

Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto

Assessment of static and dynamic modulus of elasticity in concrete made with recycled aggregate from concrete precast rejects

Victor Estolano¹, Stela Fucale², José Orlando Vieira Filho³
Diego Gabriel⁴, Yuri Alencar⁴

¹ Universidade de Pernambuco (UPE), Escola Politécnica de Pernambuco (POLI-UPE), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC-POLI). Rua Benfica, n. 455, Madalena, Recife-PE, CEP 50720-001. Bolsista de Mestrado do PEC-POLI (CAPES). e-mail: victorestolanolima@gmail.com

² Universidade de Pernambuco (UPE). Professora Associada ao PEC-POLI, Doutora em Engenharia Civil. e-mail: sfucale@yahoo.com.br

³ Universidade de Pernambuco (UPE), Departamento de Engenharia Civil. Professor Adjunto, Doutor em Engenharia Civil. e-mail: zeorlando@jovengenharia.com.br.

⁴ Universidade de Pernambuco (UPE). Graduando em Engenharia Civil. e-mail: y-alencar@hotmail.com, dg.diegogabriel@hotmail.com

RESUMO

A utilização de agregados reciclados em concretos pode trazer benefícios sociais e ambientais para a sociedade. Em uma indústria de pré-fabricados de concretos, os resíduos provenientes da produção contêm um alto potencial para reciclagem, entretanto tal viabilização depende da realização de ensaios com a finalidade de conhecer suas características físicas e mecânicas. Uma das propriedades afetadas é o módulo de elasticidade, que tende a decrescer com a substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados de concretos (ARC). Este trabalho tem os seguintes objetivos: comparar os resultados do módulo de elasticidade do concreto por dois métodos diferentes: o módulo de elasticidade estático (MEE), obtido por rompimento de corpos de prova por compressão, e o módulo de elasticidade dinâmico (MED), realizado por meio de um aparelho de ultrassom para uso específico em concreto; analisar a influência da substituição de agregado natural pelo ARC nos valores de MEE, MED, resistência à compressão simples, absorção, índice de vazios e massa específica; e verificar a existência de correlações entre os módulos de elasticidade e as propriedades do concreto, auxiliando na compreensão do comportamento do módulo de elasticidade. O ARC foi obtido após um beneficiamento de resíduos de concreto de uma indústria de pré-fabricados, resultando em agregados reciclados de três dimensões diferentes: 2,4 mm, 4,8 mm e 6,3 mm. Os agregados reciclados apresentaram valores maiores de absorção de água e material pulverulento e menor massa específica em comparação com os agregados naturais. As substituições foram realizadas em concretos de referência (C-ref) produzidos cotidianamente pela indústria: no concreto C1-ref, de consistência fluída, e no concreto C2-ref, de consistência seca. Foram produzidos concretos a partir da substituição da fração miúda dos agregados naturais pelos agregados reciclados em porcentagens de 30% e 50% no concreto C1-ref, nomeados respectivamente de C1-30 e C1-50, e a partir da substituição de 100% da parte miúda e graúda no concreto C2-ref, nomeado de C2-100. Corpos de prova cilíndricos foram moldados e foram realizados ensaios de MEE, MED, resistência à compressão simples (RCS) e absorção, determinando-se também o índice de vazios e a massa específica seca dos concretos. A intensidade das correlações foi analisada pela comparação entre os coeficientes de correlação (R) e determinação (R²). Os resultados de MEE e MED ficaram próximos entre si, as razões entre o MEE e o MED variaram entre 0,86 e 1,04, e foi determinada uma correlação entre os valores dos dois métodos, com R² = 0,9821. Os resultados mostraram uma queda de ambos os módulos de elasticidade dos concretos (MEE e MED) à proporção da percentagem de agregados miúdos reciclados (AMR). O concreto C2-100 obteve uma queda significativa de seu módulo de elasticidade, chegando a uma diminuição de 35% do valor no MEE.

A resistência à compressão simples não se mostrou afetada pela incorporação de agregados reciclados, e também não obteve uma boa correlação com os módulos de elasticidade. Foram obtidas fortes correlações entre os módulos de elasticidade e algumas propriedades, com coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,90. Conclui-se que ambos os métodos para obtenção do módulo de elasticidade podem representar resultados representativos. O módulo de elasticidade mostrou-se uma propriedade tão afetada pelas características dos agregados reciclados quanto a absorção e a massa específica.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto, concreto, módulo de elasticidade.

ABSTRACT

The use of recycled aggregates in concrete can bring social and environmental benefits to society. In concrete precast industry, the rejects from the production contain a high potential for recycling, however its feasibility depends on the realization of tests in order to know its physical and mechanical properties. One of the affected properties is the modulus of elasticity, which tends to decrease with the replacement of natural aggregates by the concrete recycled aggregates (ARC). This work aims to: compare the results of the concrete modulus of elasticity by two different methods: the static (MEE), obtained by compression, and the dynamic modulus of elasticity (MED) performed by means of an ultrasonic apparatus for specific use in concrete; analyze the influence of the substitution of natural aggregate by the ARC at the values of MEE, MED, compressive strength, water absorption, voids index and dry density; and verify the existence of relationships between the modulus of elasticity and concrete properties, aiding in understanding the behavior of concrete modulus of elasticity. ARC was obtained after pretreatment of concrete waste from a precast industry, resulting in recycled aggregates of three different sizes: 2.4 mm, 4.8 mm and 6.3 mm. The recycled aggregates showed higher values of water absorption and powder material, besides lower dry density in comparison with the natural aggregates. The substitutions were carried out on reference concrete (C-ref) produced daily by the industry: in the C1-ref concrete of fluid consistency and in the concrete C2-ref, of dry consistency. Concretes were made from the replacement of fine natural aggregates by the recycled aggregates in percentages of 30% and 50% in the C1-ref concrete, respectively named C1-30 and C1-50, and from the substitution of 100% of the whole weight of natural aggregate in the concrete C2-ref, named of C2-100. Cylindrical test specimens were used and MEE, MED, compressive strength (RCS) and water absorption tests were performed. Through the water absorption data, it was possible to obtain the values of voids index and the dry density. The intensity of the correlations was analyzed by the comparison between the correlation (R) and determination coefficients (R^2). The results of MEE and MED were close to each other, the reasons between the MEE and the MED varied between 0.86 and 1.04, and a relationship between the values of the two methods was determined, with $R^2 = 0.9821$. The results showed a decrease of both modulus of elasticity (MEE and MED) to the proportion of the percentage of recycled fine aggregates (AMR). C2-100 obtained a significant decreasing in its modulus of elasticity, reaching a decrease of 35% of the value in the MEE. The compressive strength was not affected by the incorporation of recycled aggregates, nor did it obtain a good correlation with the modulus of elasticity. Strong correlations were obtained between the modulus of elasticity and some properties, with coefficients of determination (R^2) greater than 0.90. It is concluded that both methods for obtaining the modulus of elasticity may have representative results. The modulus of elasticity of the concrete was so affected by the presence of ARC. The modulus of elasticity was shown to be a property so affected by the characteristics of the recycled aggregates as the absorption and the dry density.

Keywords: Concrete recycled aggregate, concrete, modulus of elasticity.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do agregado reciclado de concreto (ARC) na construção civil vem aumentando em todo o mundo, devido aos benefícios ambientais e sociais que o ARC traz. Apesar disso, a escassez de empresas que realizam o beneficiamento dos resíduos e o alto custo com maquinário ainda são barreiras que impedem que o preço do agregado reciclado seja atraente para o mercado consumidor. Outro fator de dúvida é o desempenho do ARC em comparação com o natural. Na literatura [17,18,25,31], observa-se que o agregado reciclado, de forma geral, apresenta valores menores de massa específica em comparação com o agregado natural, além de altos índices de absorção e material pulverulento. Segundo SOARES *et al.* [28], ainda não existe um consenso na literatura se a incorporação de ARC resulta na queda de desempenho mecânico do concreto.

O ARC apresenta, de forma geral, valores de massa maiores de específica e massa unitária e valores menores de absorção e material pulverulento em relação ao agregado reciclado misto (ARM), que é oriundo de resíduos de construção e demolição, e contém outros materiais como cerâmica e argamassa. Como as características dos agregados influenciam diretamente as propriedades do concreto, é factível afirmar que o ARC é um agregado de melhor qualidade, em comparação com o ARM.

A avaliação do desempenho mecânico de concreto engloba ensaios como resistência à compressão, e a análise do módulo de elasticidade. A realização destes ensaios permite conhecer as características do material,

e por eles pode-se verificar se são adequados para alguma aplicação específica, e assim conhecer como a incorporação do agregado reciclado implicará nas propriedades do concreto. Segundo SOUZA et al. [29], o conhecimento do módulo de elasticidade é de grande importância para a execução do projeto, pois o seu valor auxilia na previsão de deformações, no conhecimento das tensões entre o concreto e o aço das estruturas de concreto armado e protendido, além de contribuir para o cálculo das tensões resultantes de retração e de recalque. SILVA et al. [27] também afirma que o módulo de elasticidade é importante para o dimensionamento de estruturas no estado limite de serviço e controle da largura das fissuras.

Pesquisas mostram [16,19,23,28] que o valor do módulo de elasticidade cai à medida que se aumenta a quantidade de ARC. Isso se deve ao fato da porosidade influenciar a rigidez do concreto, pois quanto maior o teor agregado reciclado, maior é a porosidade do concreto, e, conseqüentemente, menor será sua rigidez e o seu módulo de elasticidade. Alguns autores obtiveram, em suas pesquisas, relações lineares entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial do concreto [3,15]. Outras pesquisas [16,26,27,28], entretanto, mostram que tal relação pode não existir, pois enquanto o módulo de elasticidade tende a diminuir com a incorporação de ARC, a resistência à compressão não é significativamente afetada. SILVA et al. [27] afirma que, ao contrário da resistência à compressão simples, que pode não ser afetada, as investigações relativas ao módulo de elasticidade sugerem que os valores desta propriedade diminuem significativamente com o aumento de ARC no concreto.

EVANGELISTA; BRITO [19] realizaram substituições em massa de agregados naturais por reciclados e encontraram, aos 28 dias, 59,4 MPa de resistência à compressão simples do concreto sem agregado reciclado, e valores de 61,3 MPa e 61,0 MPa, para substituições de 30% e 100%, respectivamente. Os valores de módulo de elasticidade decresceram à medida que aumentou a quantidade de ARC, obtendo 35,5 GPa para o concreto sem agregado reciclado e 34,2 GPa e 28,9 GPa para os concretos com 30% e 100% de substituição, respectivamente. SOARES *et al.* [28] encontrou 48,0 MPa e 36,2 MPa de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade para o concreto sem agregado reciclado, e no concreto com 100% de ARC, foram obtidos valores de 50,3 MPa e 32,1 GPa, de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade, respectivamente.

2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A utilização de ARC em concretos, no Brasil, está restrita a concretos não estruturais. Entretanto, em alguns países do mundo, como Portugal, Espanha, Reino Unido e Alemanha, sua utilização em concretos estruturais não é somente permitida, pois, nestes países é obrigatório o uso de pelo menos 20% de agregado reciclado de concreto (ARC) em concreto estrutural, desde que o ARC siga alguns pré-requisitos [27]. Deste modo, é importante a realização de trabalhos acadêmicos que colaborem com a viabilização do uso de agregados reciclados em concretos estruturais em países que ainda não possuem normas para este fim.

Em uma indústria de pré-fabricados de concreto, pode-se afirmar que o resíduo proveniente da produção de concreto tem um alto potencial para reciclagem, uma vez que ele não é misturado com outros materiais, como acontece, por exemplo, com o agregado reciclado misto (AMR) [30]. Esta pesquisa foi realizada em uma indústria com esse tipo de atividade, visando dar uma solução para os resíduos gerados e que estavam se acumulando em grandes volumes nas instalações da empresa.

Inicialmente foram identificados os pontos de geração de resíduos, e em seguida os resíduos foram moídos por um britador e caracterizados. Posteriormente, foi os traços de referência foram definidos, assim como as substituições dos agregados naturais pelos reciclados, que foram realizadas em massa, e então os concretos produzidos foram caracterizados por ensaios físicos e mecânicos. O foco se deu no módulo de elasticidade, pois é um parâmetro importante para o dimensionamento de estruturas e para a estimativa das deformações e fissuras de estruturas de concreto, principalmente na protensão que ocorre nas peças pré-fabricadas.

Este artigo tem o objetivo de analisar os resultados de ensaios de módulo de elasticidade estático (MEE) e dinâmico (MED) de concretos com agregado reciclado, analisar a influência do percentual de agregado reciclado nas propriedades físicas e mecânicas do concreto e verificar as relações de linearidade entre os resultados de MEE e MED com outras variáveis, como resistência à compressão simples, absorção de água, índice de vazios e massa específica seca, através do estudo de seus coeficientes de correlação (R) e determinação (R²). Como a incorporação de ARC tende a aumentar a porosidade, e conseqüentemente aumentar a absorção e diminuir o valor do módulo de elasticidade, estas duas propriedades (absorção e módulo de elasticidade) estão linearmente correlacionadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Definição e caracterização dos materiais

Os agregados naturais utilizados foram coletados na baía de agregados da indústria de pré-fabricados: areia fina natural (AFN), brita natural de dimensão máxima característica (DMC) igual a 12,5 cm (BN 12) e brita natural de DMC = 19 mm (BN 19). Ambas as britas são de origem granítica, e foram obtidas através de uma jazida localizada no município de Jaboatão dos Guararapes - PE.

Para obtenção dos agregados reciclados, foi necessário realizar um beneficiamento de resíduos de concretos oriundos de rejeitos de uma indústria de pré-fabricados localizada no Complexo Portuário de Suape, no município do Cabo de Santo Agostinho – PE, por meio de um britador de mandíbula e martelo (Figura 1a), de escala laboratorial.

Os rejeitos eram compostos de peças de concreto que ou eram reprovadas no processo de qualidade, ou apresentavam algum outro defeito estrutural que colocasse em risco o funcionamento adequado da estrutura. As peças eram lajes alveolares protendidas, produzidas pelo processo de extrusão do concreto seco, e também pilares e vigas protendidas e estacas centrifugadas. Em todos os traços eram utilizados um cimento CP – V ARI, areia fina oriunda do leito e de terraços fluviais do Rio Jaboatão, britas graníticas oriundas de jazidas exploradas no município de Jaboatão dos Guararapes e um aditivo superplastificante, que era utilizado para melhorar a trabalhabilidade do concreto.

Uma pilha de 5 m³ de resíduos de concreto foi separada para o programa experimental (Figura 1b). Após a britagem, foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento com os agregados reciclados, que foram nomeados de acordo com a sua DMC: o material fino, com aparência de pó, foi nomeado como areia fina reciclada (AFR); os outros materiais obtidos na britagem se assemelhavam a um pedrisco, e o agregado reciclado de DMC = 4,8 foi nomeado AR 4,8, e o agregado reciclado de DMC = 6,3 como AR 6,3. As normas utilizadas nos ensaios de caracterização estão na Tabela 1.

Os valores referentes às propriedades físicas obtidas nos ensaios de caracterização estão na Tabela 2. Observa-se que os agregados reciclados obtiveram valores maiores de absorção e material pulverulento, e valores menores de massa específica, em comparação com os agregados naturais. Tais características influenciam as propriedades dos concretos reciclados, uma vez que cerca de $\frac{3}{4}$ do concreto é composto por agregados [24]. No ensaio de Abrasão Los Angeles, o agregado reciclado AR 6,3 obteve um desgaste de 25,67% de sua massa, enquanto os agregados naturais BN 12 e BN 19 obtiveram 20,48% e 26,49% de desgaste à abrasão, respectivamente.

Tabela 1: Normas utilizadas na caracterização dos agregados

NORMA	ENSAIO
NBR NM 248 (ABNT, 2003) [8]	Composição granulométrica
NBR NM 52 (ABNT, 2009) [13]	Agregado miúdo – massa específica
NBR NM 30 (ABNT, 2001) [4]	Agregado miúdo – absorção de água
NBR NM 46 (ABNT, 2003) [7]	Material pulverulento
NBR NM 53 (ABNT, 2009) [12]	Agregado graúdo - massa específica e absorção de água
NBR NM 51 (ABNT, 2003) [5]	Abrasão Los Angeles



Figura 1: (a) Britador; (b) Pilha de resíduos de concreto separada para o programa experimental.

Tabela 2: Resultados de ensaios de caracterização dos agregados

Componente	Agregado natural			Agregado reciclado		
	A F N	B N 12	B N 19	A F R	A R 4,8	A R 6,3
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	12,5	19,0	2,4	4,8	6,3
Módulo de finura	1,99	6,24	8,27	1,84	4,12	4,66
Porcentagem retida acumulada (%)	19,0 mm	-	-	-	-	-
	12,5 mm	-	-	41,09	-	-
	9,5 mm	-	9,12	89,73	-	-
	6,3 mm	-	53,17	98,65	-	3,79
	4,8 mm	0,30	73,71	99,03	-	0,48
	2,4 mm	4,62	93,70	99,33	0,68	49,29
	1,2 mm	19,09	97,59	99,85	11,01	77,97
	600 µm	38,71	98,46	99,88	32,95	90,06
	300 µm	56,55	98,80	99,90	59,24	96,29
150 µm	79,65	99,09	99,90	80,28	98,44	
Absorção de água (%) – 24 h	0,53	1,12	0,72	12,65	7,58	7,55
Massa específica (g/cm ³)	2,54	2,61	2,62	2,36	2,39	2,44
Material pulverulento (%)	4,05	0,72	0,46	8,50	5,83	5,91
Abrasão Los Angeles (%)	-	20,48	26,49	-	-	25,67

3.2 Definição e produção de concretos

Após a caracterização dos agregados, foram definidos os parâmetros para os concretos a serem utilizados. O cimento utilizado em todos os traços da pesquisa foi o CP-V ARI, o mesmo adotado pela indústria, e é o tipo mais comumente usado em indústrias de pré-fabricados de concreto. O abatimento de tronco de cone foi fixado em conformidade com o abatimento estabelecido na indústria de pré-fabricados. Com isso, a relação água/cimento (a/c) variou à medida que a quantidade de agregado reciclado variou. Os traços de partida eram os mesmos utilizados na indústria, que foram separados em dois grupos: o primeiro, nomeado de grupo C1, um concreto fluído, de abatimento 230 ± 20 mm, utilizado na produção de vigas e pilares; e um segundo grupo, chamado C2, de consistência seca, usado na concretagem por extrusão de lajes alveolares. O aditivo utilizado foi o superplastificante MC Bauchemie Power Flow 3100, o mesmo que a indústria utilizou durante o período da pesquisa.

A Tabela 3 expõe as informações acerca dos traços originalmente utilizados pela indústria e tais informações foram obtidas junto ao setor de qualidade e tecnologia de concreto da indústria. Os concretos de referência, sem agregados reciclados, foram nomeados C1-ref e C2-ref. O grupo correspondente ao concreto C1-ref e suas substituições foi nomeado de grupo C1, e o grupo do concreto C2-ref e C2-100, de grupo C2.

Tabela 3: Informações dos concretos de referência originalmente utilizados pela indústria

Grupo do concreto	Traço unitário em massa (CIMENTO: AFN: B12: B19)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Relação a/c	Consumo de aditivo (% da massa de cimento)	Abatimento de tronco de cone (mm)	Resistência mínima aos 28 dias (Mpa)
C1-ref	1: 1,99: 0,59: 1,09	485	0,360	0,6	230 ± 20	45
C2-ref	1: 2,80: 2,54: 0	367	0,397	0,4	0	35

3.3 Determinação das características físicas e mecânicas dos concretos

A partir destes traços foram definidas as substituições dos agregados naturais pelos agregados reciclados de concreto: 30% e 50% para o grupo C1; e 100% para o grupo C2. As composições de cada concreto estão expostas na Tabela 4. Antes da produção definitiva dos concretos, foram realizados testes de dosagem, onde de maneira prática foram determinadas a quantidade de água de amassamento em cada traço, para se obter, nos concretos do grupo C1, um abatimento entre 210 e 250 mm. No grupo C2, como o abatimento do concreto para extrusão é nulo, a consistência do concreto foi analisada de forma tátil-visual pelo operador da extrusora, de forma que ambos os concretos (C2-ref e C2-100) contivessem a mesma trabalhabilidade e homogeneidade para serem moldados pela máquina. Nota-se que, nos concretos do grupo C1, a relação a/c variou pouco, enquanto no grupo C2 houve uma variação de 0,054.

A nomenclatura utilizada nos concretos do grupo C1 variou de acordo com a porcentagem de agregado reciclado em relação à massa total de agregado miúdo. Por exemplo, o concreto C1-30 continha 15% de AFR e 15% de AR 4,8, o que totaliza 30% de agregado miúdo reciclado, em comparação com a massa total de agregado miúdo. No grupo C2, o concreto C2-100 conteve uma substituição total de agregado natural pelo reciclado, ou seja, 100% de agregado reciclado tanto na parte miúda como na parte graúda.

Tabela 4: Composições dos concretos

Grupo do concreto	Nomenclatura	Porcentagem em relação à massa total de agregado miúdo			Porcentagem em relação à massa total de agregado graúdo			Fator de argamassa - α	Relação água/ m. secos (%)	Relação a/c	Abatimento (mm)
		A F N	A F R	A R 4,8	B N 12	B N 19	A R 6,3				
C1	C1-ref	100%	0%	0%	35%	65%	0%	0,547	7,71	0,360	240
C1	C1-30	70%	15%	15%	35%	65%	0%	0,547	7,84	0,362	230
C1	C1-50	50%	25%	25%	35%	65%	0%	0,547	7,86	0,367	220
C2	C2-ref	100%	0%	0%	100%	0%	0%	0,529	6,25	0,397	-
C2	C2-100	0%	100%	0%	0%	0%	100%	0,529	7,12	0,451	-

Foram realizados ensaios com corpos de prova de dimensões 10 x 20 cm, moldados conforme a norma NBR 5738 [14]. Os ensaios realizados e suas metodologias aplicadas estão dispostos na Tabela 5. Na impossibilidade de realizá-los aos 28 dias, devido à disponibilidade da empresa onde se realizaria o ensaio de módulo de elasticidade estático, todos os ensaios foram realizados aos 105 dias de cura.

Para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, foi obedecido o método da ASTM C 597 [2], onde foi utilizado um aparelho de ultrassom específico para uso em concreto (figura 2a;b). O ensaio de módulo de elasticidade estático foi realizado com base na NBR 8522 [9], com uso de uma prensa de compressão e *micro-strain gages* que aferem a deformação do concreto, como mostra a figura 2c.

Outros ensaios foram realizados, como resistência à compressão simples, absorção, índice de vazios e massa específica seca, com o objetivo de estabelecer correlações entre os valores destas propriedades e os módulos de elasticidade (MEE e MED).

Tabela 5: Ensaios e metodologias utilizadas no programa experimental

Ensaio	Metodologia	Número total de corpos de prova utilizados
Resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos de concreto (RCS)	NBR 5739 (ABNT, 2007) [9]	70
Módulo de elasticidade estático de concreto (MEE)	NBR 8522 (ABNT, 2008) [10]	25
Módulo de elasticidade dinâmico de concreto por ultrassom (MED)	C 597 (ASTM, 2009) [2]	70
Absorção, índice de vazios e massa específica do concreto	NBR 9778 (ANBT, 2009) [11]	36



Figura 2: (a;b) Ultrassom e o ensaio de MED; (c) Prensa utilizada no ensaio de MEE

3.4 Análises estatísticas dos dados

Nos resultados, foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados para obtenção de parâmetros como média, desvio padrão e o coeficiente de variação. Também foi realizada uma análise da influencia do percentual de agregado miúdo reciclado (AMR) nas propriedades dos concretos, através de retas de regressão linear.

Para verificar a intensidade da correlação, os coeficientes de correlação (R) e os coeficientes de determinação (R^2) foram analisados. O coeficiente de determinação é o poder de explicação da amostra, ou seja, ele mede o quanto a equação de regressão linear pode explicar o fenômeno ocorrido. Os coeficientes de correlação medem o grau de correlação entre duas variáveis numa escala métrica intervalar ou de razão e variam de -1 a 1. Quando os coeficientes de correlação apresentaram um valor de $R > 0,90$ (em módulo), fica caracterizado uma forte correlação entre as variáveis. O sinal positivo indica que os valores da escala das ordenadas aumentaram conforme os valores das abscissas também vão aumentando. Quando ocorre o contrário, o sinal do R é negativo, conforme ocorreram nas propriedades de MEE, MED e massa específica seca.

Além disso, foram feitas análises de relações de linearidade entre os módulos de elasticidade (MEE e MED) e as demais propriedades: resistência à compressão simples, absorção, índice de vazios e massa específica seca.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados médios da resistência à compressão simples (RCS), do módulo de elasticidade dinâmico (MED), do módulo de elasticidade estático (MEE), da absorção, do índice de vazios e da massa específica seca.

Na RCS, o concreto C1-30 apresentou o maior valor, 87,13 MPa, seguido pelos concretos C1-50 e C1-ref, com valores de 84,81 e 84,69 MPa, respectivamente. No grupo C2, o concreto C2-ref apresentou uma resistência à compressão de 73,58 MPa, apresentando 19,72 MPa a mais que o concreto C2-100. O desvio padrão das amostras se manteve entre 2,50 e 4,30 MPa, e os coeficientes de variaram de 5,97% a 11,61%, obtidos nos concretos C2-ref e C2-100, respectivamente. EVANGELISTA; BRITO [19] afirmam que uma explicação razoável para a manutenção da resistência do concreto com a incorporação de agregados finos reciclados é o fato de eles conterem partículas de cimento, tanto hidratadas como não hidratadas, que correspondem a 25% do total de seu peso, aumentando a quantidade total de cimento na mistura.

Com relação aos módulos de elasticidade (MEE e MED), observou-se que ambos apresentaram uma diminuição à medida que a quantidade de agregado reciclado foi aumentada. Os concretos C1-0 e C2-0, que não contêm agregado reciclado, foram os que apresentaram os maiores valores, com 42,03 GPa e 43,50 GPa no ensaio de MEE, respectivamente, e 40,30 GPa e 42,23 GPa no ensaio de MED, respectivamente. No MEE, o concreto C1-30 apresentou um valor de 40,74 GPa, o que representa uma queda de 3,07% em relação ao C1-0. EVANGELISTA; BRITO [19] calcularam uma queda de 3,70% do MEE do concreto com 30% de ARC fino, em relação ao concreto sem ARC. Os desvios calculados no MED variaram entre 2,63 e 4,52 GPa e apresentaram valores maiores em relação ao MEE, cujos desvios ficaram entre 0,29 e 0,59 GPa. Isso pode ter acontecido também devido à amostragem, que foi diferente para cada um dos ensaios.

Os resultados de absorção, índice de vazios e massa específica seca também foram influenciados pela quantidade de agregado reciclado. Nota-se que houve um aumento da absorção e do índice de vazios e uma diminuição da massa específica seca na medida em que se aumentou a quantidade de agregados reciclados.

Os concretos C1-ref e C2-ref foram os que apresentaram os menores valores de absorção e índice de vazios e os maiores valores de massa específica seca. O concreto C2-100 apresentou os maiores valores de absorção e massa específica.

Tabela 6: Resultados de RCS, MEE, MED, absorção, índice de vazios e massa específica seca.

Ensaio/ Concreto	Parâmetro	C1-ref	C1-30	C1-50	C2-ref	C2-100
Relação a/c		0,360	0,362	0,367	0,397	0,451
Abatimento (mm)		240	230	220	-	-
RCS (MPa)	Média	84,69	87,13	84,81	73,58	53,86
	Desvio padrão	3,47	4,26	3,81	2,55	3,5
	Coef. de var. (%)	8,36	10,77	9,08	5,97	11,61
MEE (GPa)	Média	42,03	40,74	38,95	43,50	28,11
	Desvio padrão	0,33	0,59	0,52	0,29	0,29
	Coef. de var. (%)	0,79	1,45	1,34	0,67	1,03
MED (GPa)	Média	40,30	39,44	39,13	42,23	32,67
	Desvio padrão	3,80	3,19	4,52	2,74	2,63
	Coef. de var. (%)	9,43	8,08	11,55	6,49	8,04
Absorção após 72 horas (%)	Média	2,89	3,55	4,08	2,57	6,15
	Desvio padrão	0,26	0,42	0,18	0,17	0,38
	Coef. de var. (%)	9,00	11,71	4,39	6,57	6,20
Índice de vazios	Média	0,069	0,082	0,093	0,061	0,128
	Desvio padrão	0,0060	0,0092	0,0040	0,0040	0,0068
	Coef. de var. (%)	8,77	11,25	4,27	6,52	5,33
Massa específica seca (g/cm ³)	Média	2,375	2,312	2,272	2,371	2,088
	Desvio padrão	0,020	0,016	0,020	0,006	0,020
	Coef. de var. (%)	0,83	0,71	0,91	0,23	0,95

A diferença entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos foi menor, em comparação com o módulo de elasticidade estático. É notável que o ensaio de MED, neste caso, tendeu a posicionar os resultados num intervalo com amplitude menor, em relação ao ensaio de MEE (figura 3a). Houve uma correlação linear as médias dos módulos de elasticidade, que pôde ser representada pela equação $y = 1,6846x - 26,616$ com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9821$. Ou seja, pode-se afirmar que a correlação entre o MED e o MEE pode ser explicada pela equação dada em 98,21% dos casos. ALMEIDA [1] realizou ensaios de MEE e MED em concretos de diferentes traços, e no gráfico de regressão linear entre as variáveis encontrou coeficiente de determinação $R^2 = 0,971$.

Tal correlação também sugere que, em condições controladas, o ensaio de ultrassom (MED) pode substituir o ensaio de módulo de elasticidade por compressão (MEE), desde que a equação de regressão seja conhecida.

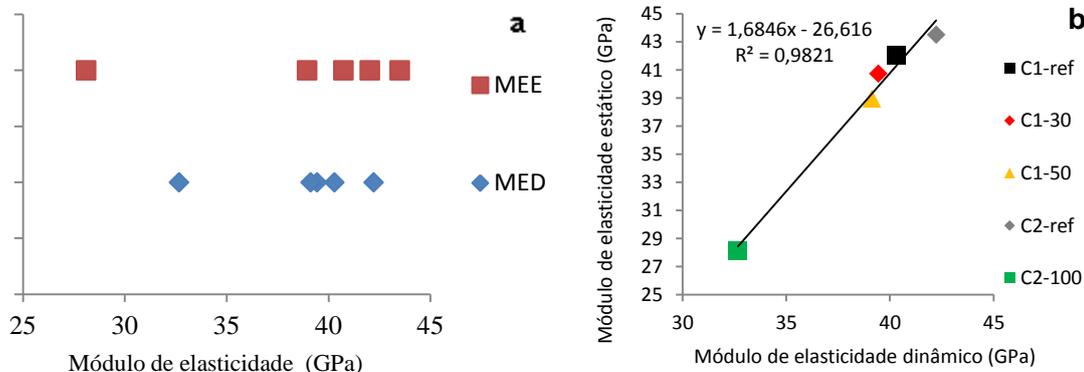


Figura 3: (a) Análise dos intervalos dos resultados de MEE e MED; (b) Regressão linear da relação entre os valores de MEE e MED.

A Tabela 7 expõe os valores dos módulos de elasticidade e a diferença absoluta e proporcional entre

eles. Observa-se, nos concretos do grupo C1, que a diferença entre os valores diminuiu com o aumento da quantidade de ARC. Enquanto o concreto C1-0 apresentou a maior diferença, de 1,74 GPa, o concreto C1-50 apresentou uma diferença de 0,18 GPa, com o MED apresentando um valor superior ao MEE. No grupo C2, o concreto C2-100 obteve uma diferença superior em relação a C2-0, com 4,56 GPa de diferença. De forma geral, os resultados de MEE e MED foram próximos entre si, e as razões MEE/MED variaram entre 0,86 e 1,04.

Tabela 7: Diferenças entre os resultados dos ensaios de MEE e MED.

Concreto	MEE (GPa)	MED (GPa)	Diferença (MEE – MED)	Razão (MEE/MED)
C1-ref	42,03	40,29	1,74	1,04
C1-30	40,74	39,44	1,30	1,03
C1-50	38,95	39,13	-0,18	0,99
C2-ref	43,5	42,23	1,27	1,03
C2-100	28,11	32,67	-4,56	0,86

Inicialmente, para os concretos do grupo C1 (C1-ref, C1-30 e C1-50), foi realizado um estudo para verificar o aumento ou decréscimo dos valores das propriedades em função da quantidade de agregado reciclado miúdo (ARM), que é composto pelo agregado fino reciclado (AFR) e pelo agregado reciclado de diâmetro máximo 4,8 mm (AR 4,8). A figura 6 mostra estas relações através de gráficos, onde o eixo das ordenadas é a relação C1-ref/C1-X, ou seja, a razão entre o valor da propriedade do concreto C1-ref e o valor dos concretos C1-30 e C1-50. Os valores do concreto C1-ref, então, servem como referência para os outros concretos.

Foram encontradas relações lineares entre a porcentagem de substituição de agregado miúdo natural pelo reciclado, com exceção da RCS. A falta de correlação linear entre a quantidade de agregados reciclados e a RCS também foi encontrada por EVANGELISTA; BRITO [19] e SOARES *et al.*[28]. A absorção e o índice de vazios cresceram com o aumento de AMR, como previsto por SOARES *et al.* [28] e EVANGELISTA; BRITO [19]. Houve uma diminuição dos módulos de elasticidade e da massa específica, previstas por SOARES *et al.* [28], LI [22] e EVANGELISTA; BRITO [19]. SOARES *et al.* [28] encontrou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9095$ da reta de regressão linear entre a relação C1-ref/C1-X e a porcentagem de agregado reciclado graúdo no módulo de elasticidade estático.

A tabela 8 mostra as equações de regressão linear e seus coeficientes de determinação (R^2) e correlação (R) em cada propriedade. Pode-se afirmar que um alto valor do R^2 também implicará num alto valor do R , conforme ocorreu nesta pesquisa.

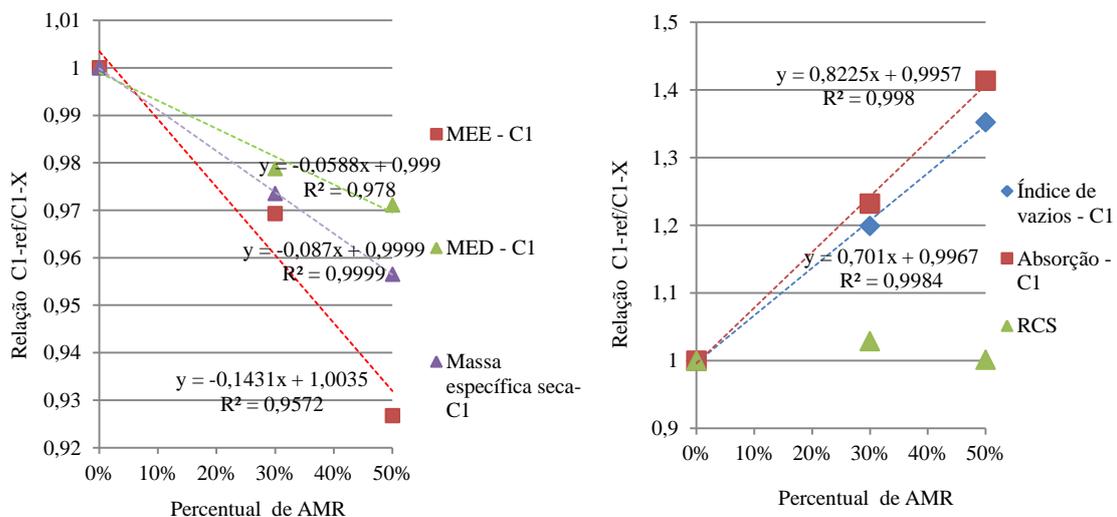


Figura 4: Regressões lineares entre a relação C1-0/C1-X e a quantidade de AMR, por propriedade.

Tabela 8: Equações, coeficientes de determinação e força das correlações obtidas entre os valores das propriedades e quantidade de AMR.

Propriedade	Equação	Coefficiente de determinação (R ²)	Coefficiente de correlação (R)
RCS	-	< 0,1	0,1579
MEE	$y = -0,1431x + 1,0035$	0,9572	-0,9783
MED	$y = -0,0588x + 0,999$	0,9780	-0,9889
Índice de vazios	$y = 0,701x + 0,9967$	0,9984	0,9992
Absorção	$y = 0,8225x + 0,9957$	0,9980	0,9990
Massa específica seca	$y = -0,087x + 0,9999$	0,9999	-0,9999

Em uma etapa posterior, foram estudadas as correlações entre os módulos de elasticidade e os valores dos outros ensaios realizados. A figura 4 mostra a correlação entre a RCS e os módulos de elasticidade e seus respectivos coeficientes de determinação.

Observa-se que, de forma geral, não foram obtidas correlações altas, e os coeficientes de determinação encontrados foram $R^2 = 0,6616$ para a equação de regressão linear entre o MEE e a RCS e $R^2 = 0,5660$ para a correlação entre o MED e a RCS. Os pontos do grupo C2 ficaram distantes da reta de regressão linear, expondo uma falta de correlação entre os pontos dos grupos C1 e C2, em ambos os gráficos. Segundo BRITO; ROBLES [16], a incorporação de ARC no concreto é responsável diretamente pela queda do módulo de elasticidade do concreto. Entretanto, com relação à RCS, ainda não existe um consenso se existe relação de queda ou aumento dessa propriedade com o aumento de ARC [27].

Foram encontradas altas correlações entre os módulos de elasticidade e as variáveis: índice de vazios, absorção e massa específica, conforme mostra a figura 5. As retas de regressão linear obtiveram coeficientes de determinação $R^2 > 0,90$ em todos os casos, ou seja, os modelos estatísticos conseguiram explicar com alta eficiência os valores observados.

A relação entre o módulo de elasticidade e outras propriedades como índice de vazios, absorção e massa específica estão diretamente conectadas com as propriedades do ARC. Segundo SOARES *et al.* [28], a argamassa aderida às partículas do ARC são responsáveis por diminuir sua massa específica, e a forma lamelar de seus grãos resulta num encaixe das partículas responsável pela formação de vazios no concreto, aumentando sua porosidade. Tais fatores são responsáveis por diminuir a massa específica do concreto, e por aumentar a absorção e o índice de vazios. Desta forma, é de se esperar que haja uma correlação direta entre essas propriedades, fato que aconteceu nesta pesquisa.

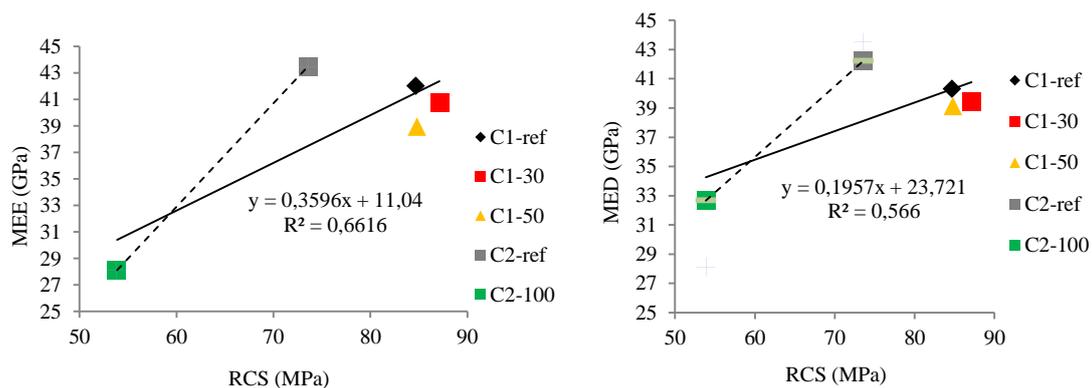


Figura 5: Regressões lineares das correlações entre os módulos de elasticidade e a RCS.

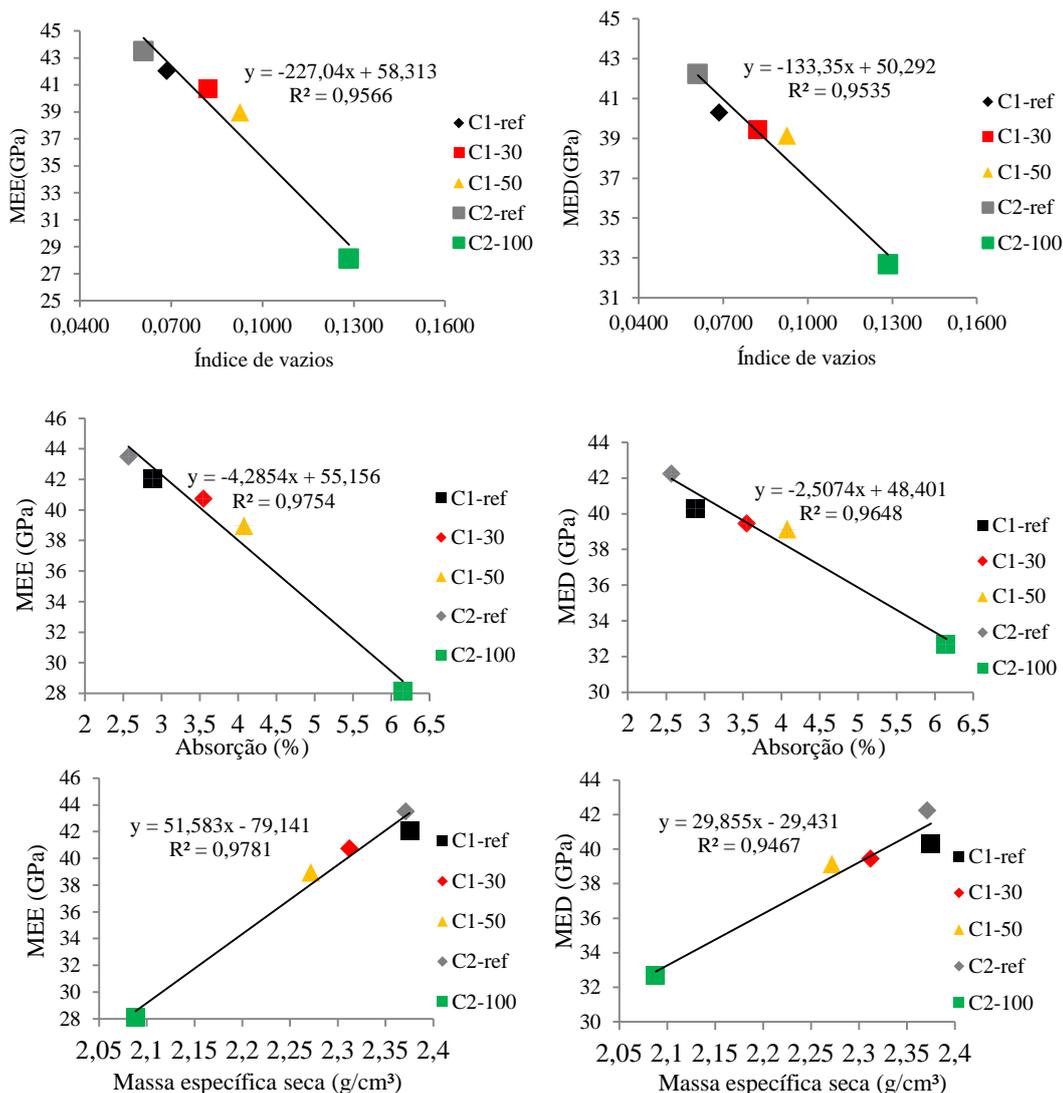


Figura 6: Regressões lineares entre os módulos de elasticidade e índice de vazios, absorção e massa específica seca.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, são colocadas a seguir as conclusões obtidas nesta pesquisa:

Os valores do módulo de elasticidade estático (MEE) se aproximaram aos valores do módulo de elasticidade dinâmico (MED), mesmo o MEE apresentando uma maior amplitude de seus resultados em comparação com o MED. Foi obtida uma relação linear entre os valores dos dois ensaios, sugerindo que ambos os métodos podem ser utilizados para encontrar o módulo de elasticidade do concreto, desde que a relação proporcional entre eles seja conhecida.

Os valores de MEE e MED decresceram linearmente à medida que a quantidade de AMR aumentou. Tal fenômeno era esperado uma vez que a literatura [16,19,23,28] obtida concluía que a incorporação de agregado reciclado no concreto acarreta na queda do módulo do seu módulo de elasticidade. Outras propriedades também apresentaram comportamento semelhante como índice de vazios, absorção e massa específica, que foram influenciados pela substituição do agregado natural pelo ARC, e tais influências foram verificadas pelas retas de regressão linear, e foram obtidos coeficientes de determinação $R^2 > 0,95$.

A resistência à compressão simples (RCS), no grupo C1, não apresentou uma relação de linearidade com o percentual de AMR. As substituições não interferiram nesta propriedade, uma vez que a relação a/c se manteve praticamente a mesma. Tais conclusões também obtidas por [16,26,27,28]. É comum em concretos reciclados, segundo os autores [27,28], que enquanto o módulo de elasticidade decresce, a RCS não é afetada pelas características do agregado reciclado.

Foram encontradas relações de linearidade, também com altos coeficientes de determinação entre os módulos de elasticidade (MEE e MED) e as propriedades de absorção, índice de vazios e massa específica. As rela-

ções encontradas comprovam o que foi dito na literatura, pois com o aumento da quantidade de agregado reciclado no concreto, o qual absorve mais água, tem maior teor de material pulverulento e ainda possui uma menor massa específica, em comparação com o agregado natural. Tais características foram repassadas às matrizes dos novos concretos, e isso levou ao aumento da absorção e do índice de vazios, e à queda da massa específica dos concretos. Esses fatores também sugerem um aumento da porosidade, que contribuiu para a diminuição da rigidez do concreto, e consequentemente para a queda dos módulos de elasticidade.

A substituição total, de 100% de agregados naturais por reciclados, obtida no concreto C2-100 mostrou que este teor de substituição deve ser empregado com cautela em um concreto estrutural, uma vez que houve quedas significativas dos módulos de elasticidade (35,4 % de queda no MEE), e aumentos de grandes proporções no índice de vazios e na absorção, comparando o C2-100 com o C2-ref.

O presente trabalho evidenciou que o módulo de elasticidade é uma propriedade sensível à incorporação de ARC, e é tão afetado quanto a absorção e a massa específica. Com a diminuição do módulo de elasticidade do concreto, as deformações tendem a aumentar e este fato tem de ser levado em consideração no dimensionamento de estruturas de concreto armado e protendido.

Considerando a importância da reciclagem de concreto na redução de impactos ambientais, acredita-se que ele possa ser utilizado como concreto estrutural, dependendo dos parâmetros de resistência do projeto. Em substituições totais, recomenda-se utilizar aditivos mais avançados, e utilizar técnicas para diminuir o teor de material pulverulento do ARC, e assim frear o aumento da relação a/c na mistura.

Para analisar de forma mais profunda a influência do uso de ARC em estruturas de concreto, destacam-se três propostas de continuidade da pesquisa: 1. Realização de ensaios de flexão em vigas pré-fabricadas, a fim de avaliar a fissuração, a carga e o tipo de ruptura, e assim comparar o desempenho de cada concreto; 2. Utilização de uma maior quantidade de teores de substituição, como 10%, 20%, 30%, 50% e 100%; 3. Avaliação dos efeitos do ARC em concretos protendidos, como a avaliação das perdas de protensão, da formação de fissuras durante a protensão e da aderência das cordoalhas no concreto.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à indústria de pré-fabricados de concreto, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro e estrutural para realização deste trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] ALMEIDA, S.M. *Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante*, Dissertação de M.Sc, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 597. Standard method for pulse velocity through concrete. Philadelphia, USA, 2009.
- [3] ANGULO, S.C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2005.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30. Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- [5] _____. NBR NM 51. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.
- [6] _____. NBR 52. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.
- [7] _____. NM 46. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- [8] _____. NBR 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [9] _____. NBR 5739. Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [10] _____. NBR 8522. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- [11] _____. NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, v. 2, 2009.

- [12] _____. NM 53. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- [13] _____. NM 52. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [14] _____. NBR 5738. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- [15] BENETTI, J.K. *Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto*, Dissertação de M.Sc., Universidade do Vale do Rio Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil, 2012.
- [16] BRITO, J., ROBLES, R. “Recycled aggregate concrete methodology for estimate its long term properties”, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, v.17, n.6, pp.449-462, Dec. 2010.
- [17] BRITO, J., SOARES, D., FERREIRA, J., PACHECO, J. “*In situ* materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures”, *Construction and Building Materials*, v.71, pp.237-245, Sep. 2014.
- [18] CAVALCANTI, N.L.Q. *Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados graúdos de resíduos da construção civil*, Dissertação de M.Sc., Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), Recife, PE, Brasil, 2014.
- [19] EVANGELISTA, L., BRITO, J. “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates”. *Cement & Concrete Composites*, v. 29, pp. 397-401, Jan. 2007.
- [20] EVANGELISTA, L., BRITO, J. “Permeability properties of fine recycled aggregate concrete”. In: *4th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*. Limassol, Cyprus, 23-25 June, 2016.
- [21] KOU, S.C., POON, C.S. “Enhancing the durability of concrete prepared with coarse recycled aggregate”, *Construction and building materials*, v. 35, pp. 69-76, Oct. 2012.
- [22] LI, X. “Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete”, *Resources, Conservation and Recycling*, v.53, pp. 34-44, Nov. 2008.
- [23] MEHTA, K.P., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestruturas, propriedades e materiais*, 1ª Ed, São Paulo, IBRACON, 2008.
- [24] NEVILLE, A.M. *Propriedades do concreto*, Editora Pini, 2 ed., 1997.
- [25] PEREZ-BENEDICTO, J.A., RÍO-MERINO, M., PERALTA-CANUDO, J.L., *et al.*, “Características mecánicas de hermigones con áridos reciclados procedentes de lós rechazos en prefabricación”, *Materiales de Construcción*, v. 62, pp. 25-37, enero 2012.
- [26] RODRIGUES, C.R.S. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil*, Dissertação de M.Sc., Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2011.
- [27] SILVA, R.V., BRITO, J., EVANGELISTA, L., *et al.*, “Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2”, *Construction and Building Materials*, v. 105, pp. 144-156, Dec. 2015.
- [28] SOARES, D., BRITO, J., FERREIRA, J., *et al.*, “Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance”, *Construction and Building Materials*, v. 71, pp. 237-245, Sep. 2014.
- [29] SOUZA, P.S.L., MOLIN, D.C.C., PICANÇO, M.S., *et al.*, “Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial”. *Matéria (Rio J.)*, v. 20, n. 4, pp. 982-991, Out. 2015.
- [30] TOKUDOME, M. “A sustentabilidade da indústria de pré-fabricados”, In: *1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado*, São Carlos, SP, Brasil, 2005.
- [31] WERLE, A.P. *Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação*, Dissertação de M.Sc., UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil, 2010.