	8,56

A variabilidade de propriedades e de composição mineral é fator crítico influente sobre a dificuldade de produção padronizada dos AR, tanto em nível local, como regional [9].

A viabilidade econômica pretendida no uso e reciclagem dos RCD é uma questão altamente afetada pela variabilidade inerente a estes resíduos. Fatores físicos, econômicos e sociais são variáveis regionais que influenciam na busca pela viabilidade desta atividade. Para haver incremento da inserção de AR no mercado, torna-se necessária a utilização de estratégias, dentre as quais a redução de preço dos agregados reciclados em relação aos naturais e dos produtos com agregados reciclados, além da busca pela padronização dos agregados reciclados [17].

Nesse estudo, analisou-se o efeito da variabilidade de agregados reciclados mistos (ARM) de resíduos de construção e demolição (RCD), produzidos em uma usina de reciclagem de RCD do Estado de Sergipe, sobre as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com substituição parcial e total de agregados naturais por agregados reciclados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O cimento utilizado para a produção das misturas de concreto foi do tipo CP II Z 32, com módulo de finura, medido por meio da peneira com abertura de malha de 75 µm, de 0,42%, segundo a NBR 11579 [18], o tempo de início de pega, medido conforme a NBR NM 65 [19], foi de 2h20, a massa específica real do cimento foi de 3,12 g/cm³, segundo a norma NBR NM 23 [20]. O aditivo utilizado foi o ViscoCrete®Precast da Sika®, superplastificante de pega normal de terceira geração[21].

Os agregados naturais utilizados foram das faixas granulométricas de areia, brita 0 e brita 1. Os agregados reciclados mistos (ARM) foram coletados de uma usina recicladora de resíduos da construção civil, que recebe e beneficia o entulho de grande parte das empresas construtoras de Aracaju, Sergipe. Nessa instalação, realiza-se triagem manual dos RCD, para que sejam aproveitados apenas os de Classe A, e processa-se o entulho, sendo obtidos agregados nas faixas granulométricas equivalentes a areia, brita 0 e brita 1. Foram coletadas duas amostras de campo com intervalo de seis meses, sendo a primeira coleta realizada no outono e a segunda coleta, na primavera. Em ambas as coletas, foram obtidos os agregados de cada uma das três faixas granulométricas, adotando-se os procedimentos de amostragem de agregados da norma NBR NM 26 [22].

Para a caracterização dos ARM, procedeu-se à redução das amostras de campo em amostras de ensaios, conforme o procedimento indicado pela norma NBR NM 27 [23]. A preparação do material não contou com nenhum tipo de beneficiamento aos ARM após o seu recebimento, pois era desejado conhecer as propriedades desses materiais conforme produzidos.

A caracterização dos ARM consistiu em executar os ensaios indicados de requisitos gerais e específicos da norma NBR 15116 [24], que são: composição granulométrica (ABNT, 2003b); teor de material passante na peneira 75µm (ABNT, 2003c); absorção de água para agregados graúdos (ABNT, 2009a); absorção de água para agregados miúdos (ABNT, 2009b); massa específica para agregados graúdos (ABNT, 2009a); massa específica para agregados miúdos (ABNT, 2009c); torrões de argila e materiais friáveis (ABNT, 2010); composição do agregado graúdo (ABNT, 2004) e teor de cloretos e teor de sulfatos (ABNT, 2009d).

As composições gravimétricas das duas frações de ARM graúdos de cada coleta estão mostradas nas Figuras 1 e 2. As caracterizações dos agregados naturais e reciclados estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

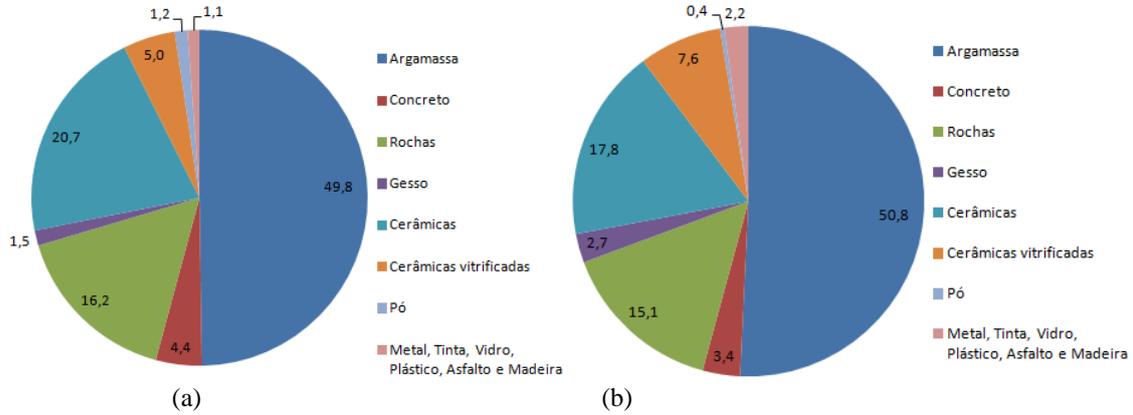


Figura 1: Composições gravimétricas das britas 0 recicladas. Primeira coleta (a). Segunda coleta (b).

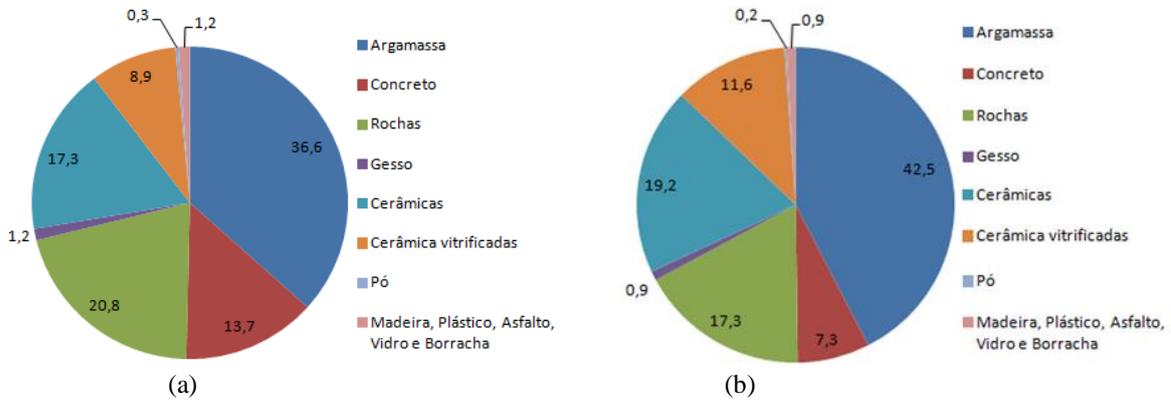


Figura 2: Composições gravimétricas das britas 1 recicladas. Primeira coleta (a). Segunda coleta (b).

Tabela 2: Caracterização dos agregados naturais

AGREGADOS	CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Areia	Massa específica real (g/cm³)	2,64
	Massa unitária(g/cm³)	1,43
	Diâmetro máximo (mm)	4,8
	Módulo de finura	2,69
Brita 0	Massa específica real (g/cm³)	2,65
	Diâmetro máximo (mm)	12,5
	Módulo de finura	5,73
Brita 1	Massa específica real (g/cm³)	2,65
	Diâmetro máximo (mm)	12,5
	Módulo de finura	6,52

Tabela 3: Caracterização dos ARM

ENSAIOS	MATERIAIS	RESULTADOS		VARIÇÃO ENTRE COLETAS (%)	LIMITES PELA (%) NBR 15116 [24]	
		1ª COLETA	2ª COLETA			
Massa específica real (g/cm ³)	Areia	2,40	2,46	+ 2,5	-	
	Brita 0	2,53	2,54	+ 0,40		
	Brita 1	2,51	2,52	+ 0,40		
Massa específica SSS (g/cm ³)	Brita 0	2,22	2,25	+ 1,35		
	Brita 1	2,26	2,26	0		
Massa específica aparente (g/cm ³)	Brita 0	2,02	2,07	+ 2,48		
	Brita 1	2,10	2,09	- 0,48		
Absorção de água (%)	Areia	8,0	7,0	- 12,5		17
	Brita 0	10,1	8,9	- 11,88		12
	Brita 1	7,8	8,3	+ 6,41		
Teor de finos passantes na peneira 75µm (%)	Areia	14,71	19,12	+ 29,98	20	
	Brita 0	4,25	6,97	+ 64,00	10	
	Brita 1	2,96	2,04	- 31,08		
Teor de argila (%)	Areia	4,95	4,27	- 13,74	2	
	Brita 0	6,04	2,18	- 63,91		
	Brita 1	2,15	0,86	- 60,00		
Materiais “não minerais” (%)	Brita 0	8,9	12,9	+ 44,95	2	
	Brita 1	11,5	13,7	+ 19,13		
Diâmetro máximo (mm)	Areia	9,5	9,5	0	-	
	Brita 0	19,0	19,0	0		
	Brita 1	19,0	25,0	+ 31,58		
Módulo de finura (%)	Areia	2,59	2,43	- 6,18	-	
	Brita 0	5,78	5,62	- 2,77		
	Brita 1	6,81	6,83	+ 0,30		

Percebeu-se que, em relação ao teor de argila dos ARM, das duas coletas, somente a brita 1 reciclada não ultrapassou os teores recomendados pela norma NBR 15116 [24] e houve excesso de materiais não minerais nos dois tipos de brita recicladas, nas duas coletas.

Foi determinada a atividade pozzolânica das frações dos ARM inferior a 45 µm, de ambas as coletas, seguindo-se a norma NBR 5752 [25]. Os resultados dos ensaios de atividade pozzolânica dos finos de ARM miúdos da primeira e segunda coleta superaram o limite mínimo de 75% exigido pela norma, alcançando valores de 84,45% e 83,70%, respectivamente, além de apresentar variação muito pequena dos valores obtidos entre as duas coletas, correspondente a 0,95%.

Seis misturas de concretos foram produzidas para cada coleta de ARM executada, além da mistura de referência (REFER), totalizando 13 misturas. Quatro misturas tiveram substituição de agregados naturais (AN) miúdos por ARM miúdos, sendo duas com teor de 50% de substituição e duas com teor de 100% de substituição (CM050-1, CM050-2, CM100-1 e CM100-2); quatro misturas com substituição de AN graúdos por ARM graúdos, sendo duas com teor de 50% de substituição e duas com teor de 100% de substituição (CG050-1, CG050-2, CG100-1 e CG100-2) e quatro misturas com substituição de AN miúdos e graúdos por ARM miúdos e graúdos, sendo duas delas com teor de 50% de substituição e duas outras com teor de 100% de substituição (C2050-1, C2050-2, C2100-1 e C2100-2).

Os concretos foram dosados pelo método de dosagem do American Concrete Institute (ACI), adaptado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) [26], para resistência característica à compressão (f_{ck}) de 20 MPa, com consistência entre 60 e 80 mm, medido por abatimento de tronco de cone [27]. O traço em massa foi de 1:2,39:2,90, com relação água/cimento de 0,57. Para os concretos com agregados reciclados, foram mantidos o intervalo do abatimento do tronco de cone e a relação água/cimento. A partir do traço de referência, adotou-se a determinação das proporções dos concretos com ARM, fazendo a compensação do

volume dos agregados reciclados, pois suas massas específicas eram bem inferiores às dos agregados naturais, o que levaria a quantidades em volume muito grandes, para se obter a mesma quantidade em massa dos agregados naturais. Isso acarretaria uma maior demanda de água ou de aditivo, para se chegar a uma mesma trabalhabilidade. Esse processo foi descrito por Cabral et al. [28] do estudo de Hansen e Narud, de 1983. A pré-molhagem dos agregados reciclados iniciou-se com 10 minutos de antecedência à produção das misturas, com quantidade de água correspondente a 80% da absorção de água de cada agregado, recomendada como máxima [24].

3. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dos concretos estão mostrados nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente, com seus desvios padrões.

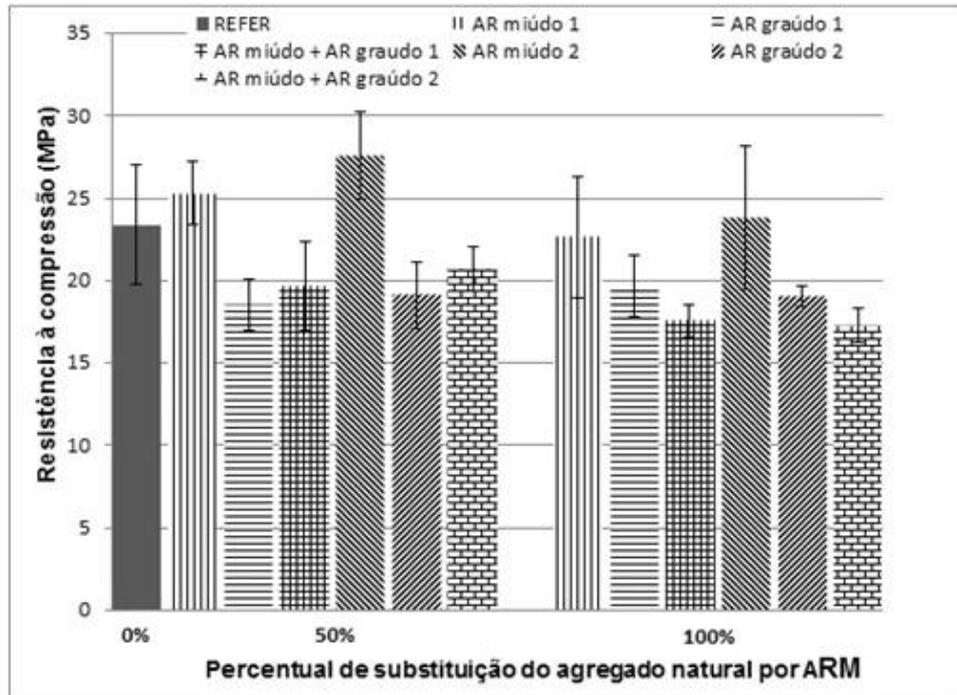


Figura 3: Resultados de ensaios de resistência à compressão

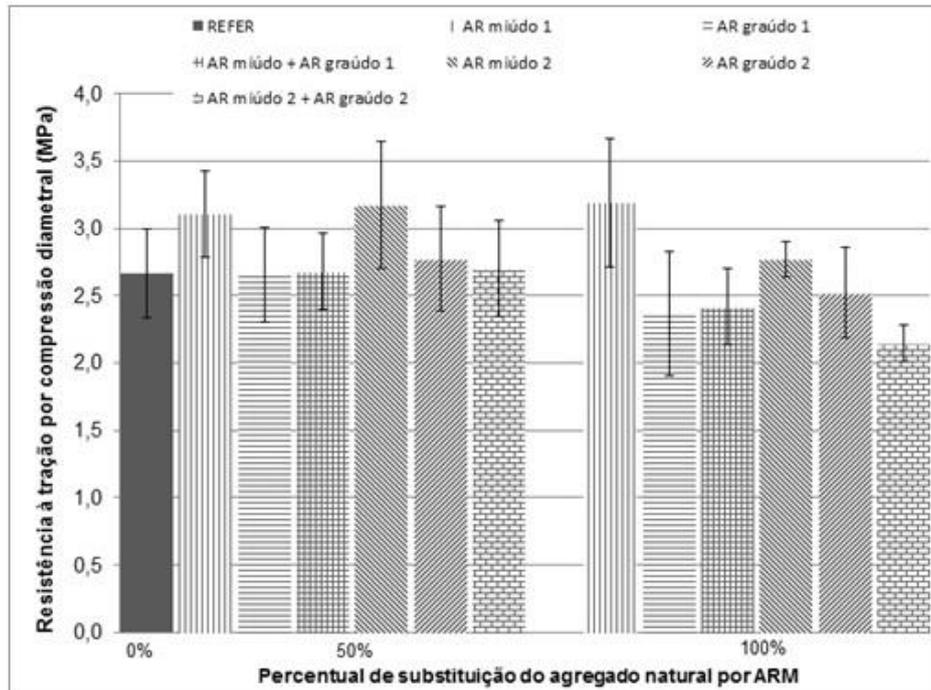


Figura 4: Resultados de ensaios de tração por compressão diametral

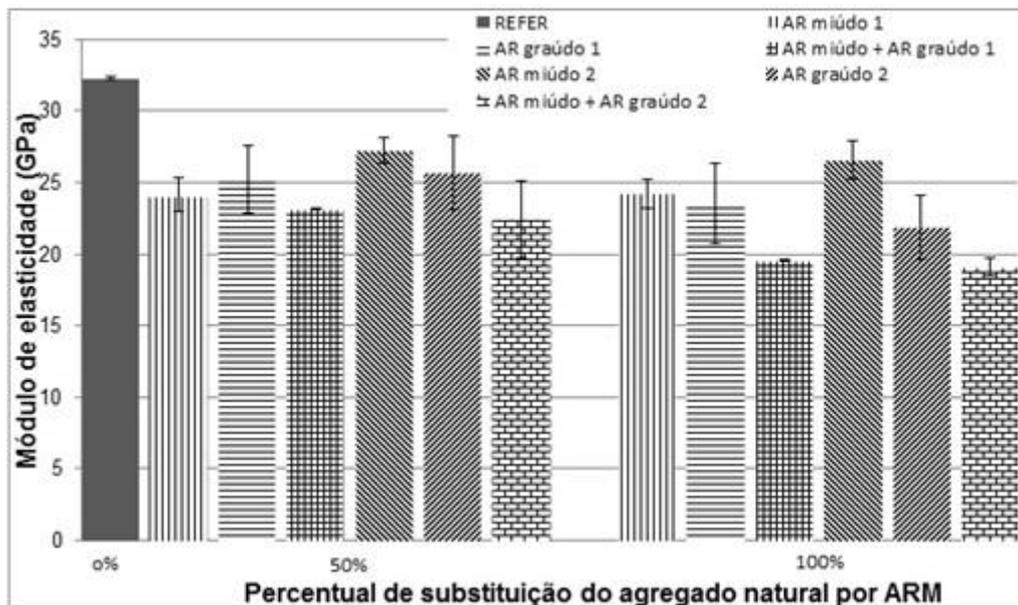


Figura 5: Resultados de ensaios de determinação de módulo de elasticidade sob compressão

4. DISCUSSÃO

4.1 Resistência à compressão axial

Dentre os concretos com somente incorporações de ARM graúdos, o que teve melhor desempenho à compressão foi a mistura CG050-1 e o pior desempenho foi o concreto CG100-1, que apresentaram reduções de 4,00% e 20,60% de resistência à compressão, respectivamente, em relação ao concreto de referência (REFER). Essas incorporações de ARM de ambas as coletas causaram redução de resistência à compressão em relação ao concreto REFER. Os concretos com agregados reciclados mistos de Bravo et al. [7] apresentaram a mesma tendência de redução à compressão, chegando a perdas superiores a 30% dessa propriedade. Devido aos ARM graúdos se apresentarem como partículas de menor resistência que os agregados naturais, os concretos produzidos apresentaram resistências menores do que a do concreto REFER. Segundo Soares et al. [6],

em países europeus, os quais já possuem normatização do uso de AR de RCD em concretos estruturais, há a limitação de 20% a 25% de substituição dos agregados graúdos naturais por graúdos reciclados.

Os concretos com o melhor e o pior desempenho dentre os concretos com substituições de AN miúdos por ARM miúdos foram os concretos CM050-2 e CM100-1, que obtiveram acréscimo de 18,05% e redução de 3,20% de resistência à compressão, respectivamente, em relação ao concreto REFER. O incremento de resistência dos concretos com ARM miúdos pode ser explicado pela atuação de fatores tais como a possível hidratação tardia de cimento não hidratado presente nos finos dos ARM miúdos, pela retenção de água absorvida por estes ARM, agindo como uma cura interna dos concretos e pela comprovada atividade pozolânica de partículas finas dos ARM miúdos inferiores a 45 μm .

Nos resultados de resistência à compressão das misturas com incorporação simultânea de ARM miúdos e graúdos, prevaleceu a redução de desempenho. De modo geral, essa substituição total dos AN graúdo e miúdo nos concretos tornou esses concretos os menos resistentes dentre os estudados. Houve redução da resistência dos concretos da primeira e da segunda coleta, de 24,95% e 25,90%, respectivamente, em comparação com o concreto REFER. A mistura C2050-2 foi a única a atingir a resistência característica à compressão esperada, sendo, ainda, inferior ao concreto REFER.

Ao serem comparados os desempenhos de cada uma das misturas de concreto da primeira coleta, com o desempenho das misturas de concretos semelhantes da segunda coleta, percebeu-se que a maior redução da primeira para a segunda coleta ocorreu nos concretos com substituição de 50% de ARM graúdos, com 14,75% de perda da resistência à compressão. Para os concretos com ARM miúdos, houve aumento da resistência do concreto produzido, com de 9,10% da primeira para segunda coleta.

A redução de desempenho dos concretos com 50% de ARM graúdos, da primeira para a segunda coleta, pode ser atribuída aos menores teores de grãos mais resistentes (partículas de concreto e rocha), como mostrado nas Figuras 1 e 2, além do maior teor de partículas de cerâmica vitrificada, que dificultam a aderência entre a argamassa e o agregado graúdo, presentes tanto na brita 0, quanto na brita 1, nos agregados produzidos da segunda coleta. Essas variações, apesar de não serem desprezíveis, também não são capazes de invalidar a produção para o tipo de concreto estudado, já que boa parte dos concretos com ARM alcançou a resistência esperada (20 MPa), mesmo com a utilização de teores muito acima dos que são comuns na prática de produção de concretos estruturais com agregados reciclados.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

As médias dos resultados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral do concreto REFER e dos concretos produzidos com ARM estão de acordo com o esperado, considerando a relação entre resistência à tração e resistência à compressão dos concretos. Conforme Mehta e Monteiro [29], essa relação costuma se situar entre 7% a 10%.

Oito dos doze concretos com ARM apresentaram valores de resistência à tração por compressão diametral semelhantes ou superiores ao do concreto REFER. As misturas em que foram apenas substituídos os agregados miúdos naturais por ARM apresentaram as maiores resistências à tração, destacando os concretos CM050-2 e CM100-1, que apresentaram aumento de 18,70% e 19,50%, respectivamente, em relação ao concreto REFER. Os mesmos fatores que podem explicar o bom desempenho dos concretos com ARM miúdos, sob compressão, também podem explicar o incremento de desempenho sob tração por compressão diametral desses concretos.

Concretos com ARM graúdos apresentaram redução de resistência à tração, em relação ao concreto REFER. Porém, essa redução foi mais intensa para os concretos com substituição total dos agregados graúdos. Os concretos CG100 e C2100 obtiveram resultados de redução da resistência à tração de até 11,25% e 19,50%, respectivamente, em comparação com o concreto de referência.

É possível analisar as variações entre os desempenhos sob tração indireta dos concretos com ARM das duas coletas pela mesma razão apresentada para a propriedade de resistência à compressão axial. Assim, as diferenças de valores obtidos para os concretos produzidos com ARM de coletas diferentes, apesar de não serem desprezíveis, também não são suficientes para invalidar sua utilização, já que o desempenho dos concretos com ARM estudados, para essa propriedade, manteve-se superior ao intervalo de resistência esperado.

4.3 Módulo de elasticidade

A substituição dos AN pelos ARM causou redução do módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados, por serem esses últimos mais porosos, portanto menos rígidos. No concreto, a relação direta entre resistência e módulo de elasticidade advém do fato que ambos são afetados pela porosidade das fases consti-

tuintes [28]. Assim, a porosidade dos agregados reciclados torna-se a principal causa dos decréscimos de rigidez notados nos concretos com ARM, em relação ao concreto REFER. A substituição dos AN por ARM representou perda significativa de módulo de elasticidade para todos os concretos estudados. Podem-se destacar os concretos CM050-2, como a menor redução dessa propriedade, com 15,75% de perda, e o concreto C2100-2, como a maior redução dessa propriedade, com 40,60% de perda, ambos comparados ao concreto REFER. Dilbas et al. [30], utilizando agregados reciclados de concretos e adições de 5% de sílica ativa na produção de concretos, apresentaram reduções de 21,60% do módulo de elasticidade.

Para as variações dos valores obtidos de módulo de elasticidade nos concretos com ARM da segunda coleta em relação aos da primeira coleta, observou-se que metade dos concretos (CM050, CM100 e CG050) apresentou aumento, enquanto a segunda metade (CG100, C2050 e C2100) apresentou redução desta propriedade na segunda coleta. Sendo CM050, CM100 e CG100 os concretos com maiores percentuais de variação, com valores de +13,35%, +9,40% e -7,00%, respectivamente.

O incremento do módulo de elasticidade dos concretos de segunda coleta, em relação aos da primeira, em que apenas foram substituídos agregados miúdos, pode ser explicada por melhorias de algumas das propriedades exibidas na caracterização física da areia reciclada, como por exemplo, aumento da massa específica real e diminuição da absorção de água. Já os concretos com ARM graúdos, com exceção do concreto CG050, obtiveram decréscimo dessa propriedade, o que pode ser creditado ao aumento do teor de materiais mais deformáveis que os agregados naturais na composição dos ARM graúdos da segunda coleta, em comparação com os ARM da primeira coleta, como por exemplo, redução dos teores de partículas de concreto e rocha, aumento do teor de partículas de argamassa e aumento do teor de partículas de cerâmicas, nas britas 1. Assim, pode-se creditar esse decréscimo de rigidez à maior porosidade do agregado do tipo ARM graúdo, pela presença em maior escala de partículas de argamassa e cerâmica. Em estudo anterior, Moreira [31] concluiu que a porosidade dos agregados foi o fator principal de influência no comportamento do concreto estrutural, no desempenho mecânico relacionado ao módulo de elasticidade, dentre outras propriedades.

5. CONCLUSÕES

Pode-se creditar o menor desempenho à compressão dos concretos com agregados graúdos do tipo ARM, em relação ao concreto de referência, à presença desses grãos pouco resistentes. No entanto, nesse estudo, todos os concretos produzidos, com substituição apenas da areia natural pelo ARM miúdo, apresentaram valores de resistência à compressão superiores ao valor da resistência de projeto. Os menores desempenhos à compressão foram observados para os concretos que tiveram substituição total dos agregados naturais pelos ARM, miúdos e graúdos. Assim, pode-se concluir que, para os ARM estudados, torna-se necessário limitar os teores de agregados reciclados, para obter melhoria dessa propriedade.

Torna-se importante notar que, neste estudo, as substituições dos agregados naturais por ARM foram de 50% e 100%. Normas europeias estabelecem limites de 20% a 25% de incorporação de agregados reciclados, mesmo assim, quando originados de resíduos de concretos [6].

Os concretos com ARM e de referência apresentaram resistência à tração por compressão diametral, com resultados superiores ao intervalo de 7% a 10% da resistência à compressão axial [28]. Para esta propriedade, apenas os quatro concretos com substituição total de ARM graúdos apresentaram redução, com valores entre 5,25% e 19,50%, em relação à resistência do concreto REFER. Os demais concretos obtiveram resultados similares ou superiores. A maior variação, entre os concretos com ARM das duas coletas, nessa propriedade, foi de 13,20%, especificamente para o concreto CM100.

A incorporação de teores de materiais mais deformáveis que as britas naturais resultou em redução do módulo de elasticidade dos concretos com ARM, em relação à referência. As reduções obtidas por esses concretos, nessa propriedade, ficaram no intervalo de 15,75% a 40,60%. A variação entre as duas coletas com maior significância foi observada para o concreto CM100, com valor de 13,35%.

Tomando-se os resultados de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, para os concretos com ARM da primeira coleta, foi possível perceber que, comparando-se com o desempenho do concreto de referência, as resistências à compressão das misturas com 50% e 100% de substituição do agregado natural tiveram reduções entre 3,2% e 20,6%, tendo havido acréscimo de 8,1% para o concreto CM050-1. Para os módulos de elasticidade dessas misturas, somente houve reduções, que variaram entre 22,2% e 27,3%, concluindo-se que essa propriedade mostrou-se mais sensível à presença de agregados ARM em sua composição.

As variações das propriedades dos concretos com ARM, em geral, não foram desprezíveis, porém, também não foram tão significativas, a ponto de invalidar a produção para o tipo de concreto proposto para esse estudo (f_{ck} de 20 MPa e classe de consistência S50). Foram obtidos resultados satisfatórios dos concre-

tos com ARM miúdos. Admite-se que as variações possam ser mitigadas com a redução dos teores de incorporação dos ARM. Destaca-se que os ARM em estudo foram fornecidos por uma usina de reciclagem, onde são recebidos e processados resíduos de variada composição, sem um controle rigoroso de depuração dos RCD. Desta forma, situações diversas devem ter levado à variabilidade de propriedades distintas. A geração de dados, obtidos a partir de ensaios de caracterização de agregados reciclados e dos concretos produzidos com estes insumos, torna-se fundamental para o alcance de alternativas para minorar fatores desencadeantes de redução da qualidade de componentes construtivos assim produzidos.

Além dos benefícios em termos de preservação ambiental, com a destinação adequada dos resíduos, acrescem-se ganhos econômicos, considerando-se que o custo desse insumo tem sido menor que o dos agregados naturais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, pela bolsa de estudos, e à Usina de Reciclagem Torre Empreendimentos, pela acolhida gentil e generosa de nosso pedido de fornecimento dos agregados reciclados de construção e demolição (RCD).

7. BIBLIOGRAFIA

[1] CARNEIRO, A. P., QUADROS, B. E. C., OLIVEIRA, A. M. V., *et al.*, “Características do entulho e do agregado reciclado”, In: CASSA, J. C. S. (ed), *Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção: Projeto Entulho Bom*, Salvador, Bahia, Brasil, EDUFBA, 2001.

[2] RODRIGUES, C. R. S., FUCALE, S. “Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil”, *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, pp. 99-111, 2014.

[3] SANTOS, C. O., CARVALHO, E. M., “Estudo da viabilidade financeira para implantação de uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição em Aracaju”, In: SANTOS, D. G. S. (Org), *Construção civil: Projeto, execução e manutenção*, São Cristóvão, Sergipe, Brasil, EDUFS, 2009.

[4] MELO, A. V. S., *Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil*, Dissertação de MSc., Escola Politécnica/UFBA, Salvador, BA, Brasil, 2011.

[5] ANGULO, S. C., JOHN, V. M., ULSEN, C., *et al.*, “Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição”, *Ambiente Construído*, v. 13, n. 2, pp. 61-73, 2013.

[6] SOARES, D., BRITO, D., FERREIRA, J., *et al.*, “Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance”, *Construction and Building Materials*, v.71, pp. 263-272, 2014.

[7] BRAVO, M., BRITO, J., PONTES, J., *et al.*, “Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants”, *Journal of Cleaner Production*, v. 99, pp. 59-74, 2015.

[8] TAM, V. W. Y., TAM, C. M. “Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong”, *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 879-886, 2006.

[9] MELO, A. V. S., FERREIRA, E. A. M., COSTA, D.B, “Fatores críticos para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de RCC da região Nordeste do Brasil”, *Ambiente Construído*, v. 13, n. 3, pp. 99-115, 2013.

[10] MESQUITA, J. M. C., MARTINS, H. C. “Avaliação dos impactos da sazonalidade da produção sobre os investimentos em estoques e lucratividade: Análise do segmento industrial brasileiro”, In: *Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais*, São Paulo, 2010.

[11] MALTA, J. O., SILVEIRA, V. S., GONÇALVES, J. P., *et al.*, “Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas”, *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, pp. 85-98, 2013.

[12] MIRANDA, L. F. R., ANGULO, S. C., CARELI, E.D. “A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008”, *Ambiente Construído*, v. 9, n. 1, pp. 57-71, 2009.

[13] ZORDAN, S. E., *A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto*, Dissertação de MSc., Faculdade de Engenharia Civil/ FEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1997.

[14] ANGULO, S. C., *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*, Dissertação de MSc, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.

- [15] ALTHEMAN, D., *Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil*. UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2002.
- [16] SANCHEZ, M., *Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hornigón Estructural*, Tese de D.Sc., Universidade Politécnica de Madri, Madri, 2004.
- [17] COELHO, A., BRITO, J., “Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - part I: location, materials, technology and economic analysis”, *Journal of Cleaner Production*, n. 39, pp. 338-352, 2013.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- [21] SIKA. bra.sika.com/.../Sika%20ViscoCrete%20Precast.pdf. Acessado em janeiro de 2016.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2004.
- [26] RODRIGUES, P. P. F., *ET-67 Parâmetros de dosagem do concreto*. 2a ed. São Paulo, ABCP, 1995.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [28] CABRAL, A. E. B., SCHALCH, V., MOLIN, D. C. C., *et al.*, “Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD”, *Minerva*, v. 4, n. 1, pp. 75-84, 2007.
- [29] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., *Concreto. Microestrutura, propriedades e Materiais*. São Paulo, IBRACON, 2008.
- [30] DILBAS, H., SIMSEK, M., ÇAKIR, O., “An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume”, *Construction and Building Materials*, v.61, pp. 50-59, 2014.
- [31] MOREIRA, L. H. H. *Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural*, Dissertação de MSc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2010.