

Concreto autoadensável com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: desenvolvimento e projeções computacionais HCA

Rafael Germano Dal Molin Filho (UEM) rafagermano@gmail.com

Rodrigo Clemente Thom de Souza (UFPR) thom@ufpr.br

Romel Dias Vanderlei (UEM) rdvanderlei@uem.br

Paulo Roberto Paraíso (UEM) prparaíso@uem.br

Luiz Mário de Matos Jorge (UEM) lmjorge@uem.br

Resumo:

Os avanços nos desenvolvimentos tecnológicos de materiais para a indústria da construção civil, que possibilitam minimizar a extração de recursos naturais, geram enormes contribuições aos requisitos e valores de responsabilidade socioambiental. Nesta linha, o presente trabalho objetivou desenvolver, em um primeiro momento, um traço de concreto autoadensável (CAA) que utilizasse a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em substituição parcial da areia, na taxa de 10%, em relação à massa. Em um segundo momento avaliou-se a possibilidade de projetar novos desenvolvimentos de CAA com outras taxas de substituições, pela análise computacional de agrupamento hierárquico (HCA). Para o desenvolvimento do CAA foram utilizados métodos de ensaios autoadensáveis recomendados por pesquisadores e outros normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. As propriedades mecânicas de compressão e tração foram avaliadas aos 28 dias de idade. O traço de CAA desenvolvido obteve a redução de 79 kg/m³ de areia pela utilização da CBC, além do consumo adequado de cimento de 396 kg/m³. Por fim, determinou-se pela análise HCA que é possível ampliar o desenvolvimento de novas composições de CAA com taxas de substituição de areia por CBC de até 20%, com projeções aceitáveis de superplastificante por cimento na faixa de 0,0042 a 0,0055.

Palavras chave: Análise de agrupamento hierárquico, argamassa autoadensável, concreto autoadensável, reologia do concreto, responsabilidade socioambiental.

Self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash: development and computational projections HCA

Abstract

Advances in the technological developments of materials for the civil construction industry, which make it possible to minimize the extraction of natural resources, generate enormous contributions to the requirements and values of social and environmental responsibility. The present work aimed to develop, in a first moment, a trace of self-compacting concrete (SCC) that used the sugarcane bagasse ash (SCBA) in partial replacement of sand, in the rate of 10% in relation to the mass. In a second moment, it was evaluated the possibility to project new developments of SCC with other replacement rates by means of Hierarchical Cluster Analysis (HCA). Test methods for SCC recommended by researchers and other methods according to the Brazilian Association of Technical Standards were used in the development of the SCC. The mechanical properties of compression and traction were evaluated at the age of 28 days. The developed trace of the SCC presented a reduction of 79 kg/m³ of sand by using the SCBA, besides the adequate consumption of 396 kg/m³ of cement. Finally, the HCA showed the possibility of expanding the development of new compositions of SCC with sand replacement rates by

SCBA up to 20%, with acceptable projections of superplasticizer in the range of 0.0042 to 0.0055 by cement.

Key-words: Hierarchical Cluster Analysis, self-compacting mortar, self-compacting concrete, rheology of concrete, social and environmental responsibility.

1. Introdução

A busca pela sustentabilidade dos nossos ecossistemas é um desafio presente para as atuais e futuras civilizações. Os resíduos gerados pelas amplas e variadas atividades de transformação precisam ser minimizados pela busca de tratativas adequadas de manejo, reuso, reciclagem e reaproveitamento. Neste sentido, pesquisas em diversos segmentos da ciência e da tecnologia buscam desenvolver materiais e compostos que aproveitem os resíduos gerados nos processos industriais. Além da busca pela redução e, até mesmo da eliminação da própria geração, tem-se a necessidade da minimização de seus custos em relação à cadeia produtiva e, sobretudo a diminuição dos consequentes impactos ambientais. Desta forma, um bom encaminhamento para esta tratativa é a busca pela destinação técnica e controlada, capaz de transformar em subprodutos de valor agregado os resíduos gerados (MOISÉS *et al.*, 2013; NOGUEIRA *et al.*, 2012; MOLIN FILHO *et al.*, 2017).

O concreto autoadensável (CAA) como material para a construção civil surgiu no Japão na década de 1980 e avança de forma significativa no Brasil no terceiro milênio. A crescente utilização do CAA está associada, entre outros fatores, com a busca pela redução do tempo de lançamento e adensamento do concreto e consequente otimização dos recursos. Isso tanto nos processos produtivos das peças pré-moldadas, como na aplicação em estruturas *in loco*. Soma-se a isso, os aspectos relativos ao desempenho do produto acabado, como a resistência e a durabilidade. A estrutura do CAA necessita de muitos finos para a melhoria da coesão e do empacotamento estrutural e consequente ganho de aplicabilidade. Dentre os parâmetros a serem controlados no estado fresco destacam-se a fluidez com moderada viscosidade, o controle da coesão entre suas partículas com o respectivo combate à segregação e o controle da exsudação (NBR 15823-1; ABNT 2017; MAHESH, 2014; EFNARC, 2005; OKAMURA; OUCHI, 2003).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) que será utilizada na pesquisa como agregado é um resíduo sólido de pequena granulometria gerado pela queima do bagaço da cana-de-açúcar no processo de cogeração de energia nas usinas de etanol e açúcar. Somente no estado do Paraná, baseados em dados do CONAB (2018) e da FIESP/CIESP (2001), existe o potencial de geração de até 235.000 toneladas de CBC para a safra 2018/2019. No Brasil, utilizando-se dos mesmos bancos de dados e com a mesma analogia, estima-se para a safra 2018/2019 a possibilidade de geração de mais de 3.875.000 de toneladas de CBC.

Nas pesquisas de Cordeiro *et al.* (2008) e Molin Filho *et al.* (2017) foram destacados resultados que comprovam que a CBC pode ser utilizada na substituição parcial da areia, para a produção de argamassas, blocos de revestimentos e concretos. Os trabalhos de Baturudeen e Santhanam (2015) e Castaldelli *et al.* (2016) obtiveram resultados que podem afirmar que a CBC no estado organizacional amorfo, pode ser utilizada em substituição parcial ao cimento Portland para fins pozolânicos de aglutinação. O estudo de Moretti *et al.* (2016) apresentou resultados significativos para o avanço da produção de concretos com resíduos de construção e com cinza do bagaço da cana-de-açúcar pela similaridade da resistência à compressão quando comparados a concretos referenciais sem resíduos.

Esta pesquisa objetivou desenvolver um traço de concreto autoadensável contendo cinza do

bagaço da cana-de-açúcar, em substituição à areia na taxa de 10%, em massa. Em um segundo momento foram realizadas pelo uso da técnica de análise de agrupamentos hierárquicos, análises para direcionamento de estudos de expansão da taxa de substituição. Com isso, além do intuito de promover avanços nesta tecnologia de concreto, busca-se também a definição de uma destinação técnica, controlada e com valor socioambiental para um resíduo gerado em larga escala no Brasil.

1.1. A Análise de agrupamentos hierárquicos

A análise de agrupamentos hierárquicos proposta na etapa final deste trabalho, é mais conhecida por seu nome em inglês, *Hierarchical Cluster Analysis (HCA)*. Trata-se de uma análise geométrica para agrupamento de dados que oferece uma representação gráfica de fácil interpretação de uma matriz de distâncias (ou dissimilaridades) entre objetos de um conjunto de dados (GREENACRE; PRIMICERIO, 2013). Na sua representação gráfica característica, conhecida por dendrograma, os objetos (amostras ou variáveis) são dispostos hierarquicamente em forma de árvore do mais próximo (mais similar) para o mais distante (mais diferente). Diversos algoritmos podem ser utilizados para a geração do dendrograma com *heatmaps* de correlação.

De maneira geral, tais algoritmos podem ser classificados em dois grupos: aglomerativos e divisivos. Nos algoritmos aglomerativos inicia-se considerando cada objeto como um cluster (grupo) separado e, com o cálculo das distâncias (medida de similaridade), os objetos vão sendo combinados em clusters maiores, até que todos façam parte de um mesmo único cluster. Nos algoritmos divisivos, o processo é o oposto: todos os objetos iniciam no mesmo cluster e, por meio do cálculo de distâncias, vão sendo separados em clusters cada vez menores, de modo que ao final do processo, cada objeto esteja sozinho em seu próprio cluster. Neste trabalho, o algoritmo desenvolvido no software *Matlab (Mathworks, Natick, USA)* tem base aglomerativa e a medida de similaridade utilizada foi a distância Euclidiana.

2. Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do CAA foi utilizado o traço da composição de argamassa autoadensável (AGA) desenvolvida por Molin Filho *et al.* (2017). As bases e especificações da metodologia da argamassa tiveram como origem as recomendações técnicas de Okamura e Ouchi (2003). Os parâmetros autoadensáveis do concreto, bem como os ensaios de avaliação, seguirão as recomendações da NBR15823-1 (ABNT, 2017) e de Gomes e Barros (2009). A taxa de substituição do agregado miúdo (areia) por CBC avaliada foi de 10%. Na última etapa foram projetados novos desenvolvimentos com outras possíveis taxas de substituição de areia por CBC pela análise HCA.

2.1. Materiais

Os materiais utilizados na produção do concreto autoadensável foram:

- cimento CP II E 32 em conformidade com a norma NBR 7215 (ABNT, 1996) e demais normas adjacentes;
- filer calcário calcítico (Filer Calcário – Fabricante Cazanga), de cor branca possuía na sua composição, em massa, CaO com um mínimo de 51,8 %, MgO no máximo de 1 %, Ca no mínimo de 37 % e Mg de no máximo de 0,63 %. Cerca de 94 % do filer é passante em peneira 325 mesh 94 % menores que 45 μ m (0,045 mm), caracterizando-se assim como uma adição mineral fina (EFNARC, 2005);
- aditivo químico superplastificante de terceira geração (Glenium 51 – Fabricante Basf) de

base éter policarboxílica, líquido na cor branca turva com PH de 5 a 7, viscosidade < 150 (cps);

d) areia de origem quartzosa, com massa específica de 2642,5 kg/m³, absorção do agregado (ABS) de 0,11 %, diâmetro máximo característico de 0,6 mm, módulo de finura de 1,7 %, massa unitária solta de 1491,6 kg/m³ e massa unitária compactada de 1656,6 kg/m³. As caracterizações foram realizadas em consonância com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) e demais normas adjacentes;

e) brita de origem basáltica, com massa específica de 2877,1 kg/m³, absorção do agregado (ABS) de 1,91 %, diâmetro máximo característico de 12,5 mm, massa unitária solta de 1464,2 kg/m³ e massa unitária compactada de 1649,3 kg/m³. As caracterizações foram realizadas com auxílio das normas NBR 7211 (ABNT, 2009) e demais normas adjacentes;

f) água em conformidade com NBR 15900-1 (ABNT, 2009);

g) cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), cristalina (padrão por Difração de Raios-X conforme ICSD-number 201354 de Lager *et al.* 1982) gerada em queimas *in natura* em caldeira acima de 700 °C. A coleta da CBC foi realizada na usina de Iguatemi (Maringá, Paraná, Brasil) do Grupo Usaçúcar. Ela possuía massa específica de 2640 kg/m³ e a maior proporção das suas partículas, cerca de 73%, tinha tamanho entre 150 e 250 micrometros e uma proporção de mais de 86 % de SiO₂. Trata-se da CBC da mesma coleta de Molin Filho *et al.* (2017). Todos os materiais sólidos utilizados estavam secos. A Figura 1 apresenta uma amostra de CBC, após o peneiramento na peneira #30, preparada para a aplicação no concreto.



Figura 1 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar pronta para a utilização

2.2. Métodos para o desenvolvimento do Concreto Autoadensável

No início foram assumidos para o desenvolvimento do traço do CAA os fatores a/c (relação água por cimento), ar/c (relação areia por cimento), f/c (relação filer por cimento), sp/c (relação superplastificante por cimento) obtidos por Molin Filho *et al.* (2017) para argamassa autoadensável, com taxa de 10% de substituição de areia por CBC. Em seguida foram dimensionados os consumos dos materiais considerando o volume de argamassa de 70% (V_{arg}) na composição do concreto, com a massa específica (ρ_{arg}) da argamassa de referência. Este percentual de argamassa proporciona uma quantidade de finos por metro cúbico de CAA adequadas as especificações da EFNARC (2005) de 380 Kg/m³ a 600 Kg/m³.

Baseados na proposta de Gomes (2002) foram elaboradas a Equação 1 e a Equação 2 para o dimensionamento da massa de cimento (M_c) e da massa de brita (M_{br}), os quais servem de base para o dimensionamento dos demais materiais.

$$M_c = \frac{\rho_{arg} \times V_{arg}}{1 + a/c + f/c + sp/c + ar/c + CBC/c}$$

Equação 1 – Dimensionamento da massa de cimento (M_c)

Na Equação 1, além das variáveis já apresentadas nesta seção e na Equação 1, define-se M_c

como sendo a massa de cimento em kg para 1 m³ de concreto, ρ_{arg} como a massa específica da argamassa em kg/m³ e CBC/c como fator CBC/cimento. O fator CBC/c utilizado foi de 0,2 que representa 10% do valor de concretos com 100% de areia para fatores de ar/c de 2 (GOMES, 2002). Na sequência, com o auxílio da Equação 1, calcula-se a massa da brita para 1 m³ de concreto.

$$M_{br} = (1 - V_{arg}) \times \rho_{br}$$

 Equação 2 – Dimensionamento da massa de brita (M_{br})

Na Equação 2 a relação M_{br} representa a massa da brita em kg para 1 m³ de concreto e a relação ρ_{br} , a massa específica da brita em kg/m³. Os parâmetros utilizados para verificação do atendimento das características autoadensáveis do concreto desenvolvido nos ensaios são apresentados na Tabela 1. Realça-se que, quando a propriedade investigada tivesse recomendação tanto da NBR 15823-1 (ABNT, 2017) quanto por Gomes e Barros (2009), seguia-se como primeiro critério de aceitação, o teste que atendesse pelo menos o parâmetro da norma da ABNT. Também destaca-se que o método descrito na norma NBR 15823-6 (ABNT, 2017) para determinação da resistência à segregação pelos métodos da coluna de segregação e da peneira, foi substituído pela análise de segregação do método do Tubo-U Gomes e Barros (2009).

Método de ensaio	Propriedade Investigada	Parâmetros			
		Classe	Unidade	ABNT 15823-1:2017	Gomes e Barros (2009)
Teste de espalhamento NBR 15823-2 (ABNT, 2017)	Espalhamento (<i>Slump-flow Test</i>)	SF 1	mm	550 a 650	600 a 800
		SF 2		660 a 750	
		SF 3		760 a 850	
	Viscosidade plástica aparente t_{500} sob fluxo livre	VS 1	s	≤ 2	2 a 7
		VS 2	s	> 2	
Anel-J NBR 15823-3 (ABNT, 2017)	Habilidade passante pelo Anel-J	PJ 1	mm	0 a 25	-
		PJ 2	mm	25 a 50	-
	Blocking step (efeito do bloqueio)	BS _J	mm	-	0-10
Caixa-L NBR 15823-4 (ABNT, 2017)	Habilidade passante pela Caixa-L	Tempo de escoamento T_{L20}	s	-	≤ 2
		Tempo de escoamento T_{L40}	s	-	≤ 4
		PL 1	(H2/H1)	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$
		(com duas barras de aço)			
		PL 2	(H2/H1)	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$
		(com três barras de aço)			
Funil-V NBR 15823-5 (ABNT, 2017)	Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V	VF 1	s	< 9	6 a 15
		VF 2	s	9 a 25	
Tubo-U	Resistência à segregação pela análise do Tubo-U	RS	%	-	$\geq 0,9$

Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009) e NBR 15823-1 (ABNT, 2017)

Tabela 1 - Faixa de parâmetros para os ensaios autoadensáveis

Em virtude da busca da trabalhabilidade desejada nos testes autoadensáveis, foram realizadas correções experimentais da dosagem de superplastificante e da água, durante a produção do

concreto. No primeiro momento pretendia-se apenas atuar nas correções da relação sp/c da referência obtida na argamassa. Para a produção do concreto foram utilizadas: 1 betoneira de 400 litros, 1 carro-de-mão, 1 concha metálica, 1 balança com capacidade de $100 \text{ kg} \pm 20 \text{ g}$, oito moldes cilíndricos ($\varnothing 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$), 1 balança de precisão com capacidade de $5 \text{ kg} \pm 0,01 \text{ g}$, aparatos específicos descritos nos procedimentos das normas NBR 15823-1-5 (ABNT, 2017), recipientes para medir e coletar os materiais e duas pessoas para operacionalização. A sequência de mistura dos materiais na betoneira seguiu o roteiro descrito por Molin Filho *et al.* (2012).

As avaliações de resistência a compressão e a tração foram realizadas aos 28 dias de idade para lotes de quatro corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, sendo que estes permaneceram em câmara úmida ($UR = 95 \pm 5\%$). Realça-se que as moldagens não utilizaram nenhuma energia de adensamento e seguiram as demais especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016). Para a análise da resistência à compressão axial, foi realizado o ensaio normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007) com posterior classificação pela NBR 8953 (ABNT, 2015). Para a análise da resistência à tração, por compressão diametral foi realizado o ensaio recomendado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), o qual teve seus resultados posteriormente avaliados pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.3. A Análise de Agrupamentos Hierárquicos

Na última fase foi realizada a análise HCA (*Hierarchical Cluster Analysis*), com os resultados dos traços de CAA obtidos juntamente com mais sete composições que possuíam apenas experimentações e aprovações nos testes preliminares de Espalhamento (*Slump-flow Test*), de Viscosidade plástica aparente t_{500} sob fluxo livre e do *Blocking step* (efeito do bloqueio). As projeções para novas experimentações, que possam ser submetidas a avaliação de toda a conjuntura dos testes autoadensáveis apresentados na Tabela 1. O critério de aceitação da análise HCA requiritava que os concretos a serem experimentados estivessem agrupados nas mesmas categorias hierárquicas do concreto autoadensável desenvolvido, isso para os três testes preliminares. Com isso, espera-se o favorecimento técnico de orientação para as novas projeções experimentais de concreto autoadensável, com até 20% de substituição de areia por CBC. No dendrograma final do algoritmo foram desenvolvidos *heatmaps* capazes de correlacionar os valores do algoritmo testado. No *heatmaps* cada coluna refere-se a um dos três referidos testes (espalhamento, viscosidade plástica aparente e do *blocking step*), de modo que a cor vermelha representa valores acima da média, e a cor verde valores abaixo da média entre todas as amostras do teste correspondente, sendo que quanto mais escuras as cores, mais próximas estão da média e, quanto mais claras, mais distantes.

3. Resultados e Discussões

3.1. Desenvolvimento do Concreto Autoadensável

A temperatura ambiente durante a produção dos concretos manteve-se na faixa de $25^\circ\text{C} \pm 3$, com umidade relativa do ar de $55\% \pm 15$. A argamassa autoadensável de referência possuía taxa de substituição de areia por CBC de 10% e a seguinte composição unitária, em massa, de 1: 1,8: 0,2: 0,5: 0,40: 0,0042 (cimento: areia: CBC: água: filler: superplastificante), com massa específica de 2200 kg/m^3 .

No desenvolvimento do CAA, em um primeiro momento, foi relevada que a tendência do consumo de superplastificante na proporção 0,42% em relação ao cimento seria um ponto de partida plausível. Assim, as composições (traços) prospectadas foram obtidas pelas seguintes relações apresentadas na Tabela 2. Tais índices de consumo foram obtidos após ajustes de traços experimentais intermediários que não estão discutidos neste trabalho, com a variação de lançamento dos fatores a/c e sp/c.

CONCRETO	1	1R
Volume argamassa	70%	70%
Cimento	1	1
Filer	0,40	0,40
Areia	1,80	1,80
CBC	0,20	0,20
Brita	2,21	2,21
Água	0,50	0,45
Superplastificante	0,0055	0,0055

Tabela 2 – Traço unitário do concreto 1

Os resultados das propriedades autoadensáveis para o concreto 1 e da sua repetição conforme (concreto 1R) estão apresentados na Tabela 3.

Método de ensaio ⁽¹⁾	Propriedade Investigada	concreto 1			concreto 1R		
		Valores	ABNT 15823-1:2017	Gomes e Barros (2009)	Valores	ABNT 15823-1:2017	Gomes e Barros (2009)
ESPALHAMENTO	Espalhamento (Slump-flow)	675 mm	SF 2	ok	701,5 mm	SF 2	ok
	Viscosidade plástica aparente t_{500} sob fluxo livre	4,3 s	VS 2	ok	1,8 s	VS 1	não atendido
ANEL-J	Habilidade passante pelo Anel-J	-	-	-	2 mm	PJ 1	-
	Blocking step (efeito do bloqueio)	4,8 mm	-	ok	3,2 mm	-	ok
CAIXA-L	Tempo de escoamento T_{L20}	0,6 s	-	ok	0,4 s	-	ok
	Tempo de escoamento T_{L40}	0,8 s	-	ok	0,7 s	-	ok
	Habilidade passante pela Caixa-L	0,80	PL 2	ok	0,93	PL 2	ok
FUNIL-V	Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V	9,7 s	VF 2	ok	5,1 s	VF 1	não atendido
TUBO-U	Resistência à segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2, RS 3)	-	-	-	1,08	-	ok
		-	-	-	1,00	-	ok (RS)
		-	-	-	1,09	-	ok

Nota: Os campos com o traço “-” para os métodos de ensaio indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do concreto 1 e do concreto 1R

Além das informações da Tabela 3, destaca-se que o Concreto 1 teve massa unitária aferida de 2433 Kg/m³ enquanto o Concreto 1R obteve 2404 Kg/m³. O concreto 1 foi produzido com quantidades apenas para o estudo dos ensaios de espalhamento, Anel-J (efeito de bloqueio), Caixa-L e Funil-V. Além destes concretos, mais sete, descritos como concretos A, B, C, D, E, F e G também foram produzidos pela análise dos três ensaios da sequência “A” e, estão apresentados na Tabela 5 da próxima seção.

Realça-se que o concreto 1 (Tabela 3) alcançou índices satisfatórios em todos os parâmetros investigados, inclusive no tempo de escoamento e na habilidade passante por armaduras da Caixa-L. Logo, este foi o motivo da repetição direta do concreto 1, que teve controlada apenas

com o lançamento da água e do superplastificante na mistura. Por isso, o concreto 1R (duplicata) diferiu do concreto 1 no fator a/c que foi de 0,45 (Tabela 3). A Figura 2a apresenta uma das duas medições no espalhamento, enquanto a Figura 2b apresenta uma ilustração do espalhamento no Anel-J com medida do *Blocking step*, ambas ilustrações são do concreto 1R. Evidenciou-se uma boa coesão entre a argamassa e o agregado graúdo, ao mesmo tempo que também observava-se um espalhamento homogêneo em todas as direções em relação ao centro.

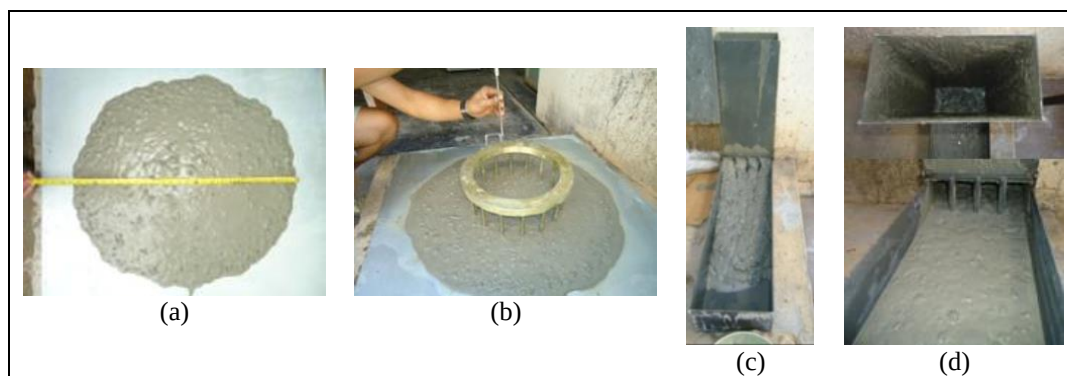


Figura 2 – Ensaio de espalhamento (a), Anel-J (b) e Ensaio da Caixa-L (c) e (d) para o concreto 1R

O desempenho dos parâmetros do ensaio da Caixa-L (Figura 2c e 2d) também obtiveram resultados satisfatórios por todos os critérios de autoadensibilidade. Na Figura 2c apresentou-se o espalhamento do concreto 1R, por entre as barras da caixa durante o ensaio. Na Figura 2b alguns detalhes do escoamento completo na coluna vertical, na parte superior da figura e da planicidade e envolvimento das barras de aço no compartimento horizontal, na parte inferior da referida figura.

Os resultados para o concreto 1R apresentados na Tabela 3 informam que todos os requisitos autoadensáveis avaliados obtiveram aprovações pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017) e, apenas dois dos requisitos, o tempo na posição 500 (t_{500}) e o tempo no Funil-V, não obtiveram enquadramento por Gomes e Barros (2009). Ressalta-se que estes parâmetros inerentes à viscosidade plástica aparente eram dependentes de medições realizadas por um cronômetro manual controlado pelo operador e, assim, susceptíveis às variações tanto nos acionamentos iniciais, como nas paradas finais de seus respectivos movimentos avaliados.

Os índices alcançados pelo concreto 1R, para os quesitos avaliados na habilidade passante (PL e PJ), demonstraram uma excelente capacidade de escoamento entre armaduras. O mesmo nível de resultado foi alcançado pelos índices de resistência à segregação do concreto, tendo como fator RS = 1 pela metodologia de Gomes e Barros (2009). Algumas ilustrações durante os ensaios com o concreto 1R podem ser visualizadas na Figura 3.

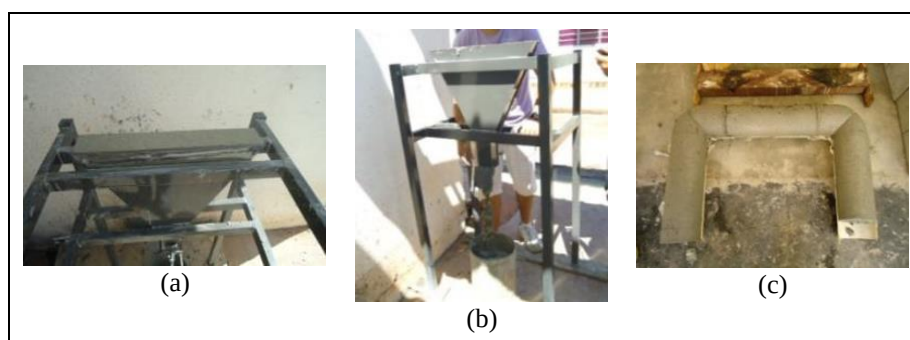


Figura 3 – Ensaio com o Funil-V (a) e (b) e com Tubo-U aberto (c) para o concreto 1R

Especificamente, a Figura 3a apresentou o nivelamento do concreto antes do ensaio e, na Figura 3b foi possível visualizar o escoamento do concreto durante o ensaio. Já a Figura 3c apresentou o Tubo-U aberto após o tempo de cura necessário. Observa-se ainda na Figura 3c que restou uma fatia na extremidade de cerca de 8 cm sem preenchimento dentro do esquema do tubo na face oposta do lançamento do concreto. Em contrapartida, todas as faixas (RS₁, RS₂ e RS₃) alcançaram resultados satisfatórios de seus índices, algo que é difícil. Na tabela 4, com o auxílio das equações 1 e 2 foram projetados os consumos dos materiais para a produção de 1 m³ de concreto, mediante os fatores assumidos.

Composição	concreto 1R (kg)
Cimento	396,0
Filer	158,4
Areia	712,8
CBC	79,2
Brita	875,2
Água	178,2
Superplastificante	2,18

Tabela 4 – Consumo de materiais para 1 m³ do concreto 1R

O concreto 1R encontra-se na faixa de consumo de cimento recomendada pela EFNARC (2005), de 350 kg/m³ a 450 kg/m³. Avaliando este consumo diretamente pelos concretos investigados por Gomes (2002), realça-se que o concreto 1R necessita de consumos de cimento próximos dos concretos com volume de pasta, $V_p = 35\%$ (398 kg de cimento) desenvolvido nos seus experimentos. A substituição de 10% de areia por CBC no desenvolvimento do concreto 1R possibilitou a redução significativa de 79 kg de areia por m³ de concreto autoadensável.

Perante a classificação dos anexos A.1 e A.2 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017), o concreto 1R, com taxa de 10% de substituição de areia por CBC obtido, pode ser caracterizado como um concreto autoadensável adequado para a maioria das aplicações pelo ponto mais alto de concretagem. O anexo A.2 ainda informa que este CAA dependerá de controles de exsudação e segregação durante a sua operacionalização. Como exemplo de aplicação à norma destacam-se as seguintes recomendações para este CAA: lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e para concreto aparente. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e à tração (compressão diametral) para o concreto 1R, os colocaram no patamar de resistência mecânica pela classificação da NBR 8953 (ABNT, 2015), como pertencentes ao grupo I e a classe C35. Sendo que a resistência característica à compressão (f_{ck}) foi de 39,75 MPa (Média simples de 40,88 MPa) com σ de 0,69 para o lote e, a resistência característica à flexão por compressão diametral ($f_{t,D}$) foi de 2,47 MPa com σ de 0,71 para o lote de corpos de provas. Pela NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando que o concreto teve fator $a/c = 0,45$ e resistência superior a 35 MPa, pode-se classificá-lo como pertencente à classe III de agressividade ambiental. Os resultados de resistência à compressão do CAA com 10% de substituição de areia por CBC são bem significativos quando comparados aos valorosos resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias de Lima *et al.* (2011), que foi de 27,98 MPa para o concreto com 30% de substituição e, de 28,72 MPa para o concreto com 50% de substituição de areia por CBC.

3.2. Novas projeções de CAA's pela análise de Agrupamentos Hierárquicos

Com base nas composições do concreto 1 e do concreto 1R foram realizadas simulações computacionais de agrupamentos hierárquicos (*HCA*) com mais sete composições (A, B, C, D, E, F e G) de concretos desenvolvidas paralelamente e, que estão apresentadas na Tabela 5. Todas elas possuem volume de argamassa de 70%, relação de filer calcário por cimento de 0,4 e cimento (referência) de 1 Kg.

Composições unitárias em Kg						Espalha- mento (<i>Slump- flow</i>)	Viscosidade plástica aparente t_{500} sob fluxo livre	Efeito de bloqueio (<i>Blocking step</i>)
Concreto	Areia (M_{ar})	CBC	Brita (M_{br})	Água	Superplasti- ficante	mm	s	mm
A	2	0	2,12	0,5	0,005	686	2,1	8,5
B	2	0	2,12	0,42	0,005	678	2	9,5
C	2	0	2,12	0,45	0,0055	745	1	9,5
D	1,6	0,4 (20%)	2,21	0,67	0,0042	645	3	11
E	1,6	0,4 (20%)	2,21	0,5	0,0055	685	2,8	19
F	1,7	0,3 (15%)	2,21	0,5	0,0055	675	2,4	11,8
concreto 1	1,8	0,2 (10%)	2,21	0,5	0,0055	675	4,3	4,8
G	1,8	0,2 (10%)	2,21	0,5	0,0055	665	1,3	7,3
concreto 1R	1,8	0,2 (10%)	2,21	0,45	0,0055	702	1,8	3,2

Tabela 5 – Composições unitárias de concretos baseadas em 1 Kg de cimento e resultados

A Figura 4 apresenta o dendrograma oriundo do algoritmo *HCA* desenvolvido no *software Matlab (Mathworks, Natick, USA)*, com um *heatmap* referente aos testes de espalhamento, viscosidade plástica aparente e do *blocking step* (efeito do bloqueio).

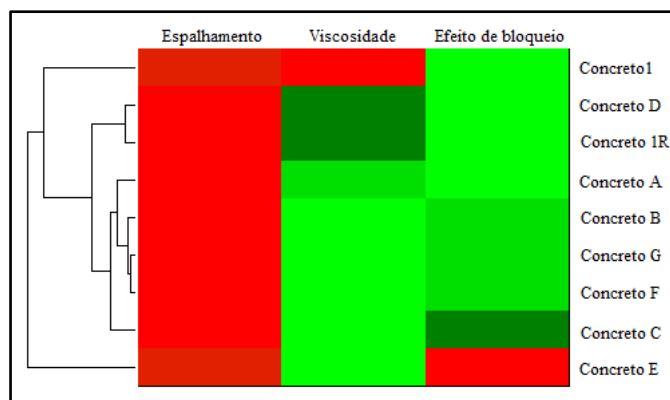


Figura 4 – Dendrograma com *heatmap* das similaridades entre amostras de concreto

Na Figura 4 é possível destacar o agrupamento do concreto D (20% de CBC) que apresenta característica compatível de classificação nos três ensaios assumidos com o concreto 1R. Desta forma, analisando por grupos de ensaio conforme propõe o método, pode-se enfatizar que ele sempre estará rearranjado hierarquicamente no mesmo grupo do CAA de referência (concreto 1R). Vale também o destaque do concreto A (sem CBC) que possuiu reorganização hierárquica de mesmo nível do concreto 1R em dois dos três testes e, isso é significativo para novas experimentações. Portanto, novos planejamentos experimentais podem considerar taxas de substituição de até 20% de areia por CBC para a obtenção de CAA. Os valores de substituição deste intervalo podem ser experimentados com as variações controladas de superplastificante

por cimento de 0,0042% a 0,0055%, em massa, conforme as projeções de consumos declaradas na Tabela 5. Releva-se que o fator a/c de 0,67 é considerado alto para CAA's, logo seria interessante a realização de simulações que fixassem valores ótimos de a/c obtidos em outros traços com a variação do fator sp/c, verificado como tolerável nesta pesquisa.

4. Conclusão

Esta pesquisa desenvolveu um traço de concreto autoadensável com CBC de acordo com os parâmetros autoadensáveis descritos na NBR 15823-1 (ABNT, 2017) e complementados pelos requisitos propostos por Gomes e Barros (2009). O CAA desenvolvido (concreto 1R), com taxa de substituição de 10% de areia por CBC foi obtido com a seguinte composição unitária, em massa, de 1: 1,8: 0,2: 2,21: 0,45: 0,40: 0,0055 (cimento: areia: CBC: brita: água: filer: superplastificante) e massa específica de 2404,0 kg/m³. Logo, destaca-se que é possível utilizar a CBC na produção de CAA, com a dosagem de todos os seus componentes dentro das faixas características desta tecnologia. Ressalta-se também a contribuição significativa para a redução no consumo de areia nos traços de concreto autoadensável, neste caso de 79 kg/m³.

No final, verificou-se pela análise HCA, aplicada nos resultados de ensaios preliminares de autoadensibilidade de mais sete traços, que é possível desenvolver composições de CAA com taxas de substituição de areia por CBC de até 20%. Destaca-se que para estes novos desenvolvimentos estão previstas faixas admissíveis e características de superplastificante por cimento de 0,42% à 0,55%, em massa. Contudo, realça-se que esta iniciativa obteve resultados para o avanço do desenvolvimento de novas tecnologias em prol da sustentabilidade. Ao passo que o CAA com CBC propõe a utilização de um resíduo, também possibilita a redução do uso de um recurso de extração natural.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738.** *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.* Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739.** *Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.* Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118.** *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.* Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211.** *Agregados para concreto – especificação.* Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215.** *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.* Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222.** *Argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por comp. diametral de corpos de prova cilíndricos.* Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953.** *Concreto para fins estruturais- Classificação por grupos de resistência.* Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1 à 6.** *Concreto auto-adensável.* Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1.** *Água para amassamento do concreto - requisitos.* Rio de Janeiro, 2009.
- BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M.** *Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash.* Cement and Concrete Composites. Vol. 56, p. 32-45, 2015.
- CASTALDELLI, V.N.; MORAES, J.C.B; AKASABI, J.L; MELGELS, J.L.P; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M.M.** *Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/CBC) in SiO₂/K₂O alkali-activated binders.* Fuel, Vol. 174, p. 307-316, 2016.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar. Primeiro levantamento da safra de cana-de-açúcar, maio. Brasília: CONAB 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana> >. Acesso em: 13 ago. 2018.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; TAVARES, L.M.; FAIRBAIRN, E.M.R. Pozzolan Activity and Filler Effect of Sugar Cane Bagasse Ash in Portland Cement and Lime Mortars. Cement and Concrete Composites. Vol. 30, n. 5, p. 410-418, 2008.

EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. The Europe Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use. In: **EFNARC** Maio, 2005. Disponível em: < <http://www.EFNARC.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> > Acesso em: 15 de ago. 2018.

FIESP/CIESP – FEDERAÇÃO DA INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/ CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Ampliação da oferta de energia através da biomassa. São Paulo: 2001. Disponível em: < <http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/ampliacao-da-oferta-de-energia-atraves-de-biomassa/> >. Acessado em: 03 ago. 2018.

GOMES, P.C.C. Optimization and Characterization of High-Strength Self- Compacting Concrete. 2002, 139 p. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R.de. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. São Paulo: Pini, 2009.

GREENACRE, M.; PRIMICERIO, R. Multivariate Analysis of Ecological, Bilbao: Fundación BBVA, 1st Edition, 2013.

LAGER, G.A.; JORGENSEN, J.D.; ROTELLA, F.J. Crystal structure and thermal expansion of α -quartz SiO_2 at low temperatures. Journal of Applied Physics. Vol. 53.10, pp. 6751-6756, 1982.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F.do.C.R.; MORETTI, J.P.; PORTELLA, K.F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. Ambiente Construído. Vol. 11, n. 2, p. 201-212, 2011.

MAHESH, S. Self Compacting Concrete And Its Properties. International Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 4, n. 8, p. 72-80, 2014.

MOISÉS, M.P.; DA SILVA, C.T.P.; MENEGUIN, J.G.; GIROTTO, E.M.; RADOVANOVIC, E. Synthesis of zeolite NaA from sugarcane bagasse ash. Materials Letters. Vol. 108, p. 243-246, 2013.

MOLIN FILHO, R.G.D. Concreto auto-adensável com cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 2012, 164 p. Mestrado em Engenharia Urbana. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

MOLIN FILHO, R.G.D.; SOUZA, R.C.T.; VANDERLEI, R.D.; PARAISO, P.R. ; JORGE, L.M.de,M. Validação dos parâmetros reológicos de argamassa autoadensável com cinza do bagaço de cana-de-açúcar: uma abordagem baseada em redes neurais multilayer perceptron. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2017, Ponta Grossa. Anais do VII CONBREPRO, 2017.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F.C.R.; REZENDE, M.A.M.; GROMBONI, P.P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasseash sand (SBAS) in concrete. Construction and Building Materials. Vol. 113, p. 317-323, 2016.

NOGUEIRA, N.O.; TOMAZ, M.A.; ANDRADE, F.V.; REIS, E.F.D.; BRINATEM S.V.B. Influência da aplicação de dois resíduos industriais nas propriedades químicas de dois solos cultivados com café arábica. Revista Ciência Agronômica. Vol. 43, n. 1, 2012.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. Jornal of advance concrete technology. Vol. 1, n. 1, p 5-15, 2003.

Agradecimentos

A CAPES pelo incentivo dado aos pesquisadores. Ao laboratório de materiais de construção civil do DEC-UEM. Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PEQ-UEM). A BASF S/A do Brasil pelo patrocínio do aditivo. Ao grupo Usaçúcar por todo incentivo e doação da CBC.