



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 645704

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

Valência, 5 e 6 de Março de 2018

Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto

Mayara Amario ⁽¹⁾, Marco Pepe ⁽²⁾ e Romildo D. Toledo Filho ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

⁽²⁾ Universidade de Salerno, Itália.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.7237>

RESUMO

O presente estudo avalia a influência de agregados de resíduo de concreto (ARC) no comportamento reológico de concretos reciclados no estado fresco. De fato, a elevada porosidade dos agregados e sua angularidade modificam a trabalhabilidade dos concretos contendo ARC. Portanto, esse é um estudo preliminar que tem como objetivo estender ferramentas conceituais para concretos contendo agregados reciclados, como por exemplo, o modelo de Bingham simplificado, cuja aplicação para concretos convencionais já está bem consolidada. Para isso, diferentes ensaios experimentais foram realizados a fim de investigar os efeitos das propriedades dos ARCs no comportamento no estado fresco de concretos reciclados. Os resultados obtidos demonstram que, de fato, os ARCs modificam as propriedades reológicas dos concretos, aumentando a sua trabalhabilidade e diminuindo sua tensão de escoamento. Além disso, suas propriedades são altamente relacionadas com a condição de umidade inicial dos agregados.

PALAVRAS-CHAVE: reologia, trabalhabilidade, agregado reciclado de concreto, absorção de água.

1.- INTRODUÇÃO

O concreto é certamente o material de construção mais utilizado no mundo e, conseqüentemente, sua produção exige grande quantidade de matérias-primas e energia, resultando em um esgotamento significativo dos recursos naturais [1]. Além disso, a indústria de concreto também é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de gases do efeito estufa [2].

Por essas razões, nas últimas décadas, diversos grupos de pesquisa estão investigando a possível aplicação de materiais e processos mais sustentáveis destinados a tornar a indústria de concreto mais ecológica e uma das soluções mais promissoras para atingir esse objetivo é a substituição parcial ou total de agregados naturais por reciclados para a produção de concreto estrutural [3], [4], [5]. Os resíduos de demolição de elementos de concreto podem

Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

ser utilizados como materiais alternativos (geralmente denominados agregados de resíduo de concreto, ARCs) para a produção de novos elementos de concretos.

Os ARCs são compostos por agregados naturais e argamassa aderida aos grãos. A presença dessa argamassa aumenta a porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água dos agregados reciclados, em comparação com os agregados naturais [6]. Assim, devido às características intrínsecas dos ARCs, a definição de relações capazes de prever as propriedades relevantes dos concretos reciclados ainda é considerada uma questão em aberto [7]. Nos últimos anos, a comunidade científica concentrou-se principalmente na compreensão do comportamento mecânico dos concretos reciclados no estado endurecido [8], [9], [10], [11] e apenas alguns estudos analisaram suas propriedades no estado fresco [12], [13].

Concretos contendo somente agregados naturais com abatimentos de tronco de cone maiores que 8 cm e sem segregação por ação gravitacional podem ser considerados como um fluido de Bingham [14]. Por este modelo, o concreto pode ser descrito por pelo menos dois parâmetros, isto é, tensão de escoamento e viscosidade plástica. No entanto, para concretos auto adensáveis, esse modelo não é aplicável e o modelo de Herschel-Bulkley representa melhor suas propriedades do estado fresco [15].

A angularidade, a rugosidade e a elevada absorção de água dos ARCs são os principais fatores que influenciam as propriedades do concreto no estado fresco [16]. Essa alta absorção de água resulta na redução da água livre disponível para as reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, da relação água/cimento [17]. Assim, é necessário determinar a quantidade de água absorvida pelo ARC e compensá-la durante a mistura, pois isso pode afetar a trabalhabilidade do concreto.

Nesse contexto, esse é um estudo preliminar que teve como objetivo analisar a influência das propriedades de ARCs no comportamento reológico de concretos reciclados produzidos com esse tipo de agregado. Como a alta porosidade dos agregados, sua forma angular e a condição de umidade inicial são fatores importantes para a modificação da reologia, este estudo destina-se a avaliar experimentalmente o comportamento reológico de concretos no estado fresco para, futuramente, estender mecanismos conceituais aos concretos reciclados, como o modelo simplificado de Bingham. Assim, ensaios experimentais foram realizados a fim de investigar os efeitos de propriedades que caracterizam os ARCs no desempenho de concretos reciclados no estado fresco. Além disso, foram realizados ensaios de resistência à compressão para avaliar a classe de resistência dessas misturas de concreto e a influência da reologia nas propriedades mecânicas.

Por fim, vale ressaltar que esse trabalho é resultado do projeto internacional SUPERCONCRETE (H2020-MSCA-RISE-2014 – n. 645704), financiado pela União Europeia como parte do Programa H2020.

2.- MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.- Materiais

O cimento utilizado nesse estudo foi um cimento de alta resistência inicial, de acordo com a NBR 5733 [18]. O superplastificante utilizado foi o *Glenium 51*, um aditivo a base de policarboxilato com teor de sólidos de 30% e massa específica de 1,087 g/cm³. Ele foi utilizado em todas as misturas para controle de trabalhabilidade.

Foi utilizado como agregado miúdo uma areia natural com diâmetro nominal menor que 4,75 mm e dois tipos de agregados graúdos, um com diâmetro nominal entre 4,75 a 9,5 mm (brita 0) e outro com diâmetro entre 9,5 e 19 mm (brita 1). Os agregados graúdos reciclados ARCs com os mesmos diâmetros nominais dos naturais foram obtidos a partir da demolição parcial do Hospital Universitário da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foi realizado um processo de limpeza autógena para reduzir a quantidade de materiais finos aderidos à superfície dos agregados reciclados. Nesse processo, os agregados reciclados são colocados no tambor de um moinho rotativo e os grãos colidem uns com os outros, enquanto removem as frações de argamassa aderida. O tambor foi preenchido com 33% de agregados reciclados e a taxa de rotação foi de 60 rotações por minuto. Posteriormente, os agregados foram limpos com água e secos para remover todas as partículas finas residuais. Esse tipo de agregado foi denominado ARC_cl e apresentou as mesmas classes de diâmetro nominal que o ARC sem processo de limpeza. As propriedades físicas dos agregados utilizados nesse estudo são apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Propriedades físicas dos agregados

<i>Materiais</i>		<i>Diâmetro nominal</i> [mm]	<i>Massa específica – γ</i> [kg/m ³]	<i>Absorção de água – A</i> [%]
Natural	Areia	0-4,75	2668	1,4
	Brita 0	4,75-9,5	2464	3,39
	Brita 1	9,5-19	2634	1,28
ARC	Brita 0	4,75-9,5	1946	11,94
	Brita 1	9,5-19	2268	4,94
ARC_cl	Brita 0	4,75-9,5	2261	5,56
	Brita 1	9,5-19	2328	4,09

2.2.- Composição das misturas de concreto

Cinco misturas diferentes foram desenvolvidas para analisar o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados originais (ARC) e limpos (ARC_cl). Inicialmente, uma mistura de referência, indicada como REF, foi composta por apenas agregados naturais e feita com 50% de Areia, 25% de Brita 0 e 25% de Brita 1, em relação ao volume total de agregados. Com base nessa mistura, foram desenvolvidas quatro misturas adicionais, denominadas ARC25, ARC50, ARC25cl e ARC50cl. Nas misturas ARC25 e ARC25cl, 25% dos agregados naturais foram substituídos por agregados reciclados com e sem limpeza autógena, respectivamente. Neste caso, a substituição foi realizada apenas na

Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

fração Brita 0. Nas misturas ARC50 e ARC50cl, a substituição foi realizada tanto na classe Brita 0 quanto na classe Brita 1.

Todas as misturas foram produzidas com 300 kg/m³ de cimento e com uma relação água/cimento de 0,53. Foi adicionado um acréscimo de água baseado nos resultados de ensaios de absorção de água a fim de compensar a absorção tanto dos agregados naturais quanto dos reciclado na condição seca. A quantidade de água livre, água adicional e água total são apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2. Água livre, água adicional e água total para cada mistura de concreto

Misturas	Cimento [kg]	Água _{livre} [l]	Água _{Adicional} [l]	Água _{total} [l]
REF	300	160	31,4	191,4
ARC25	300	160	45,4	205,4
ARC50	300	160	71,8	231,8
ARC25cl	300	160	44,2	204,2
ARC50cl	300	160	55,0	215,0

As composições de cada mistura de concreto são mostradas na **Tabela 3**.

Tabela 3. Composição das misturas de concreto

Misturas	SP [kg]	Materiais naturais			ARC		ARC cl	
		Areia [kg]	Brita 0 [kg]	Brita 1 [kg]	Brita 0 [kg]	Brita 1 [kg]	Brita 0 [kg]	Brita 1 [kg]
REF	4,0	952,6	470,2	439,9	-	-	-	-
ARC25	4,0	951,7	-	439,5	404,5	-	-	-
ARC50	4,0	950,4	-	-	404,0	346,6	-	-
ARC25cl	4,0	952,4	-	439,8	-	-	459,3	-
ARC50cl	4,0	952,7	-	-	-	-	459,4	461,7

2.3.- Métodos

O processo de mistura foi realizado de acordo com o procedimento a seguir:

1. Os agregados, tanto grão quanto miúdo, foram adicionados ao misturador e misturados por 90 segundos;
2. O cimento foi adicionado e misturado por mais 90 segundos;
3. Cerca de 70% da água total foi adicionada aos agregados e, em seguida, foram misturados por 60 segundos;
4. Por fim, foram adicionados tanto o superplastificante quanto o restante da água e esses materiais foram misturados por 10 minutos.

Os ensaios do estado fresco foram realizados imediatamente após o término da mistura e, posteriormente, foi iniciada a moldagem dos corpos de prova. Para isso, o concreto foi

colocado em moldes cilíndricos, em três camadas e com vibração em mesa vibratória entre elas, a fim de remover o ar aprisionado. Após 24 horas, as amostras foram desmoldadas e colocadas em câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, e mantidas até a idade dos ensaios de resistência à compressão.

As propriedades do estado fresco foram determinadas através de ensaios de abatimento de tronco de cone [19], densidade e de reologia [20]. Os ensaios reológicos foram realizados no reômetro BTRHEOM, um equipamento de pratos paralelos para ensaios em concretos (Figura 1). Nesse estudo, cada ensaio de reologia foi feito com curvas de escoamento com dez pontos, na qual foram medidos tanto em velocidades de rotação crescentes quanto decrescentes, variando entre 0,2 e 0,8 rev/s. As medições foram realizadas sem aplicar vibração e sob temperatura constante (22 ± 2 °C).

No estado endurecido, a resistência à compressão uniaxial foi determinada de acordo com a NBR 5739 [21], após 2, 7, 14, 28 e 60 dias de cura, utilizando corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm (diâmetro x altura). Os ensaios foram realizados com velocidade de 0,1 mm/min em prensa servo controlada *Shimadzu 1000 kN*.

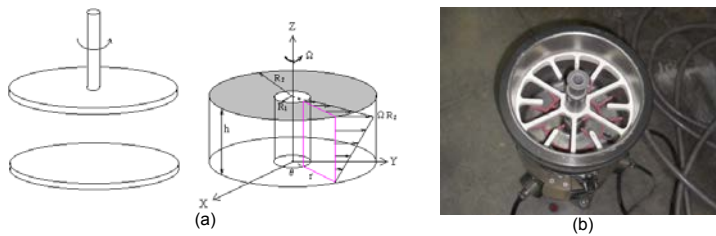


Figura 1. Reômetro BTRHEOM: mecanismo de funcionamento (a) e detalhes do equipamento

3.- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados das propriedades do estado fresco são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades do estado fresco

Misturas	Tensão de escoamento [Pa]	Viscosidade plástica [Pa.s]	Abatimento [mm]	Densidade [kg/m ³]
REF	1638	103	160	2354
ARC25	933	72	170	2301
ARC50	507	17	240	2233
ARC25cl	341	165	190	2356
ARC50cl	366	103	220	2389

Os resultados de abatimento de tronco de cone mostram que as misturas contendo agregados reciclados aumentaram a trabalhabilidade dos concretos. No caso de 25% de substituição (ou seja, ARC25 e ARC25cl), esse aumento pode ser considerado muito suave,

Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

isto é, 160 mm para REF, 170 mm para ARC25e 190 mm para ARC25cl, enquanto nas misturas ARC50 e ARC50cl, esse aumento foi mais significativo, ou seja, 160 mm para REF, 240 mm para ARC50 e 220 mm para ARC50cl. Essas variações estão relacionadas à água adicional utilizada durante o processo de mistura. A densidade no estado fresco não apresentou mudanças significativas após a substituição dos agregados, provavelmente devido à quantidade de água adicionada aos concretos reciclados.

Os resultados de tensão de escoamento mostram que a mistura de referência apresentou o maior valor nesta propriedade (1638 Pa), bem como o menor valor de abatimento de tronco de cone (160 mm). Esses resultados podem estar relacionados visto que ambas as propriedades estão associadas à água livre disponível na mistura. Os concretos reciclados apresentaram valores de tensão de escoamento inferiores à mistura de referência REF, provavelmente devido à quantidade de água compensada durante a mistura. Nesse estudo, foi adicionada uma quantidade de água equivalente à capacidade de absorção dos ARCs após 24 horas de imersão. Conforme relatado anteriormente, os ARCs podem absorver cerca de 50% de sua absorção total durante a mistura. Assim, nesse caso, a água livre dos concretos reciclados pode ter sido maior que na mistura de referência e isso explica os resultados obtidos para tensão de escoamento.

Além disso, a mistura que apresentou o menor valor de viscosidade plástica foi a ARC50 (17 Pa.s), enquanto a mistura que apresentou o valor mais alto foi ARC25cl (165 Pa.s). Considerando que essa propriedade é influenciada pelo teor de pasta e pela forma dos agregados, são necessárias informações adicionais para avaliar com maior precisão a viscosidade das misturas recicladas.

Os resultados de resistência à compressão são apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Resultados de resistência à compressão

Misturas	f_{c2d} (MPa)	f_{c7d} (MPa)	f_{c14d} (MPa)	f_{c28d} (MPa)	f_{c60d} (MPa)
REF	23,36	28,44	30,43	33,02	36,97
ARC25	21,54	24,55	30,09	31,56	36,92
ARC50	16,72	23,75	27,08	27,50	28,73
ARC25cl	21,07	27,67	29,82	30,24	32,61
ARC50cl	19,06	26,31	31,26	29,92	33,69

Os resultados mostram que todas as misturas com ARCs apresentaram uma redução na resistência à compressão em comparação com a mistura de referência. Isso pode ser explicado pelo aumento da porosidade do concreto causado pela inclusão de agregados reciclados e, conseqüentemente, porosos na mistura. De fato, o aumento da porosidade provoca uma redução no comportamento mecânico dos concretos reciclados. Assim, a mistura ARC50 foi a que apresentou os valores de resistência mais baixos para todas as idades analisadas. Esse comportamento já era esperado, já que ela é composta por 100% de

agregados graúdos reciclados com maior absorção, isto é, agregados sem limpeza autógena. Além disso, a quantidade de água adicional possivelmente maior que a necessária pode ter aumentado ainda mais a porosidade da mistura, reduzindo consideravelmente a resistência à compressão [22].

Os resultados indicam que as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido são altamente influenciadas pela condição de umidade inicial do agregado. Como os ARCs são mais porosos que os agregados naturais, eles não são capazes de absorver toda a quantidade de água utilizada para saturação e isso afeta a quantidade de água livre na mistura e, conseqüentemente, a relação água/cimento efetiva. Assim, a relação água/cimento efetiva pode ser definida como a soma da relação água/cimento total e da relação água adicional/cimento subtraída da água que não foi absorvida pelo agregado durante a mistura em relação à quantidade de cimento. Essa relação está definida na Eq. (1) [22].

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{eff} = \frac{w}{c} + \frac{w_{add}}{c} - \delta \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i \cdot P_i}{c}\right) \quad (1)$$

onde c é a quantidade de cimento, w é a água livre nominal, w_{add} é água adicional utilizada para saturar os agregados, p_i e P_i representam a capacidade de absorção e a massa da i -ésima fração de agregado, respectivamente. Para δ , assume-se igual a zero para agregados misturados na condição saturada superfície seca e 0,5 para condição seca (conforme no presente estudo). Esse valor é definido com base em estudos recentes que mostraram que os ARCs podem absorver cerca de 50% de sua capacidade de absorção durante a mistura [22], [23]. Por este motivo, os resultados das propriedades do estado fresco e endurecido podem ser interpretados em função da água efetiva (Figura 2) e da relação água/cimento efetiva (Figura 3). Os gráficos confirmam as afirmações anteriores.

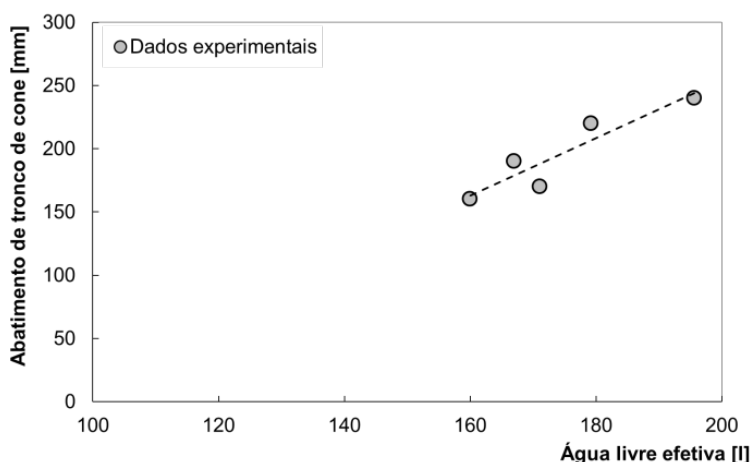


Figura 2. Abatimento de tronco de cone x água livre efetiva

Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

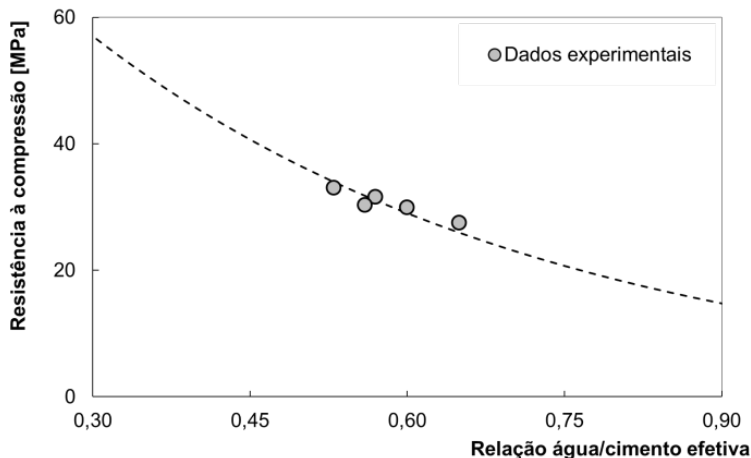


Figura 3. Resultados de resistência à compressão aos 28 dias x relação água/cimento efetiva

4.- CONCLUSÕES

Esse artigo apresenta os resultados preliminares de uma pesquisa experimental que investiga a influência das propriedades dos agregados de resíduo de concreto (ARCs) nas propriedades do estado fresco de concretos reciclados. Assim, as seguintes conclusões são obtidas dos resultados dos ensaios:

- Devido à alta absorção dos agregados reciclados, uma quantidade de água de ser adicionada a mistura para compensar essa propriedade. Estudos anteriores mostraram que a quantidade ideal de água a ser adicionada é equivalente a 50% da capacidade de absorção após 24 horas de imersão;
- A substituição de agregados naturais por ARCs provocou um aumento na trabalhabilidade dos concretos. Isso pode ter sido causado pelo excesso de água adicionado à mistura;
- Os resultados de tensão de escoamento foram compatíveis com os valores obtidos no ensaio de abatimento de tronco de cone, visto que ambos os resultados são influenciados pela quantidade de água livre na mistura;
- São necessárias informações adicionais para compreender melhor os efeitos dos ARCs na viscosidade plástica.
- Por fim, com base nos resultados obtidos, serão devolvidos estudos futuros a fim de estender mecanismos conceituais aos concretos reciclados, como o modelo simplificado de Bingham.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo faz parte das atividades realizadas pelos autores no “SUPERCONCRETE00 Project (www.superconcrete-h2020.unisa.it) financiado pelo

“Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme” no âmbito do acordo “Grant Agreement No 645704 (H2020-MSCA-RISE-2014)”.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Kisku et al., A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Construction and Building Materials*, 2016.
- [2] K.H. Yang, Y.B. Jung, M.S. Cho, S.H. Tae, Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete, *Journal of Cleaner Production*, 103 (2015) 774-783.
- [3] C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo, Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study, *Cement and Concrete Composites*, 71 (2016) 85-96.
- [4] S. Lotfi, M. Eggimann, E. Wagner, R. Mróz, J. Deja, Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, *Construction and Building Materials*, 95 (2015) 243-256.
- [5] E.A.B. Koenders, M. Pepe, E. Martinelli, Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates, *Cement and Concrete Research*, 56 (2014) 203-212.
- [6] H.K.A. Al-Bayati, P.K. Das, S.L. Tighe, H. Baaj, Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 284-298.
- [7] S. Omary, E. Ghorbel, G. Wardeh, Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties, *Construction and Building Materials*, 108 (2016) 163-174.
- [8] A. Gholampour, A.H. Gandomi, T. Ozbakkaloglu, New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming, *Construction and Building Materials*, 130 (2017) 122-145.
- [9] I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, J.L. Pérez-Ordóñez, J. Eiras-López, Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience, *Construction and Building Materials*, 131 (2017) 641-654.
- [10] R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 2171-2186.
- [11] I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, J.L. Pérez-Ordóñez, Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete

Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- using multivariable regression and genetic programming, *Construction and Building Materials*, 106 (2016) 480-499.
- [12] E. Güneyisi, M. Gesoglu, Z. Algin, H. Yazıcı, Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 622-630.
- [13] F. Faleschini, C. Jiménez, M. Barra, D. Aponte, E. Vázquez, C. Pellegrino, Rheology of fresh concretes with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 407-416.
- [14] G.H. Tattersall, P.F.G. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*, (vol. 356), London Pitman, 1983.
- [15] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?, *Cement and Concrete Research*, 39.6 (2009) 510-523.
- [16] A.A.M. Amer, K. Ezziane, A. Bougara, Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 123 (2016) 300-308.
- [17] C. Lima, A. Caggiano, C. Faella, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo, Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 547-559.
- [18] ABNT NBR 5733 (1991) High early strength Portland cement – Specification. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 1991
- [19] ABNT NBR NM 67 (1998) Concrete - Slump test for determination of consistency - method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 1998.
- [20] F. De Larrard, C.F. Ferraris, T. Sedran, Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material, *Materials and Structures*, 31.7 (1998) 494-498.
- [21] ABNT NBR 5739 (2007) Concrete - Compression test of cylindrical specimens - method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2007.
- [22] M. Pepe, R. D. Toledo Filho, E. A. Koenders, E. Martinelli, A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 122 (2016) 362-372.
- [23] M. Amario, Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC) (in Portuguese), Master thesis, NUMATS, COPPE-UFRJ, Brazil, 2015.