

HAC2018 | V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais

Valência, 5 e 6 de Março de 2018

Efeito dos agregados graúdos reciclados nas propriedades de concretos autoadensáveis dosados por empacotamento de partículas

Ivanny S. G. Cavaliere⁽¹⁾, Renan S. Campos⁽²⁾, Mônica P. Barbosa⁽³⁾
e Ana E. P. G. A. Jacintho⁽¹⁾

⁽¹⁾ Faculdade de Engenharia Civil - PUC Campinas, Campinas/SP, Brasil

⁽²⁾ Departamento de Engenharia Mecânica - FEIS/UNESP - Ilha Solteira/SP, Brasil

⁽³⁾ Departamento de Engenharia Civil - FEIS/UNESP - Ilha Solteira/SP, Brasil

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5621>

RESUMO

A construção civil é responsável por significativos impactos ambientais, uma vez que é expressiva consumidora de recursos naturais e grande geradora de resíduos sólidos. A utilização de agregados reciclados pode ser uma alternativa para a mitigação de tais impactos. Por essa razão, o objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento, nos estados fresco e endurecido, de concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com agregados graúdos reciclados e dosados por meio do conceito de empacotamento de partículas. Foram analisadas quatro composições de CAA, sendo que a primeira empregou apenas agregados naturais, e serviu de referência para este estudo. Nas demais misturas foram utilizados agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição em substituição à brita natural, em teores de 20, 50 e 100%, em massa. Os resultados obtidos demonstraram que todas as composições apresentaram desempenho satisfatório no estado fresco, porém, verificou-se que as propriedades mecânicas decresceram consoante o aumento no teor de agregado reciclado.

PALAVRAS-CHAVE: concreto autoadensável; agregados reciclados; empacotamento de partículas; resíduos de construção e demolição; sustentabilidade.

1.- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor da construção civil consome elevada quantidade de recursos naturais, e por consequência, torna-se um expressivo gerador de resíduos de construção e demolição (RCD) [1]. Tais resíduos são diversas vezes descartados em locais impróprios, impactando significativamente o meio ambiente [2].

Diante desse cenário, o controle dos resíduos de RCD minimiza tanto o consumo de recursos minerais, como pode ser considerado uma alternativa viável e ecológica para a

produção de concretos [3]. Em vista disso, o objetivo do presente trabalho foi transformar os agregados de RCD como fonte alternativa de matéria-prima dentro do próprio setor da construção civil, por meio da incorporação dos agregados graúdos reciclados na produção do concreto autoadensável (CAA).

O CAA é um concreto especial capaz de fluir no interior da forma, por ação exclusiva de seu próprio peso, sem a necessidade de vibração mecânica, devendo apresentar habilidade passante, sem bloqueio das partículas de agregado. Além disso, deve possuir resistência à segregação e exsudação, para assim garantir a vida útil das estruturas [4].

A dosagem do concreto, em especial do CAA, deve ser baseada em uma criteriosa seleção e combinação dos materiais constituintes. Nesse sentido, a dosagem das composições desse trabalho empregou o conceito de empacotamento de partículas, o qual é definido por McGeary [5] como a correta seleção da proporção e tamanho adequado dos materiais particulados, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores, e assim sucessivamente.

Diante disso, foram produzidas quatro composições de CAA com agregados graúdos reciclados, com a finalidade de analisar comparativamente o desempenho no estado fresco e endurecido desses concretos. A composição de referência, empregou exclusivamente agregados graúdos naturais, já nas demais composições foram utilizados agregados graúdos reciclados em substituição aos naturais, em proporções de 20, 50 e 100%, em massa.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1.- Seleção e Caracterização dos materiais

Foram utilizados nesse estudo: cimento CP II E 32, sílica ativa, pó de quartzo, agregados miúdos e graúdos naturais, agregados graúdos reciclados de RCD, aditivo superplastificante à base de policarboxilatos e água.

O cimento, a sílica ativa e o pó de quartzo apresentaram massa específica igual a 3,134 g/cm³, 2,192 g/cm³ e 2,776 g/cm³, respectivamente, determinada de acordo com o procedimento de ensaio da NBR NM 23:2001 [6].

A caracterização física dos agregados foi determinada por meio dos ensaios regidos pelas normativas brasileiras [7-11], e os resultados obtidos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização física dos agregados.

Determinações	Brita 1	Pedrisco natural	Brita reciclada	Pedrisco reciclado	Areia média	Areia fina	Areia cava
Diâmetro máximo (mm)	19,0	9,50	19,00	9,50	4,75	0,60	2,36
Módulo de Finura	6,81	5,86	6,81	5,81	1,62	0,41	1,51
Massa específica seca (g/cm ³)	2,63	2,90	2,40	2,82	2,66	2,67	2,50
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,39	1,58	1,24	1,45	1,62	1,44	1,20
Índice de vazios (%)	47,07	45,49	48,18	46,96	39,25	46,02	52,19
Absorção de água (%)	0,86	1,80	5,93	3,32	ND	ND	ND
Teor de pulverulentos (%)	0,13	0,07	0,49	0,47	1,58	0,91	6,42

ND: não determinado.

As curvas granulométricas dos agregados foram determinadas conforme a NBR NM 248:2003 [7], enquanto a distribuição granulométrica do cimento e das adições minerais foram obtidas por ensaio de granulometria a *laser*, sendo os resultados apresentados na Figura 1.

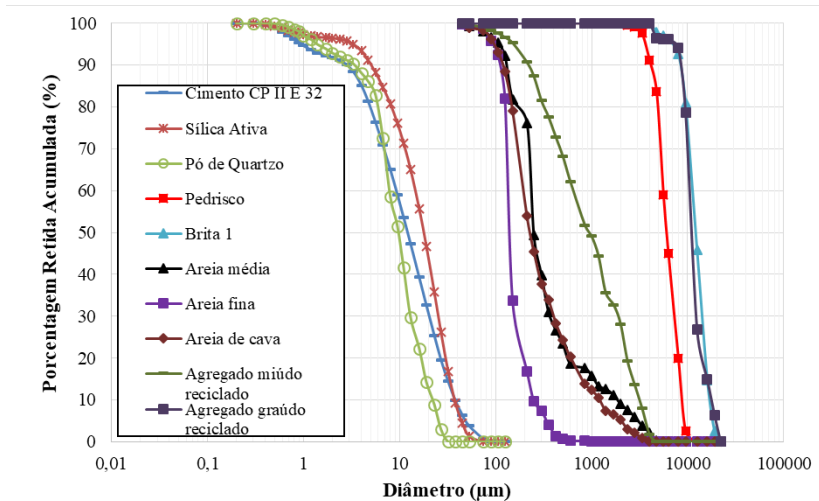


Figura 1. Curvas granulométricas dos materiais particulados.

A composição dos agregados graúdos reciclados utilizados nesse trabalho foi obtida por análise visual conforme a NBR 15116:2004 [12] orienta, e constatou-se predominância de fragmentos concreto, argamassa e rocha natural, totalizando 98,7% da composição dos agregados reciclados, de modo que os mesmos foram classificados como agregado de resíduo de concreto (ARC), em conformidade com a referida norma.

2.2.- Dosagem

Para a dosagem do concreto de referência (REF-E), produzido somente com agregados naturais, foi empregado o modelo de Alfred ou de Andreasen modificado, estabelecido por [13]. Tal modelo apresenta maior eficiência no empacotamento e também é mais adequado para sistemas particulados reais [14]. A representação matemática do modelo de Alfred é apresentada na Eq. (1).

$$CPFT (\%) = \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (1)$$

Onde: CPFT(%) – porcentagem volumétricas das partículas menores que D;
D – diâmetro da partícula;
D_L – diâmetro da maior partícula;
D_s – diâmetro da menor partícula;
q – coeficiente de distribuição.

Segundo Vanderley [15], o coeficiente “q” deve assumir valores entre 0,20 e 0,25 para a produção de concretos autoadensáveis. Nesse trabalho foi adotado o coeficiente “q” igual a 0,25, e os parâmetros de dosagem D_s = 0,5µm e D_L = 16000 µm foram determinados em função dos materiais particulados empregados. A dosagem da mistura REF-E foi efetuada com auxílio do software EMMA Mix Analyzer [16], que é fundamentado no modelo de Alfred.

2.3.- Métodos de Ensaio

O desempenho das composições do concreto autoadensável no estado fresco foi avaliado por meio dos ensaios prescritos pelas normas brasileiras pertinentes [17-20]. No estado endurecido foram determinadas as resistências à compressão axial [21], à tração por compressão diametral [22] e o módulo de elasticidade estático [23].

3.- RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1.- Dosagem

A dosagem da composição de referência (REF-E) é disposta no Quadro 2, assim como a das demais composições que utilizaram agregados graúdos reciclados em substituição aos naturais, em proporções de 20% (AGR20-E), 50% (AGR50-E) e 100% (AGR100-E), em massa.

Quadro 2. Dosagem das composições estudadas (kg/m³).

<i>Materiais</i>	<i>REF-E</i>	<i>AGR20-E</i>	<i>AGR50-E</i>	<i>AGR100-E</i>
Cimento	358,10	358,10	358,10	358,10
Sílica ativa	54,67	54,67	54,67	54,67
Pó de quartzo	130,88	130,88	130,88	130,88
Brita natural	434,41	347,53	217,20	-
Pedrisco natural	422,24	337,79	211,12	-
Pedrisco reciclado	-	84,45	211,12	422,24
Agregado graúdo reciclado	-	86,88	217,20	434,41
Areia média	627,95	627,95	627,95	627,95
Areia fina	38,43	38,43	38,43	38,43
Areia cava	93,56	93,56	93,56	93,56
Aditivo superplastificante	3,58	3,58	3,58	3,49
Água	Amassamento	220,60	220,60	220,60
	Pré-molhagem	-	7,68	19,19

Os agregados reciclados foram submetidos à pré-molhagem, conforme recomenda a NBR 15116:2004 [12], sendo a água de pré-molhagem correspondente a 80% da capacidade de absorção de água do agregado.

3.2.- Desempenho no Estado Fresco

De acordo com a NBR 15823-1:2010 [24], o concreto autoadensável deve apresentar: espalhamento de 550 mm, no mínimo, e de 850 mm, no máximo; relação entre as alturas final e inicial (H_2/H_1) maior ou igual a 0,80; tempo de fluxo no funil V, de no máximo, 25 s; e, segregação menor ou igual a 20%, no máximo, no ensaio de coluna de segregação. Assim sendo, no Quadro 3 é apresentado o desempenho de cada composição de CAA estudada.

Quadro 3. Desempenho dos concretos no estado fresco.

<i>Composições</i>	<i>Espalhamento (mm)</i>	<i>t₅₀₀ (s)</i>	<i>Caixa L</i>	<i>Funil V (s)</i>	<i>Segregação (%)</i>
REF-E	678	2,73	0,86	5,91	0,00
AGR20-E	685	1,60	0,75	5,36	10,46
AGR50-E	645	ND	0,71	ND	7,47
AGR100-E	558	2,44	ND	6,24	10,41

ND: não determinado.

Conforme análise do Quadro 3, todas as composições estudadas apresentaram desempenho satisfatório perante os ensaios de espalhamento, tempo de escoamento t_{500} e no funil V, e de

resistência à segregação. Contudo, a medida que aumentou a incorporação de agregados reciclados, resultou em perda de habilidade passante dos concretos autoadensáveis. Fato este também observado por [25], que justificaram tal ocorrência em virtude da alta absorção de água dos agregados reciclados.

No presente estudo, a perda de habilidade passante dos CAA's pode ter ocorrido por conta da substituição em massa dos agregados naturais por reciclados, que por apresentar massa específica inferior à do agregado natural, acabam por aumentar o volume de agregados graúdos na mistura para uma quantidade fixa de argamassa, de modo que, há menos argamassa para garantir a mobilidade das partículas de agregado graúdo e também há menor afastamento entre essas partículas, fatores esses que podem contribuir para a perda de habilidade passante.

3.3.- Desempenho no Estado Endurecido

3.3.1.- Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos concretos foi determinada para as idades de 3, 7 e 28 dias, sendo os resultados apresentados na Figura 2.

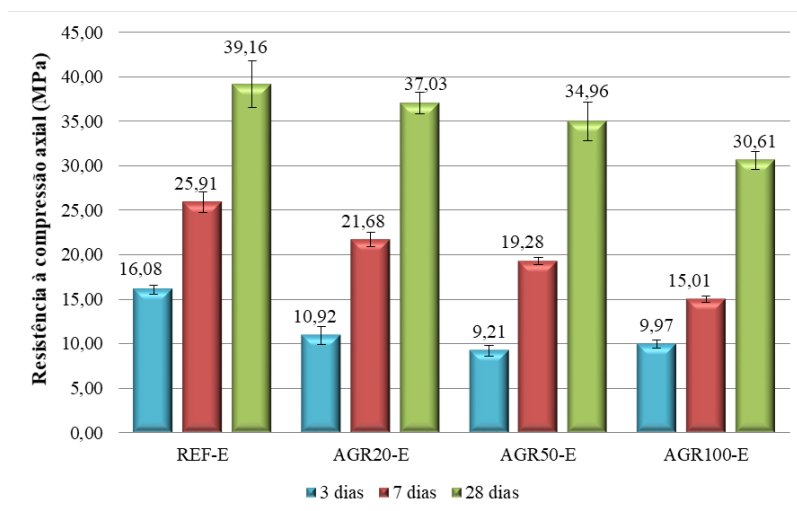


Figura 2. Evolução da resistência à compressão axial dos concretos estudados.

Através da análise da Figura 2, foi possível verificar que conforme houve o aumento no teor de substituição do agregado graúdo natural por reciclado, a resistência à compressão dos concretos foi reduzida. Esta redução ocorreu devido às propriedades dos agregados reciclados, os quais apresentam alta absorção de água e baixa massa específica. Semelhantemente, a presença de fissuras transversais nos agregados reciclados e a existência de pasta de cimento porosa aderida às partículas podem ter favorecido a redução da resistência à compressão [3, 26].

Por um outro lado, acredita-se que a técnica de empacotamento de partículas proporcionou melhorias no esqueleto granular das composições de CAA, sendo possível obter resistências maiores que 30 MPa aos 28 dias para todas as composições estudadas. Como também, garantiu similaridade de resistência da composição AGR20-E em relação ao concreto referência.

3.3.2.- Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral das composições de CAA são apresentadas na Figura 3.

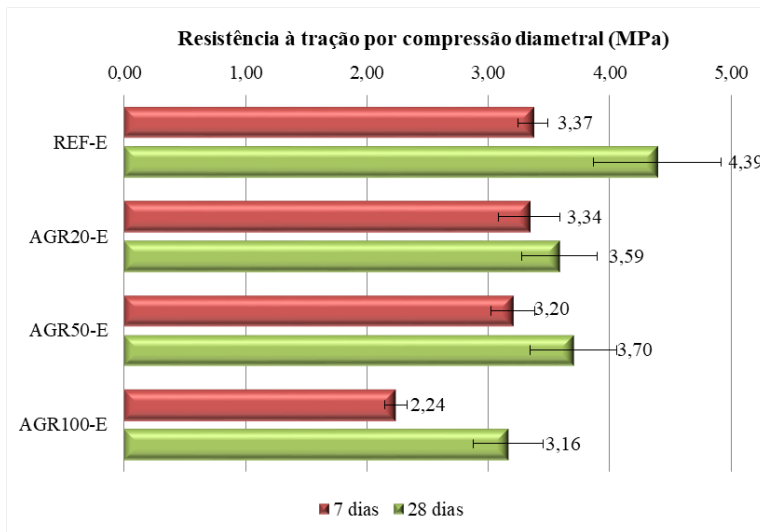


Figura 3. Resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados.

As composições que empregaram agregados reciclados apresentaram redução na resistência à tração por compressão diametral de modo similar ao observado para a resistência à compressão axial. Segundo Mehta e Monteiro [26], as resistências à compressão e as resistências à tração se correlacionam intimamente, isto é, conforme aumenta a resistência à compressão, também cresce a resistência à tração, porém de modo mais lento. Ainda, os mesmos autores dizem que a relação resistência à tração/compressão deve estar entre 7% e 11%. Nesse sentido, a relação resistência à tração/compressão dos concretos com agregados reciclados do presente estudo variou entre 9,70% à 10,58%, e o concreto referência apresentou relação igual a 11,21%. De mesmo modo, [26, 28] notaram diminuição na resistência à tração em concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados.

3.3.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos concretos foi analisado aos 28 dias, e a média dos valores é ilustrada na Figura 4.

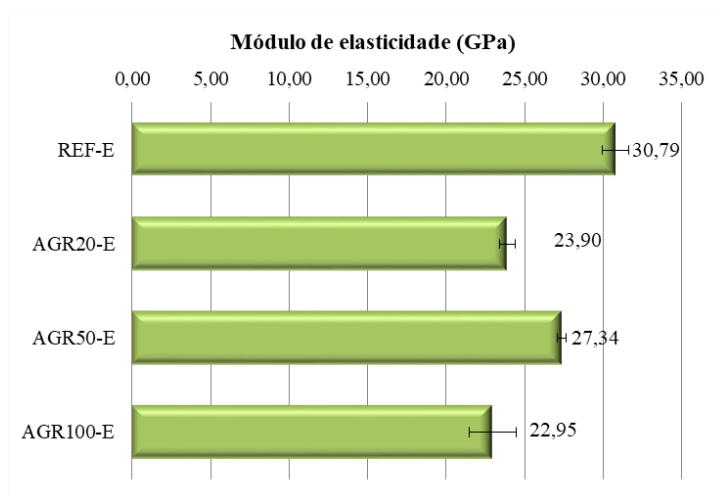


Figura 4. Módulo de elasticidade das composições estudadas.

O módulo de elasticidade do concreto é dependente do módulo de elasticidade dos agregados utilizados. Por isso, com o aumento da incorporação dos agregados reciclados na mistura, os quais possuem módulo de elasticidade menor que os agregados naturais, é previsto redução do módulo de elasticidade dos concretos [29].

Assim sendo, comparado ao concreto referência, todas as composições com agregados reciclados apresentaram redução no módulo de elasticidade. No entanto, não foi encontrada uma relação clara entre o percentual de incorporação e a redução desta propriedade das composições estudadas. [28] relataram diminuição do módulo de elasticidade, entre 13,12% a 18,42%, dos concretos autoadensáveis produzidos com emprego total de agregados graúdos reciclados. E semelhantemente, [29] observou a redução de 13,71% desta propriedade em composições onde houve substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado, na proporção de 20%.

4.- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados apresentados nesse trabalho, pôde-se concluir:

- O comportamento no estado fresco de todas as misturas foi similar, contudo foi notada perda sistemática de habilidade passante conforme o aumento no teor de agregados reciclados;
- A diminuição observada nas propriedades mecânicas dos concretos que empregaram agregados reciclados, em comparação ao concreto referência, é reflexo das propriedades desses agregados, os quais apresentam elevada absorção de água e menor massa específica, em comparação aos agregados naturais;
- A substituição de 20% de agregado graúdo natural por reciclado não prejudicou significativamente as resistências à compressão e à tração por compressão diametral, no entanto, foi notada redução expressiva no módulo de elasticidade.

- A técnica de empacotamento de partículas beneficiou o esqueleto granular das composições de CAA, proporcionando resistência à compressão axial superior a 30 MPa aos 28 dias para todas as composições estudadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Usina Recicladora de Hortolândia, à Lafarge-Holcim do Brasil, à Tecnosil, à Grace Construction Products e à Beneficiamento de Minérios Rio Claro pela doação dos materiais utilizados nessa pesquisa, e a ABCP pela realização dos ensaios de granulometria a *laser*. A primeira autora agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- [1] Souza, L.M., Assis, C.D. e Souto, S.B.G., ‘Agregado reciclado: um novo material da construção civil’, Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Digital, 18 (1) (2014) 273-278.
- [2] Tang, W.C., Ryan, P.C., Cui, H.Z. e Liao, W., ‘Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate’, Hindawi Publishing Corporation, (2016).
- [3] Silva, Y.F., Robayon, R.A., Matthey, P.E. e Delvasto, S., ‘Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete’, Construction and Building Materials, 124 (2016) 639-644.
- [4] Okamura, H. e Ouchi, M., ‘Self-compacting concrete’, Journal of Advanced Concrete Technology, 1 (1) (2003) 5-15.
- [5] McGeary, R.K., ‘Mechanical packing of spherical particles’, Journal of the American Ceramic Society, 44 (10) (1961) 513-522.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, ‘NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica’, 2001, 5p.
- [7] ‘NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica’, 2003, 6p.
- [8] ‘NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente’, 2009, 6p.
- [9] ‘NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água’, 2009, 8p.
- [10] ‘NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios’, 2002, 8p.
- [11] ‘NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m’, 2003, 6p.
- [12] ‘NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos’, 2004, 12p.
- [13] Funk, J.E., Dinger, D., ‘Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing’, (Springer Science, New York, 1994).

Efeito dos agregados graúdos reciclados nas propriedades de concretos autoadensáveis...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [14] Oliveira, C. O., 'Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas', Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira (2013).
- [15] Vanderlei, R. D., 'Análise experimental do concreto pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas', Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos (2004).
- [16] Elkem. Emma Mix Analiser. Disponível em: < <https://www.elkem.com/download-centre/?query=&tags=Concrete&cat=3> >. Acesso em: 25 fev 2017.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 'NBR 15823-2: Concreto auto-adensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams', 2010, 8p.
- [18] 'NBR 15823-5: Concreto auto-adensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do Funil V', 2010, 7p.
- [19] 'NBR 15823-4: Concreto auto-adensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L', 2010, 8p.
- [20] 'NBR 15823-6: Concreto auto-adensável – Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação, 2010, 7p.
- [21] 'NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos', 2007, 9p.
- [22] 'NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos', 2011, 5p.
- [23] 'NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão', 2008, 16p.
- [24] 'NBR 15823-1: Concreto auto-adensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco', 2010, 11p.
- [25] Carro-López, D. et al., 'Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates', *Construction and Building Materials*, 96 (2015) 491-501.
- [26] Campos, R.S., 'Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas', Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas (2017).
- [27] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M., 'Concreto: microestrutura, propriedades e materiais', (IBRACON, São Paulo, 2014).
- [28] Gesoglu, M. et al., 'Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 334-344.
- [29] Grdic, Z.J. et al. 'Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate', *Construction and Building materials*, 24 (7) (2010) 1129-1133.