

Comportamento reológico da fase argamassa de betão autocompactável com agregados finos reciclados



Luiz Pereira-de-Oliveira¹



Miguel Nepomuceno²



Carlos Silveira³

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo reológico da fase argamassa do BAC com a incorporação de agregados finos reciclados (AFR). No programa experimental foram produzidas e ensaiadas duas séries distintas de argamassas. Sendo, uma série de misturas binárias de pós (cimento e pó calcário) e outra de misturas ternárias (cimento, pó calcário e cinza volante). Em cada uma das séries foram adicionadas percentagens crescentes de cerca de 10% até ao limite de 50% de AFR. Misturas de referência com agregados finos naturais (AFN) para cada série complementaram o plano experimental. As propriedades da fase argamassa no estado fresco foram avaliadas através dos ensaios de espalhamento e do funil V. Os parâmetros reológicos, tensão de cedência e consistência plástica relativa, expressos pelo modelo de Herschell-Bulkley, foram determinados com o auxílio do reómetro Viskomat NT. Em termos gerais, a incorporação crescente de AFR nas argamassas incrementa o valor da tensão de cedência das argamassas e aumenta a consistência plástica. Essas alterações são no entanto diferentes conforme a mistura seja binária ou ternária. Conclui-se que os AFR são viáveis como componente do BAC, embora influenciando o seu comportamento reológico.

Palavras-chave: betão autocompactável, agregados reciclados, reologia, tensão de cedência, consistência plástica

1. INTRODUÇÃO

A utilização dos agregados reciclados provenientes da demolição de estruturas de betão na produção de betões autocompactáveis (BAC) provoca alterações em algumas propriedades deste, quer no estado fresco quer no estado endurecido. Estudos têm atestado a viabilidade da incorporação de agregados grossos reciclados no BAC [1,2]. Apesar de menos estudada, a inclusão de agregados finos reciclados

¹ Centre of Materials and Building Technologies – C_MADE, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. luiz.oliveira@ubi.pt

² Centre of Materials and Building Technologies – C_MADE, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. mcsn@ubi.pt

³ Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. carlosm_silveira@iol.pt

no betão não afeta significativamente a resistência à compressão, pelo menos quando a taxa substituição de agregados finos não ultrapassa os 30% [3]. No entanto se faz necessário um controlo da granulometria e britagem de maneira a reduzir a presença de impurezas que afetam o desempenho do betão. Aliás, é precisamente esta incerteza uma das principais razões pela qual a utilização de agregados finos reciclados é geralmente vetada nos documentos normativos existentes.

Os estudos de Cabral [4] revelam que o uso dos agregados reciclados na produção de BAC parece promitente, pois a elevada quantidade de finos presentes nos agregados reciclados embora venha alterar a área de superfície das misturas, esta pode ajudar a melhorar a resistência à segregação. Por outro lado, a elevada absorção dos agregados reciclados pode ser um inconveniente para a manutenção da trabalhabilidade [4]. Neste aspeto, a absorção dos agregados finos reciclados de betão é maior do que a dos agregados grossos reciclados, e ambas são maiores que a dos naturais [5].

Estudos na fase argamassa do BAC tanto com associações binárias (cimento e pó calcário) ou ternárias (cimento, pó calcário e cinza volante) revelaram um decréscimo da resistência à compressão aos 28 dias de idade com o aumento da percentagem de incorporação de agregados finos reciclados [6]. Também se constatou que a massa volúmica das argamassas no estado endurecido diminui ligeiramente com o aumento da percentagem de incorporação de agregados finos reciclados, independentemente de se tratar de argamassas com associações binárias ou ternárias. Este facto era previsível, visto que os agregados finos reciclados apresentam um valor da massa volúmica inferior comparativamente com os agregados finos naturais, devido à maior porosidade e menor densidade da pasta cimentícia. Do ponto de vista da manutenção da trabalhabilidade adequada da fase argamassa do BAC a dosagem de água de amassadura aumenta com a percentagem de incorporação de agregados reciclados nas misturas binárias; enquanto o inverso ocorreu com as misturas ternárias, pelo menos até à percentagem de 40% de incorporação de agregados reciclados. Os mesmos autores também verificaram um maior consumo de superplastificante nas misturas ternárias em relação as binárias para obtenção da trabalhabilidade adequada. Comportamento que indicia que uma parte desse superplastificante foi adsorvida na superfície das partículas de cinzas volantes. No sentido de aprofundar os conhecimentos sobre a influência de agregados finos reciclados na fase argamassa do BAC, o presente estudo foi desenvolvido com o intuito de observar o comportamento reológico de argamassas com incorporação crescente de agregado fino reciclado em substituição ao agregado fino natural até um percentual máximo de 50%.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

No presente estudo utilizou-se cimento Portland CEM I 42.5R com massa volúmica de 3140 kg/m³. Como adições utilizou-se um fíler calcário com massa volúmica de 2720 kg/m³ e uma cinza volante com massa volúmica de 2380 kg/m³. Para se poder atingir as características de autocompactabilidade foi ainda utilizado um superplastificante (SP) à base de policarboxilatos modificados (Sika Visco Crete-3005) com massa volúmica de 1050 kg/m³. Quanto aos agregados naturais, decidiu-se optar por uma combinação de uma areia quartzosa natural amarela de grão fino (Areia 0/2) com uma areia natural rolada calibrada de grão grosso (Areia 0/4), de origem fluvial. A combinação destes dois materiais foi efetuada na proporção de 50% de areia grossa (Areia 0/4) e 50% de areia fina (Areia 0/2). Relativamente ao agregado fino reciclado, designada por areia reciclada teve origem na britagem em laboratório de antigos corpos de prova de betão e constituiu-se de grãos inferiores à 5 mm com forma irregular e textura rugosa. O Quadro 1 apresenta as características dos agregados finos utilizados e a Figura 1 ilustra as características irregular e arredondada dos grãos de areia reciclada e das areias naturais.

Quadro 1. Características dos agregados finos.

Agregados finos	Massa volúmica (kg/m^3)	Módulo de finura	Absorção de água (%)
Areia 0/2	2661	2,38	0,43
Areia 0/4	2647	3,17	0,93
Areia reciclada	2310	3,16	9,19

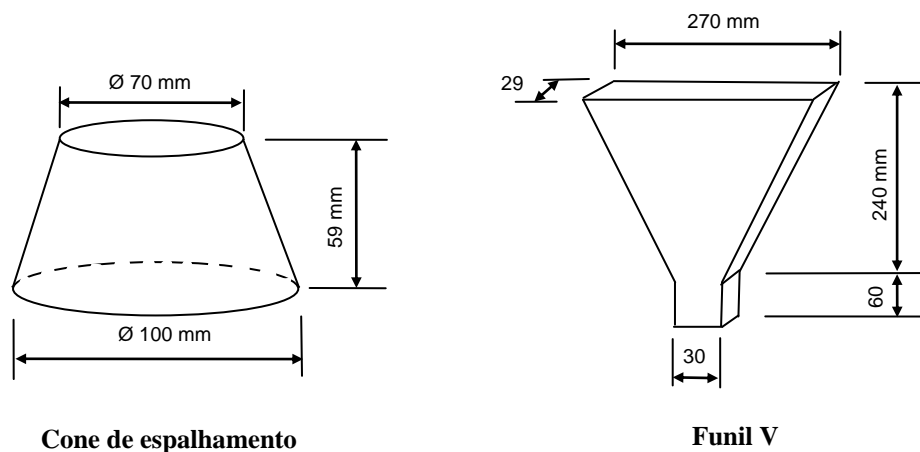


Figura 1. Características dos grãos de areia reciclada (a), areia 0/4 (b) e areia 0/2 (c).

Neste estudo foram produzidos dois tipos de argamassas, uma argamassa binária (contendo 40% cimento + 60% fíler calcário) e uma argamassa ternária (contendo 40% cimento + 50% fíler calcário + 10% cinza volante). As argamassas ditas de referência binária ou ternária são constituídas por uma combinação de agregados finos naturais ou seja 50% de cada tipo de areia natural. A areia reciclada foi sendo introduzida nas argamassas em percentagens crescentes de 10% ou seja de 0 até 50% do total de agregados finos. Essa incorporação foi realizada em substituição da areia 0/4 ou seja os 50% corresponde a substituição total desta areia pela areia reciclada.

2.2 Métodos

O ensaio de fluidez efetuou-se recorrendo a um funil V de faces planas adaptado à fase argamassa e a sua execução foi realizada com base na norma NP EN 12350-9/2010 [7]. O ensaio de espalhamento foi efetuado utilizando um cone de espalhamento adaptado à fase argamassa do BAC e realizado tendo por base a norma NP EN 12350-8/2010 [8]. A Figura 2 apresenta as dimensões internas do cone de espalhamento e do funil V utilizado neste estudo.



Cone de espalhamento

Funil V

Figura 2. Dimensões internas do cone de espalhamento e do funil V.

A determinação dos parâmetros reológicos das argamassas frescas foi efetuada com o auxílio de um reómetro (Viskomat NT), utilizando uma pá especial para argamassas “mortar probe V0011”[9], com o qual se aplica às argamassas ensaiadas uma determinada taxa de deformação e se mede a tensão de

corte resultante. O perfil do ensaio, que se apresenta na Figura 3, consistiu em 6 níveis de patamares, crescentes e depois decrescentes, de velocidade de rotação das pás (20, 40, 60, 80, 100 e 120 rpm), durante cerca de 11 minutos. O perfil escolhido permite chegar a valores de equilíbrio de torque para cada velocidade e assim construir curvas de fluxo de equilíbrio para uma melhor determinação dos parâmetros reológicos: tensão de cedência e viscosidade plástica relativas. Esses parâmetros são determinados utilizando os pares de dados da curva descendente.

A fase argamassa dos betões autocompactáveis foi dosada tendo por base o método desenvolvido por Nepomuceno *et al* [10]. Os parâmetros de dosagem adotados para as argamassas binárias autocompactáveis foram: (relação em volume absoluto entre os materiais finos e os agregados finos) $V_p/V_s = 0,80$; (relação em volume absoluto entre a água e os materiais finos) $V_w/V_p = 0,70$ e (relação em percentagem entre as dosagens em massa de superplastificante e de materiais finos) $S_p/p\% = 0,34$. Para as argamassas ternárias uma correção fez-se necessária nos valores dos seguintes parâmetros: $V_w/V_p = 0,74$ e $S_p/p\% = 0,38$.

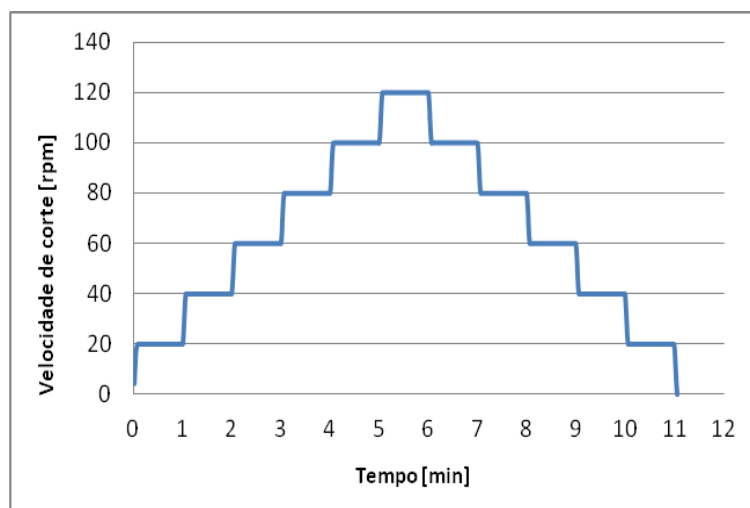


Figura 3. Perfil de ensaio utilizado (Step).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de espalhamento e de escoamento no funil V são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Diâmetro de espalhamento e tempo de escoamento das argamassas.

Argamassa	Espalhamento [mm]		Tempo de escoamento [s]	
	Mistura binária	Mistura ternária	Mistura binária	Mistura ternária
Ref	297,5	333,0	4,57	2,44
10%	263,0	325,5	4,69	2,05
20%	242,0	325,5	5,73	2,11
30%	212,5	303,0	6,71	2,74
40%	214,5	287,0	7,08	3,31
50%	225,0	288,0	6,06	3,62

As correlações dos resultados de tensão de cedência relativa em função da velocidade de corte obtidos no reómetro não são exatamente lineares, assim como já observado por outros autores [11]. Neste estudo, verificou-se que o comportamento da fase argamassa do betão autocompactável se associa ao modelo de Herschell-Bulkley com uma probabilidade (p-value) da ordem de 0,00. Entre outras vantagens, o modelo de Herschell-Bulkley evita o problema de tensões de cedência negativas determinadas com o modelo de Bingham. A Figura 4, referente à argamassa de referência, exemplifica

aqui a característica obtida para as demais argamassas ensaiadas. O modelo de Herschell-Bulkley é descrito pela Eq.(1).

$$T=g + kV^b \tag{1}$$

Onde, T é o torque em N.mm, g é a tensão de cedência relativa em N.mm, k a consistência plástica relativa em N.mm.min, V a velocidade em rpm e b é um parâmetro do material que indica a grau de dilatação (b>1, o fluido é dilatante e b<1 é atribuído à um comportamento pseudoplástico).

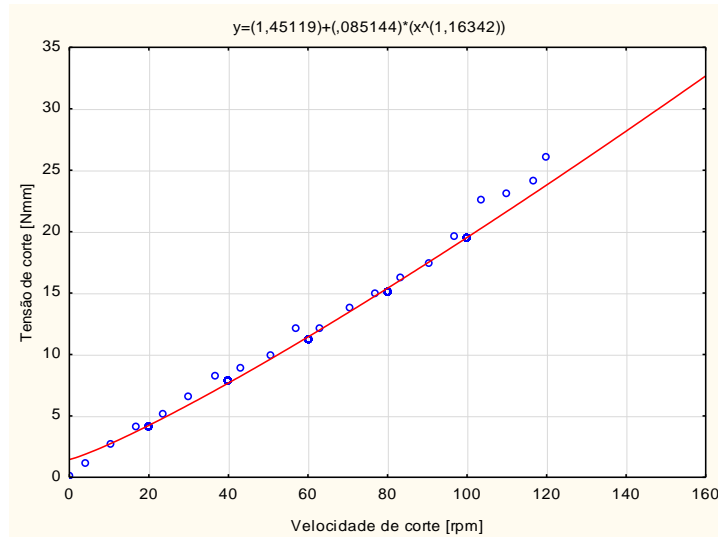


Figura 4. Tensão de cedência versus velocidade de corte da argamassa de referência.

O Quadro 3 apresenta as equações, segundo o modelo de Herschell-Bulkley, que descrevem o comportamento reológico das argamassas com os seus respectivos coeficientes de correlação R², cujos valores não deixam dúvidas sobre a adequação do comportamento reológico das argamassas ao modelo adotado.

Quadro 3. Equações de Herschell-Bulkley para argamassas binárias e ternárias.

Argamassas	Binárias		Ternárias	
	Equação	Coefficiente R ²	Equação	Coefficiente R ²
Referência	T=1,45+0,09*V ^{1,16}	0,998	T=1,37+0,01*V ^{1,38}	0,998
10%	T=3,38+0,12*V ^{1,19}	0,999	T=1,56+0,03*V ^{1,25}	0,999
20%	T=5,80+0,22*V ^{1,14}	0,999	T=1,83+0,02*V ^{1,80}	0,967
30%	T=9,92+0,30*V ^{1,12}	0,999	T=2,21+0,03*V ^{1,30}	0,999
40%	T=10,49+0,25*V ^{1,18}	0,998	T=2,80+0,08*V ^{1,15}	0,998
50%	T=6,67+0,20*V ^{1,16}	0,998	T=2,50+0,05*V ^{1,25}	0,999

A Figura 5 representa a evolução das tensões de cedência com as diferentes taxas de substituição de AFN por AFR das argamassas binárias. Apesar de ocorrer o aumento da tensão de cedência das argamassas com AFR comparativamente à argamassa de referência, este aumento não acontece de forma linear. As argamassas com 30% e 40% de taxa de substituição apresentam valores mais elevados relativamente ao valor médio, com cerca de 9,92 N.mm e 10,49 N.mm, respetivamente, sendo estes valores mais elevados do que o registado na argamassa com a maior percentagem, 50%, de agregado fino reciclado (cerca de 6,67 N.mm). A explicação para os valores obtidos nas taxas de 30% e 40% aparenta estar nas características do agregado fino reciclado, com formas mais irregulares, de maior rugosidade, e com áreas de superfície superiores comparativamente aos agregados finos naturais. Algumas das características físicas dos AFR, como a rugosidade e o formato irregular com tendência lamelar das partículas, tal como se ilustra na Figura 1, propiciam efeitos de interferência entre os diferentes agregados componentes das argamassas. Este efeito de interferência foi relatado

por Alexander e Mindess [12]. Com a substituição total da areia natural 0/4 o efeito de interferência é atenuado. Identifica-se, portanto, como um limite de interferência o percentual de 40%, a partir do qual o valor diminui consideravelmente.

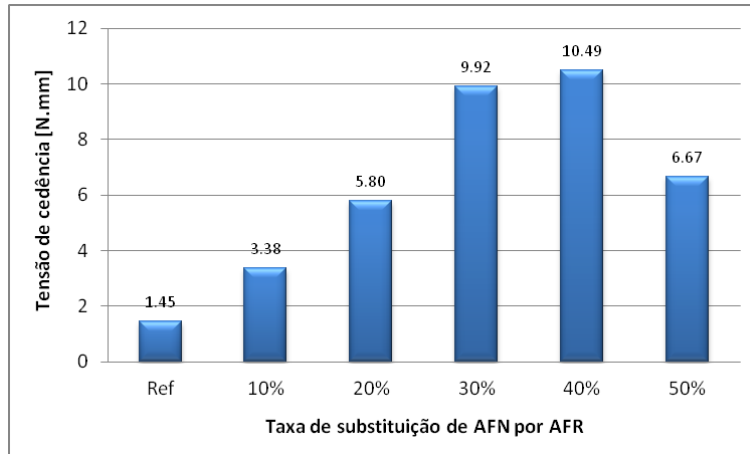


Figura 5. Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas binárias.

A Figura 6 apresenta os valores das tensões de cedência com a taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas ternárias. Observa-se que os valores da tensão de cedência crescem com o aumento da percentagem da taxa de substituição. De notar também que para estas argamassas ternárias os resultados da tensão de cedência são relativamente baixos, entre os 1,37 N.mm da argamassa de referência e os 2,8 N.mm da argamassa com 40% de substituição de areia 0/4. Estes valores reduzidos devem-se à presença da cinza volante, com suas características fluidificantes e também ao maior volume de água ($V_w/V_p = 0,74$) nas argamassas.

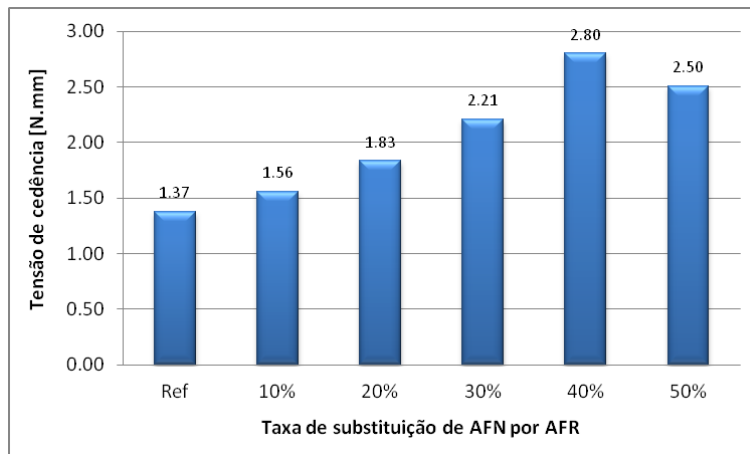


Figura 6. Tensão de cedência versus taxa de substituição de AFN por AFR das argamassas ternárias.

Verificou-se uma elevada correlação entre os valores de tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento obtidos nas argamassas binárias e ternárias. As Figuras 7 e 8 mostram, tal como Banfill e Tattersall [13] já documentaram, que a tensão de cedência é inversamente proporcional ao diâmetro de espalhamento da argamassa autocompactável. Isto significa por exemplo que quanto menor forem os valores da tensão cedência, maior é o diâmetro de espalhamento, registado através do ensaio do cone. É também evidente que partindo dos valores de referência que são diferentes e crescentes da argamassa binária à argamassa ternária verifica-se uma atenuação nessa correlação expressa pelo valor da inclinação da reta da Figura 7, que é sensivelmente menor que a da Figura 6. Neste ponto pode-se argumentar que o efeito da inclusão da cinza volante, pela esfericidade das suas partículas, tem uma contribuição importante na redução do efeito da rugosidade da areia reciclada.

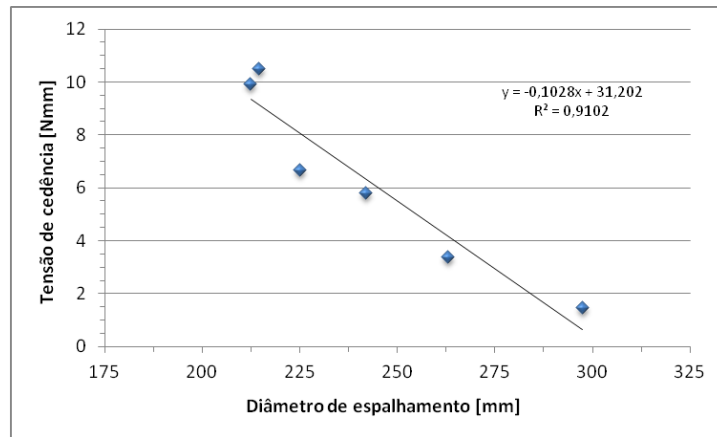


Figura 7. Correlação entre a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento das argamassas binárias.

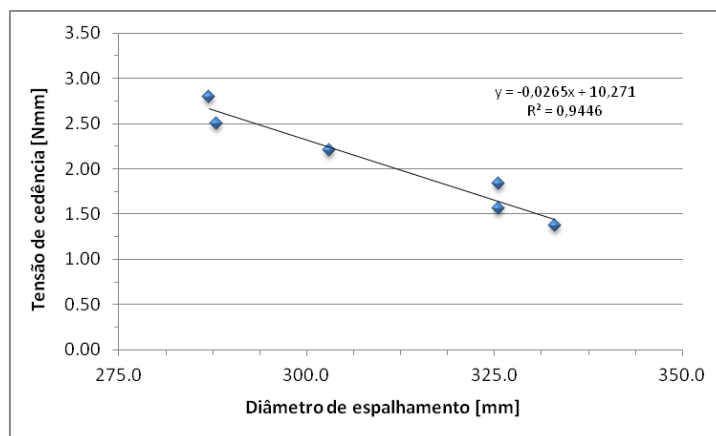


Figura 8. Correlação entre a tensão de cedência e o diâmetro de espalhamento das argamassas ternárias.

Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se as correlações entre a consistência plástica e os tempos de escoamento obtidos no estudo reológico das argamassas binárias e ternárias. Nestas correlações pode ser observada claramente uma forte relação linear entre os dois parâmetros abordados medidos nas argamassas binárias. No entanto, o coeficiente de correlação para as argamassas ternárias é relativamente mais baixo. Tendo em vista que os valores obtidos no funil V para as argamassas ternárias são mais baixos do que aqueles para argamassas binárias, especula-se neste caso uma influência do operador no ensaio do funil V, o qual pode ser crítico para medições de escoamento rápido. Outra informação que se pode obter a partir da análise dessas figuras é que quanto maior for o valor da consistência plástica, maior é também o valor do tempo de escoamento.

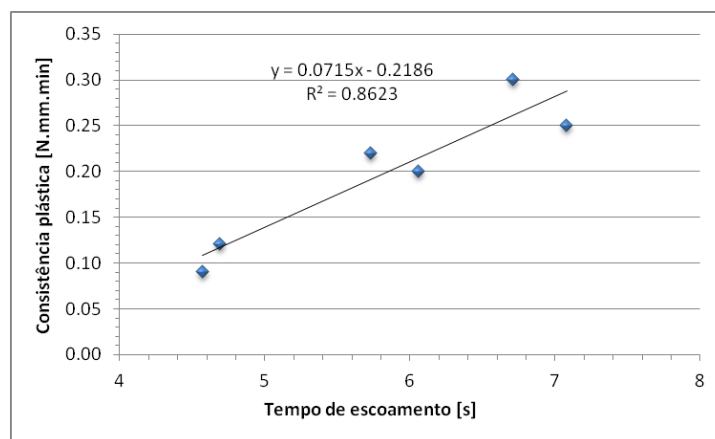


Figura 9. Correlação entre a consistência plástica e o tempo de escoamento das argamassas binárias.

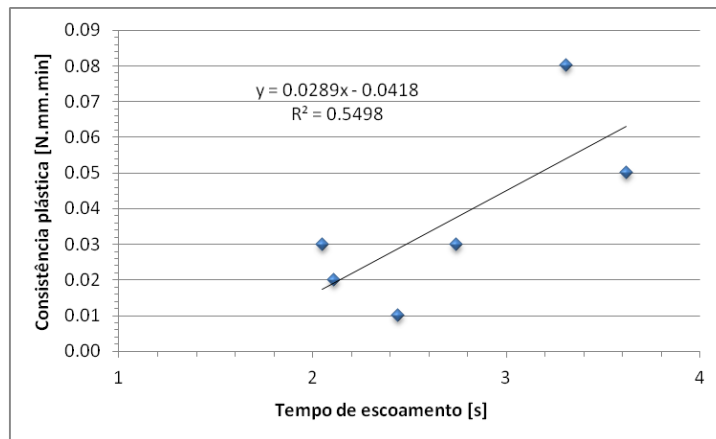


Figura 10. Correlação entre a consistência plástica e o tempo de escoamento das argamassas ternárias.

CONCLUSÕES

Ao se estudar o efeito da incorporação de agregados finos reciclados na fase argamassa de betão autocompactável pode-se concluir que:

- o diâmetro de espalhamento das argamassas diminui com o aumento do percentual de substituição da areia natural pela areia reciclada, sendo 40% o teor no qual se encontra a maior redução que é da ordem 28% para as misturas binárias e de 14% para as ternárias.
- o tempo de escoamento aumenta consideravelmente tanto para as argamassas binárias como para as ternárias com o aumento da substituição da areia natural.
- o modelo de Herschell-Bulkley, que descreve o comportamento reológico das argamassas, mostra que tanto a tensão de cedência como a consistência plástica relativa crescem com o aumento do teor de substituição da areia natural nas argamassas binárias e ternárias sendo os seus máximos atingidos com o teor de substituição de 40%.
- o diâmetro de espalhamento apresenta uma elevada correlação com a tensão de cedência tanto para argamassas binárias como ternárias. A correlação entre o tempo de escoamento e a consistência plástica das argamassas binárias é relativamente forte, porém no caso das argamassas ternárias essa correlação é menos importante.
- em termos gerais, a incorporação crescente de AFR nas argamassas incrementa o valor da tensão de cedência das argamassas e aumenta a consistência plástica. Essas alterações são no entanto diferentes conforme a mistura seja binária ou ternária. Conclui-se que os AFR são viáveis como componente do BAC, embora influenciando o seu comportamento reológico.

REFERÊNCIAS

- [1] Kou S.C, Poon C.S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites* 31 622–627
- [2] Grdic Z. J, Toplicic-Curcic G. A, Despotovic I. M, Ristic N. S. (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 24, p 1129–1133.

- [3] Evangelista, L.; Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 29, p. 397-401.
- [4] Cabral, António. (2007). Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. Tese de Doutorado apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 280p.
- [5] Gómez-Soberón, J. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cement and Concrete Research*, vol.32, p. 1301-1311.
- [6] Pinto H.A.S, Pereira de Oliveira L. A, Nepomuceno M.C.S. (2011). Propriedades do betão auto-compactável com incorporação de agregados finos reciclados. Proc. of International Conference on Engineering UBI2011. 28-30 Nov 2011, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- [7] NP EN 12350-9. 2010, Norma Portuguesa para Betão Auto-Compactável: Ensaio de Escoamento no Funil-V. Lisboa: IPQ. 7 p.
- [8] NP EN 12350-8. 2010, Norma Portuguesa para Betão Auto-Compactável: Ensaio de Espalhamento. Lisboa: IPQ. 8 p.
- [9] Schleibinger Geräte. Schleibinger Testing Systems. Rheometers accessories. http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%26nbsp%3B:Viskomat_NT_-_Rheometer_f.Mortar_and_Paste:Accessories accessed in 23-04-2015
- [10] Nepomuceno M., Pereira de Oliveira L., Lopes S. M. R., (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders, *Construction and Building Materials* 26 317–326
- [11] Larrard F., Ferraris C. F., Sedran T. Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 31, August-September 1998, pp 494-498
- [12] Alexander, M., Mindess, S. (2005). *Aggregates in Concrete*. Taylor & Francis, New York, 435 pp.
- [13] Banfill, P.F.G, Tattersall, G.H. (1983). *The rheology of fresh concrete*. Pitman Books Ltd, London.

