

Behavior of the self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash in the fresh and hardened state

Estudo do comportamento da argamassa autoadensável com cinza do bagaço de cana-de-açúcar no estado fresco e endurecido

V. C. SANTOS ^a

viniciuscarrijodossantos@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7501-4998>

R. D. VANDERLEI ^a

rdvanderlei@uem.br
<https://orcid.org/0000-0001-5676-6951>

K. K. MORAES ^a

katherinekaneda@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4461-850X>

E. T. D. F. ROSINA ^a

eti_tayna@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4796-9284>

G. M. BALBINO ^a

guilhermegalbino1@live.com
<https://orcid.org/0000-0001-6394-3805>

Abstract

Self-compacting concrete (SCC) is a material with high workability and moderate viscosity when compared to conventional concrete. Due to its advantages, the SCC has been investigated in the last decades and the research studies the use of new components in its structure and the search for the improvement of its performance, both in the fluid and in the hardened state. The goal of this study was to evaluate the behavior of self-compacting mortars with limestone filler and with the addition of sugarcane bagasse ash (SBA) partially replacing the small aggregate. To reach this goal, initially, a rate of replacement of natural sand by SBA was set. Afterwards, slump-flow and funnel-V tests were carried out in order to check the behavior of the mortars in the fresh state. After checking the behavior of the mortars in their fresh state, the different mix proportions that achieved the best aspects of fluidity and viscosity was selected, and, for self-compacting mortars, specimens were molded to determine tensile strength at 28 days, and compressive strength at 7 and 28 days. The experimental analyses demonstrated an increase in viscosity and reduction in fluidity with increasing content of limestone filler, facilitating the obtaining of self-compacting mortars. Regarding the performance of the material in the hardened state, the mortars showed a slight increase in tensile and compressive strength due to the filler effect of fines. It was possible to replace 40% of the small aggregate with SBA.

Keywords: self-compacting mortar, sugarcane bagasse ash, limestone.

Resumo

O concreto autoadensável (CAA) é um material que apresenta alta trabalhabilidade e moderada viscosidade quando comparado ao concreto convencional. Em função de suas vantagens, nas últimas décadas, o CAA vem sendo investigado e as pesquisas abordam a utilização de novos componentes em sua estrutura e a busca pela melhoria de seu desempenho, tanto no estado fluido quanto no endurecido. Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento de argamassas autoadensáveis com filler calcário e com a adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em substituição parcial ao agregado miúdo. Para atingir este objetivo, inicialmente, uma taxa de substituição de areia natural por CBCA foi definida. Na sequência, foram realizados ensaios de espalhamento e funil-V com o intuito de verificar o comportamento das argamassas no estado fresco. Após a verificação do comportamento das argamassas em seu estado fresco, a série de traços que obteve os melhores aspectos de fluidez e viscosidade foi selecionada, e, para as argamassas autoadensáveis foram moldados corpos-de-prova para determinação da resistência à tração aos 28 dias, e resistência à compressão aos 7 e 28 dias. As análises experimentais demonstraram um aumento de viscosidade e redução da fluidez à medida em que se aumentava o teor de filler calcário, facilitando a obtenção de argamassas autoadensáveis. Com relação ao desempenho do material no estado endurecido, as argamassas apresentaram leve incremento de resistência à tração e à compressão, devido ao efeito filler dos finos. Foi possível substituir 40% do agregado miúdo por CBCA.

Palavras-chave: argamassa autoadensável, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, filler calcário.

^a State University of Maringá, Civil Engineering Department, Maringá, PR, Brazil.

1. Introdução

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, porém, com toda dinâmica e inovações nos projetos de engenharia, exigiu-se estudos aprofundados a respeito desse componente da construção civil, desenvolvendo-se novos tipos de concreto que vão além do concreto convencional, como o concreto de alto desempenho, concreto reforçado com fibras, concretos com altos teores de adições pozolânicas, concretos aparentes, brancos, coloridos, sustentáveis e autoadensáveis, entre outros [1].

O surgimento do material que posteriormente seria chamado de concreto autoadensável foi justificado por [2], em função da baixa habilidade que os trabalhadores possuíam para realizar uma concretagem satisfatória. A demanda por estruturas de concreto cada vez mais duráveis também incentivou o desenvolvimento de um material que se espalhasse pela ação de seu peso próprio, material este que reduziria a necessidade de intervenção humana, tendo como resultado peças melhor concretadas.

O concreto autoadensável (CAA) é um material que não necessita de vibração durante as fases de lançamento e de adensamento, no entanto, para que seja considerado autoadensável ele deve atender a alguns requisitos: apresentar-se fluido, não apresentar segregação, exsudação, ou surgimento de bloqueios em peças densamente armadas [3].

Para determinar a proporção de materiais constituintes do concreto autoadensável de maneira eficaz, é importante dispensar uma atenção especial no estudo a respeito da dosagem da argamassa, tendo em vista que o CAA é composto basicamente por argamassa e agregado graúdo. Por este motivo, torna-se mais conveniente realizar os ajustes e testes na fase da argamassa, que posteriormente irá compor o CAA. Quando o concreto é deformável, a pasta com alta viscosidade impede o aumento da tensão interna sobre as partículas de agregado graúdo. A alta deformabilidade do concreto autoadensável pode ser obtida apenas pelo emprego de aditivo superplastificante, sem a necessidade de alteração da relação água/cimento da argamassa [2]. A obtenção de bons resultados em concretos autoadensáveis é possível por meio da realização de estudos referentes à dosagem de argamassa. Por meio do estudo da argamassa é possível determinar se o material apresenta fluidez demasiada, baixa viscosidade, segregação e exsudação. A etapa de dosagem da argamassa é muito importante, tendo em vista que nesta fase as proporções de materiais devem ser constituídas de maneira que o CAA não perca trabalhabilidade.

Outro fator preponderante na produção de concretos é o elevado consumo de agregados, dentre eles, a areia, um recurso natural muito explorado e utilizado pela construção civil como agregado miúdo.

A extração de materiais aluvionares em rios vem sendo fortemente condenada por diversos setores da sociedade, isto se deve principalmente em função do potencial desequilíbrio que esta atividade pode causar na dinâmica fluvial, em consequência imediata a esta atividade ocorre a redefinição dos limites do canal, seja pela retirada ou adição de materiais, que por sua vez pode promover mudanças no padrão de fluxo e transporte de sedimentos [4].

Na indústria sucroalcooleira, um dos subprodutos gerados a partir da produção de açúcar, álcool e outros produtos, é o bagaço da cana-de-açúcar (BCA). A partir da cogeração de energia nas usinas sucroalcooleiras, processo em que o BCA é utilizado como combustível para as caldeiras na geração de energia, origina-se um resíduo denominado Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar (CBCA), que até o momento não possui valor econômico para a indústria.

Tendo em vista os desequilíbrios ambientais que a extração da areia pode causar, a utilização de materiais renováveis e alternativos pode ser uma solução. Assim sendo, uma das propostas deste estudo consiste na utilização da CBCA, material proveniente de fontes renováveis, em substituição parcial ao agregado miúdo (areia), na dosagem de argamassas autoadensáveis.

No Brasil, o setor sucroalcooleiro consiste em um segmento muito bem estruturado, em termos de sua cadeia produtiva. O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia e China. Para a safra 2016/2017, espera-se produzir no país e destinar à indústria 684,77 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (3,27% a mais do que a safra anterior), distribuídos em uma área de cerca de 8,97 milhões de hectares em todos os estados produtores. O maior estado brasileiro produtor de cana-de-açúcar é São Paulo (52,30 % da área plantada), sendo que o Paraná ocupa a 4ª posição no *ranking* dos estados produtores, com 7,00 % de toda a área brasileira plantada [5].

Conforme dados da FIESP/CIESP [6], a cada tonelada de cana-de-açúcar processada são gerados 260 quilogramas de BCA, destes 260 quilogramas de BCA destinados à queima, gera-se 6,20 quilogramas de CBCA. Sendo assim, ao aplicar estes valores à projeção da safra 2016/2017 de cana-de-açúcar no Brasil, considerando que toda a produção esperada seja destinada à indústria, seriam geradas aproximadamente 178 milhões de toneladas de BCA, caso todo este bagaço fosse destinado à queima, seriam geradas aproximadamente 4,24 milhões de toneladas de CBCA na safra em questão. O objetivo deste estudo é desenvolver argamassa com características autoadensáveis, substituindo parcialmente o agregado miúdo por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e utilizando como finos o filler calcário para controlar a viscosidade. Avaliando assim, o comportamento de suas propriedades mecânicas (compressão e tração).

Tabela 1
Caracterização do cimento CP V ARI Ultra [8]

Item de controle	Unidade	Média
Início da pega	horas	1,50
Término de pega	horas	8,90
Massa específica	g/cm ³	3,20
Resistência a compressão ao término do 1º dia	MPa	11,10
Resistência a compressão aos 3 dias	MPa	23,90
Resistência a compressão aos 7 dias	MPa	32,80
Resistência a compressão aos 28 dias	MPa	36,70

Tabela 2
Caracterização da areia

Características	Unidade	Valores
Massa específica (γ_s)	kg/dm ³	2,65
Absorção do agregado (ABS)	%	-
Massa unitária solta (MU)	kg/dm ³	1,52
Massa unitária compactada (MUC)	kg/dm ³	1,63
Diâmetro máximo característico (ϕ_{max})	mm	1,20
Módulo de finura	%	2,84

2. Materiais e programa experimental

O programa experimental foi dividido em 4 fases e foi desenvolvido no laboratório de materiais de construção da Universidade Estadual de Maringá (UEM). As etapas realizadas no programa experimental são apresentadas a seguir:

- I Caracterização dos materiais - Fase 1;
- II Estudo da composição do agregado miúdo - Fase 2;
- III Determinação da proporção ótima de agregado miúdo – Fase 3;
- IV Dosagem da argamassa autoadensável - Fase 4;
- V Avaliação da argamassa no estado endurecido – Fase 5.

Nos tópicos 2.1 a 2.5 apresentam-se, detalhadas, cada uma das etapas do programa experimental.

2.1 Materiais

Os materiais constituintes na argamassa autoadensável foram: Cimento; água; areia (granulometria média e fina); Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA); Fíler Calcário Calcítico, e; aditivo superplastificante.

O cimento utilizado para dosagem da argamassa foi o CPV ARI RS, denominado Cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos fornecido pela Votorantim Cimento LTDA. Para a determinação das características do material realizou-se a caracterização do cimento segundo a NBR 5733:1991 [7]. Os resultados da caracterização fornecida pelo fabricante são apresentados na tabela 1. De acordo com a NBR 5733:1991 [7], que trata dos cimentos Portland de alta resistência inicial, o aglomerante utilizado na pesquisa atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem do clínquer Portland, e é constituído principalmente por silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona durante a operação a quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. A areia utilizada é de origem quartzosa da região de Maringá – PR. A composição granulométrica da areia foi baseada na NBR NM

Tabela 3
Informações sobre o aditivo superplastificante utilizado [14]

Fabricante	Nome	Função	Base química	Teor de sólido (%)	pH	Viscosidade (cps)	Densidade (g/cm ³)	Aspecto	Solubilidade	Cor
BASF S/A	Glenium 51	Aditivo superplastificante de terceira geração	Éter policarboxílico	28,50 31,50	5-7	<150	1,07 1,11	Líquido	Total na água	Branco turvo

Análise granulométrica do agregado miúdo

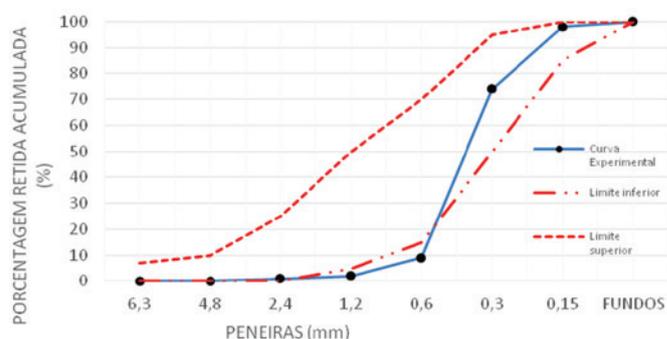


Figura 1
Distribuição granulométrica da areia utilizada segundo a NBR 7211:2009 [10]

248: 2003 [9], e para a classificação deste agregado foi utilizada a NBR 7211: 2009 [10]. Utilizou-se, ainda, a NBR NM 30:2001 [11] para a determinação da absorção de água do agregado miúdo. A NBR NM 52:2002 [12] foi aplicada a fim de determinar a massa específica e a massa específica aparente do agregado miúdo. Para a determinação da massa unitária e do volume de vazios do agregado miúdo foi utilizada a NBR NM 45: 2006 [13]. Na tabela 2 apresentam-se os resultados para a caracterização da areia.

O aditivo utilizado na pesquisa foi o GLENIUM 51, sendo este classificado como de terceira geração para concreto, o produto é líquido e livre de cloretos, é aplicado geralmente em concretos de alto desempenho, onde se objetiva minimizar a relação água/cimento e aumentar a durabilidade do material. O aditivo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que age como dispersante do material cimentício, proporcionando alta redução no consumo de água e a superplastificação do material, aumentando a trabalhabilidade do concreto sem alterar o tempo de pega. As informações do GLENIUM 51 podem ser visualizadas na tabela 3.

Tabela 4

Informações sobre o filer calcário calcítico utilizado [15]

Fabricante	Nome	Função	Base química	Base granulométrica	Cor
Cazanga	Calcário calcítico	Aplicações na indústria de construção e de alimentação animal	CaO: mínimo de 51,80% MgO: máximo de 1% Ca: mínimo de 37% Mg: máximo de 0,63%	94% passante em peneira 325 mesh 94% menores que 45 µm (0,045mm)	Branca

O filer calcário utilizado foi o de origem calcítica e as suas características, fornecidas pelo fabricante, apresentam-se na tabela 4. A cinza do bagaço de cana-de-açúcar, utilizada neste estudo, foi coletada na Usina Santa Terezinha no distrito de Iguatemi, nas proximidades de Maringá, região Noroeste do Paraná. Para realização da pesquisa, utilizou-se a cinza em condição natural, tendo como único beneficiamento o peneiramento na malha 0,595mm (#30), com o objetivo de retirar o material grosseiro e impurezas. Como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada nesta pesquisa é do mesmo lote da utilizada nas pesquisas de Nunes [16], Souto [17] e Nagano [18] as características químicas e físicas foram retiradas das pesquisas dos autores supracitados. Assim sendo, estas informações podem ser visualizadas na tabela 5.

A água utilizada nos experimentos é proveniente da rede de abastecimento da cidade de Maringá -PR, que de acordo com os requi-

sitos da NBR 15900-1:2009 [19] intitulada Água para amassamento do concreto-requisitos.

2.2 Estudo da composição do agregado miúdo

A fim de determinar uma composição ótima entre o agregados miúdo e a CBCA foi realizado um estudo para otimizar a compatibilidade entre eles. Para realização do estudo utilizou-se a norma NBR NM 45:2006 [13] para determinação da massa unitária no estado compactado, em que, o ensaio era executado para cada uma das composições analisadas e a massa unitária no estado compactado seco era determinada, desta maneira, a maior massa unitária representaria a melhor composição entre os agregados.

O ensaio foi realizado variando o percentual da composição da areia e CBCA de 10 em 10% até atingir uma composição com

Tabela 5

Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada oriunda da Usina de Iguatemi [16, 17, 18]

Características	Unidade	Valores
*Grau de uniformidade (U)	-	1,62
*D ₁₀	mm	0,13
*D ₃₀	mm	0,18
*D ₈₀	mm	0,21
*Uniformidade	-	U<5 (Muito uniforme)
*Coeficiente de curvatura (CC)	-	1,19
*Distribuição granulométrica	-	Bem graduado
*Classificação granulométrica	-	Semelhança a areia
* Massa específica	g/cm ³	2,64
* Teor de umidade	%	0,27
** Área específica	m ² /kg	5356
** Composição mineralógica - Difração X	Quartzo (SiO ₂)	Altamente cristalino ausência de fase amorfa
** Matéria orgânica total	%	3,55
** Carbono orgânico	%	1,97
** Atividade pozolânica	Mg CaO/g	23
** SiO ₂	-	Alto teor de sílica sob a forma de quartzo atribuído a baixa atividade pozolânica
*** C		486
*** MO		8,85
*** CaO		1,02
*** MgO		0,15
*** K ₂ O		0,37
*** P ₂ O ₅	mg/kg	0,01
*** Fe		1.375,65
*** Cu		29,73
*** Mn		70,96
*** Zn		16,82

quantidades iguais dos dois materiais (50% areia e 50% de CBCA). A composição com maior massa unitária no estado compactado foi a utilizada nas dosagens de argamassa.

2.3 Determinação da proporção ótima de agregado miúdo

Para definir a proporção ótima de agregado miúdo foram desenvolvidas três séries de traços com relação cimento/agregado miúdo em massa de 1:1, 1:2 e 1:3 respectivamente. Após a confecção das argamassas foram realizados os ensaios de espalhamento e funil-V para argamassas e obtidos os parâmetros de autoadensabilidade (G_m e R_m) a fim de determinar a melhor relação de agregado miúdo (areia + CBCA) por cimento (ar/c) para a produção de argamassas com os materiais utilizados.

2.4 Dosagem da argamassa autoadensável

Para desenvolvimento e avaliação da argamassa foi utilizada a metodologia proposta por Okamura e Ouchi [2], em que foram analisadas as propriedades da argamassa no estado fresco (fluidez e viscosidade). As argamassas dosadas já com a proporção ótima de agregado miúdo foram produzidas em seis proporções de filler calcário em relação a massa de cimento (f/c de 0; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50), e, para cada uma das seis proporções foram variadas seis dosagens de aditivo superplastificante (sp/c em % de 0; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; 1,00).

Após confecção da argamassa foram realizados os ensaios de espalhamento e funil-V para argamassas com o intuito de obter os índices G_m e R_m , conforme a equação 1 e 2.

$$G_m = \frac{(d_1 \times d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (1)$$

Em que: G_m : Índice de espalhamento relativo para argamassas. d_1 : primeiro diâmetro do espalhamento obtido com o mini cone para argamassas. d_2 : segundo diâmetro do espalhamento obtido com o mini cone para argamassas. d_0 : diâmetro da base do mini cone para argamassas.

$$R_m = \frac{10}{\text{Tempo de escoamento (seg)}} \quad (2)$$

Em que: R_m é o escoamento relativo para argamassas.

Determinados os valores de G_m e R_m do ensaio da argamassa e realizados os ensaios, foram avaliadas as propriedades de fluidez e viscosidade da argamassa para determinação das argamassas autoadensáveis.

Alto valor de G_m indica maior deformabilidade da argamassa, e menor valor de R_m indica maior viscosidade. Domone e Jin [20] sugerem um valor de $G_m \geq 8$, correspondente a diâmetros de espalhamento ≥ 300 mm; e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de escoamento de 2 s a 10 s. Takada e tangtensirikul [21] defendem que argamassas com $G_m = 5$ e $R_m = 1$ são consideradas bem aceitáveis para obter concretos com propriedades autoadensáveis. Por outro lado, Edmatsu *et al.* [22] consideram que valores de G_m entre 3 e 7, correspondentes a diâmetros de espalhamento de argamassa entre 200 mm a 283 mm, e de R_m entre 1 e 2, correspondendo a tempos de escoamento de 5 a 10 segundos, são

considerados satisfatórios para as argamassas serem utilizadas na produção de CAA. Para Nepomuceno e Oliveira [23], o G_m deve variar de 5,30 à 5,90 e o R_m deve ficar entre 1,14 e 1,30 o que representa um tempo de escoamento entre 7,70 e 8,80 segundos e um espalhamento entre 251 mm e 262 mm.

2.5 Avaliação da argamassa no estado endurecido

Foram realizados ensaios de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias e de resistência à tração na flexão aos 28 dias. Para os traços de argamassa considerados autoadensáveis foram confeccionados 3 corpos de prova para cada idade, considerando a necessidade mínima segundo a norma e as limitações de matéria-prima (CBCA) do mesmo lote para realização de todas as dosagens. Para a execução do ensaio de resistência à tração na flexão foram utilizados moldes prismáticos de dimensão 40 mm X 40 mm X 160 mm. A determinação da resistência à compressão axial foi realizada utilizando corpos de prova cilíndricos moldados com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até a idade do ensaio, no qual foram preparadas as bases dos corpos de prova.

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados a partir do procedimento especificado pela NBR 13279 [24]. Para a determinação da resistência à compressão axial foi utilizada a NBR 5739 [25].

3. Resultados e discussões

3.1 Propriedades no estado fresco

As composições utilizadas para a determinação da compacidade entre areia e CBCA e os resultados das massas unitárias obtidas apresentam-se na figura 2. A maior massa unitária observada entre todas as composições foi de 1,69, entretanto, o mesmo valor é observado em duas proporções, com 70% de areia média e 30% de CBCA e com 60% de areia média e 40% de CBCA. Desta forma, optou-se pela proporção que utilizasse maior quantidade de CBCA aumentando o aproveitamento deste resíduo, de modo que todos os traços de argamassa foram gerados por uma proporção

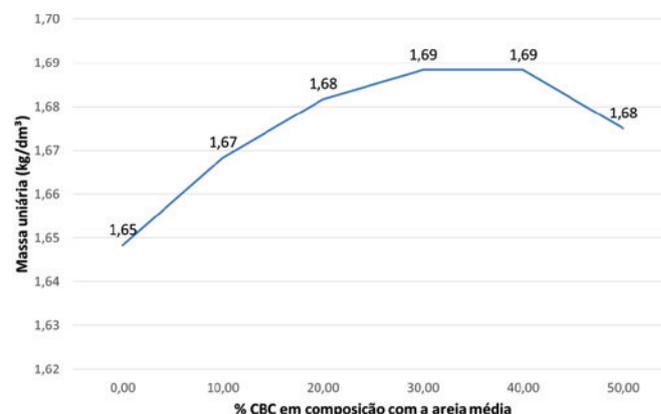


Figura 2

Composição entre areia e CBCA e massa unitária no estado compactado

Tabela 6

Resultados para o ensaio no estado fresco na definição do teor ótimo de agregado miúdo

SP/cimento (%)	Espalhamento D1 (mm)	Espalhamento D2 (mm)	Tempo de escoamento (s)	G _m	R _m
Areia: Cimento (ar/c) de 1:1					
0,00	165	160	3,00	1,64	3,34
0,20	280	284	1,66	6,95	6,02
0,40	370	365	1,84	12,50	5,43
A partir de 0,60	Segregação	Segregação	Segregação	Segregação	Segregação
SP/cimento (%)	Espalhamento D1 (mm)	Espalhamento D2 (mm)	Tempo de escoamento (s)	G _m	R _m
Areia: Cimento de 2:1					
0,00	100	100	-	-	-
0,20	140	149	5,00	1,09	2,00
0,40	255	258	3,25	5,58	3,08
0,60	360	375	2,32	12,50	4,31
0,80	330	345	1,64	10,38	6,10
1,00	-	-	-	-	-
SP/cimento (%)	Espalhamento D1 (mm)	Espalhamento D2 (mm)	Tempo de escoamento (s)	G _m	R _m
Areia: Cimento de 3:1					
0,00	-	-	-	-	-
0,20	100	100	-	-	-
0,40	100	100	-	-	-
0,60	100	100	-	-	-
0,80	100	100	-	-	-
1,00	100	100	-	-	-

de agregado miúdo composta por 60% de areia e 40% de CBCA. Para definir o teor ótimo de agregado utilizado nos ensaios foram analisadas três dosagens de agregado miúdo em relação a massa de cimento (1:1; 2:1; e, 3:1). A tabela 6 demonstra os resultados das propriedades autoadensáveis para as três proporções.

Como pode ser observado na tabela 6, os ensaios realizados com relação ar/c de 3:1 não apresentaram nenhum sinal de fluidez, desta maneira os valores de tempo de escoamento foram nulos já que o material permaneceu coeso no funil-V, o mesmo ocorreu com o R_m. As argamassas produzidas com proporção de

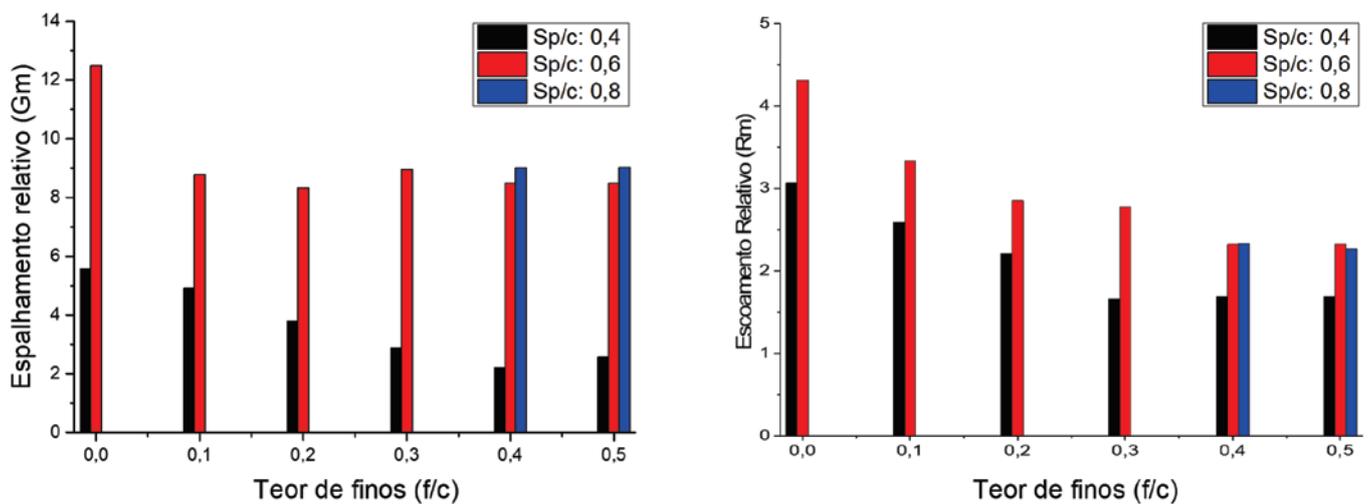


Figura 3

Índice de espalhamento relativo (G_m) e Índice de escoamento relativo (R_m) para as argamassas autoadensáveis

agregado miúdo de 2:1 apresentaram fluidez adequada, porém, ao observar o índice de escoamento relativo nota-se um alto valor de R_m resultante da baixa viscosidade. O melhor comportamento das argamassas foi obtido com relação ar/c de 2:1, desta maneira, as argamassas produzidas na sequência do estudo possuem essa dosagem.

Após a definição da proporção de agregado a ser utilizado nas dosagens de argamassa foram realizados os ensaios com as argamassas variando o teor de finos, a fim de identificar o comportamento do material e obter a melhor relação entre altíssima fluidez e moderada viscosidade necessárias para a argamassa ser considerada autoadensável.

Para se obter maior viscosidade da argamassa com CBCA foi

realizada a adição de finos em seis proporções, sendo elas: 0,00; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 de relação filler/cimento, além disso, para cada uma das dosagens de f/c foi variada a relação de sp/c em: 0,00; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; e, 1,00 %.

Para uma avaliação inicial do seu comportamento, foram realizados os ensaios por meio do cone para determinação de espalhamento de argamassas e o funil-v para determinação da viscosidade de argamassas e obtido os índices G_m e R_m . A partir da determinação do índice de espalhamento relativo (G_m) e do índice de escoamento relativo (R_m) foi possível avaliar a alta fluidez e moderada viscosidade requisitada pela argamassa para ser considerada autoadensável. Os resultados obtidos com os ensaios para todas as argamassas dosadas são apresentados na tabela 7.

Tabela 7

Resultados de espalhamento (G_m) e viscosidade (R_m) para os traços dosados

Características do ensaio: agregado miúdo/cimento = 2 água/cimento = 0,50							
Finos/cimento	SP/cimento (%)	Espalhamento D1 (mm)	Espalhamento D2 (mm)	Tempo de escoamento (s)	G_m	R_m	
0,00	0,00	100	100	-	0,00	0,00	
	0,20	140	149	5,00	1,08	2,00	
	0,40	255	258	3,25	5,57	3,07	
	0,60	360	375	2,32	12,50	4,31	
	0,80	330	345	1,65	10,38	6,09	
	1,00	-	-	-	-	-	
0,1	0,00	102	102	-	0,04	-	
	0,20	110	108	13,00	0,18	0,76	
	0,40	243	244	3,85	4,93	2,59	
	0,60	314	312	3,00	8,79	3,33	
	0,80	333	360	2,80	10,98	3,57	
	1,00	346	340	3,20	10,76	3,12	
0,2	0,00	100	100	-	-	-	
	0,20	110	110	17,00	0,21	0,58	
	0,40	224	214	4,53	3,79	2,21	
	0,60	302	309	3,50	8,33	2,85	
	0,80	318	310	3,40	8,85	2,94	
	1,00	-	-	-	-	-	
0,3	0,00	100	100	-	-	-	
	0,20	106	100	35,00	0,06	0,28	
	0,40	198	196	6,00	2,88	1,66	
	0,60	317	314	3,60	8,95	2,77	
	0,80	315	313	3,20	8,86	3,12	
	1,00	-	-	-	-	-	
0,4	0,00	100	100	-	-	-	
	0,20	103	104	-	0,07	-	
	0,40	177	181	5,90	2,20	1,69	
	0,60	310	306	4,30	8,48	2,32	
	0,80	317	316	4,30	9,01	2,32	
	1,00	348	337	4,20	10,72	2,38	
0,5	0,00	100	100	-	-	-	
	0,20	103	104	-	0,07	-	
	0,40	197	181	5,90	2,56	1,69	
	0,60	310	306	4,30	8,48	2,32	
	0,80	317	316	4,40	9,01	2,27	
	1,00	348	337	4,40	10,72	2,27	



Figura 4
Espalhamento da argamassa com 0,30 de f/c e 0,40% de sp/c

Para as proporções de finos de 0, 0,10, 0,20, e 0,30 as argamassas com 0,40 e 0,60% de relação sp/c apresentaram elevada fluidez e moderada viscosidade, porém, as argamassas produzidas com mais que 0,80% de sp/c apresentaram sinais de segregação. Com a inserção de um maior teor de finos (0,40 e 0,50 de f/c) foi possível produzir argamassas autoadensáveis com até 0,80% de sp/c. Todas as argamassas produzidas com 1,00% de teor de aditivo superplastificante, em relação a massa de cimento (sp/c), apresentaram sinais de segregação, com concentração de material no centro do espalhamento e exsudação da mistura nas bordas.

Os índices de espalhamento relativo (G_m) e escoamento relativo (R_m) das argamassas autoadensáveis apresentam-se na figura 3. Os espalhamentos (G_m) obtidos nas argamassas consideradas autoadensáveis demonstram que quanto maior a utilização de aditivo superplastificante maior será o espalhamento relativo. O

impacto das alterações das proporções de finos é mais evidente ao se utilizar 0,40% de relação sp/c, para os outros teores de aditivo superplastificante a alteração dos espalhamentos é menor.

A viscosidade relativa (R_m) obtida por meio do ensaio do funil-v para argamassas tem por objetivo demonstrar principalmente a viscosidade do material analisado, desta maneira, quanto menor o valor de R_m mais viscosa é a argamassa. As argamassas com 0,40% de relação sp/c apresentaram a maior viscosidade, já as argamassas com 0,60 e 0,80% de relação sp/c não apresentaram grandes alterações. Para todas as argamassas analisadas o aumento do teor de finos originava argamassas mais viscosas, este fenômeno ocorre, pois, o fíler calcário calcítico compõe a argamassa preenchendo os espaços vazios e conseqüentemente aumentando a coesão devido à grande área superficial do material. Porém, o ponto máximo de efeito do incremento de material fino ocorre nas relações de 0,40 e 0,50 de f/c, onde a variação de viscosidade é quase nula.

Por fim, a argamassa com melhor relação entre fluidez e viscosidade e mais apta a produzir traços de concreto autoadensável, com as características necessárias, foi a com 0,40% de relação sp/c e teor de finos de 30%, em relação a massa de cimento. Este traço apresentou espalhamento médio de 197,00 milímetros e tempo de escoamento de 6 segundos, os valores para espalhamento e escoamento relativo foram respectivamente de 2,88 e 1,66. A figura 4 demonstra o espalhamento obtido por esta argamassa. Esta argamassa apresentou a fluidez necessária para ser considerada autoadensável e apresentou altíssima viscosidade, sendo esta última uma propriedade vital ao inserir agregado graúdo na argamassa para a produção de concreto autoadensável.

3.2 Propriedades no estado endurecido

Os resultados obtidos com os ensaios de resistência à tração a partir dos valores médios e desvios padrões podem ser visualizados na figura 5.

As argamassas autoadensáveis apresentaram leve ganho de resistência à tração por meio do incremento do fíler calcário calcítico. As argamassas com maiores teores de finos apresentaram

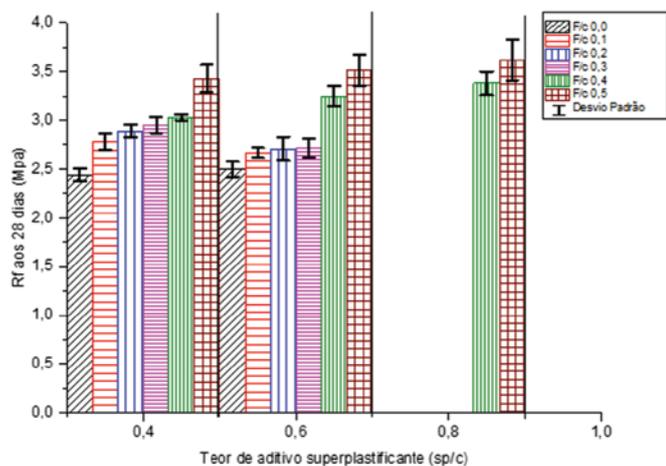


Figura 5
Resistência à tração aos 28 dias para as argamassas autoadensáveis

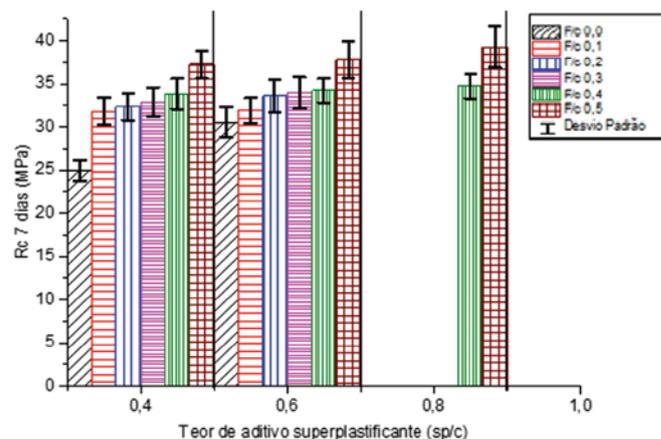


Figura 6
Resistência à compressão aos 7 dias para as argamassas autoadensáveis

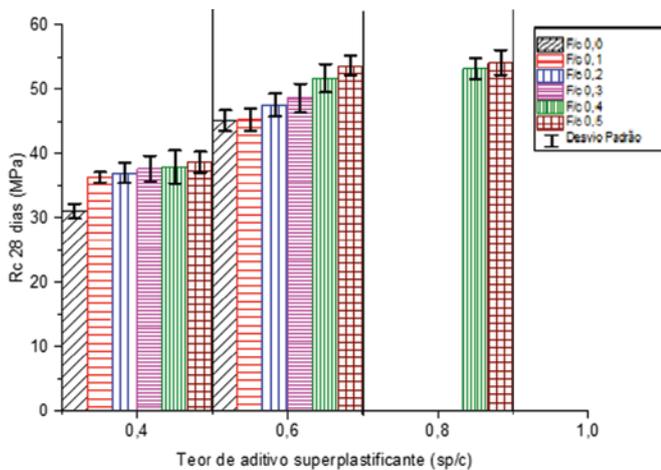


Figura 7
Resistência à compressão aos 28 dias para as argamassas autoadensáveis

maior resistência à tração, isto ocorre porque o filer calcário calcítico preencheu espaços vazios da argamassa.

Os resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão aos 7 dias, com seus valores médios e desvios padrões, podem ser visualizados na figura 6. As argamassas apresentaram aumento na resistência à compressão conforme aumentavam-se os índices de sp/c avaliados, este resultado já era esperado pois foram mantidos as relações a/c utilizadas. Por outro lado, o aumento no teor de finos resultou em um acréscimo da resistência à compressão das argamassas mesmo que pequeno, as argamassas com f/c de 0,50 apresentaram os melhores resultados para os rompimentos realizados aos 7 dias.

Os resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias com seus valores médios e desvios padrões podem ser visualizados na figura 7. Aos 28 dias, é possível notar um incremento geral da resistência à compressão nas argamassas por meio do aumento do teor de aditivo superplastificante comparando os traços com 0,40 e 0,60% de relação sp/c, este efeito justifica-se a partir da manutenção da relação a/c dos materiais e aumento da utilização de aditivo, fatores estes que, quando combinados, levam a um aumento de hidratação do cimento. Também é possível verificar que o incremento de filer calcário calcítico produz um aumento da resistência à compressão das argamassas devido a maior coesão e compacidade dos materiais.

Macedo [26] realizou adição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas e obteve resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias de 44,70 MPa com teor de adição de cinza de 3%, já com 5% de adição de cinza a resistência foi de 48,30 MPa, com 8% de adição a resistência foi de 46,80% e de 51,00 MPa com 10% de adição. No presente estudo, o resultado de resistência à compressão obtido da argamassa considerada autoadensável com 0,30 de relação f/c e 0,40% de sp/c foi de 35,40 MPa, resultado semelhante aos obtidos por Nagano [18] no qual concretos autoadensáveis produzidos com substituição de 10% da areia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresentaram resistência à compressão aos 28 dias de 30,85 MPa.

Mollin Filho [27] produziu concretos autoadensáveis com substituição de 10% da areia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar e obteve resultado de resistência à tração de 2,56 MPa. Para a argamassa considerada autoadensável, no presente estudo, a resistência à tração foi de 2,80 MPa próxima ao obtido por Mollin Filho [27], considerando uma maior utilização de CBCA.

4. Conclusões

No estado fresco, a partir da variação do teor de finos, foi possível identificar uma relação entre incremento de filer calcário calcítico e viscosidade, ao mesmo tempo que o aumento na dosagem desse material proporcionava uma redução da fluidez. Desta maneira, conclui-se que o filer calcário calcítico pode ser utilizado a fim de aumentar a viscosidade e obter argamassas autoadensáveis. Por outro lado, observou-se uma estagnação deste comportamento (fluidez e viscosidade) nas argamassas com 0,40 e 0,50 de relação f/c.

As variações analisadas de aditivo superplastificante comprovaram o comportamento esperado, conforme se aumenta a dosagem de aditivo superplastificante obtém-se uma maior fluidez e menor viscosidade nas argamassas. Outro comportamento verificado, conjuntamente com a utilização de finos, é que ao se utilizar altíssimos teores de finos para a obtenção de alta viscosidade é necessário um aumento proporcional na relação de aditivo superplastificante utilizado.

No estado endurecido, as variações analisadas apresentaram pouca alteração nos resultados. A resistência à tração e à compressão aumenta sutilmente à medida em que se aumenta a utilização de finos e de aditivo superplastificante. O aumento da utilização de finos proporciona um aumento da resistência devido ao efeito filer do material. Já o aumento da resistência, obtido pelo aumento da relação sp/c, é proporcionado pelo fato de se utilizar a mesma relação de água em diferentes taxas de aditivo superplastificante.

Outro ponto importante a ser destacado é a definição de faixas ótimas para a obtenção de argamassas autoadensáveis com os materiais dosados. As argamassas que obtiveram melhores aspectos de fluidez e viscosidade foram as produzidas com relação f/c de 0,30, já a taxa ótima de dosagem de aditivo superplastificante é de 0,40 a 0,60%, em relação à massa de cimento.

Desta maneira, constata-se que é possível produzir argamassas com propriedades autoadensáveis com alta taxa de utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e obter incremento de viscosidade por meio de aumento na dosagem de finos. Com os resultados obtidos é possível definir traços de argamassas que servirão de base para produção de concretos com propriedades autoadensáveis, a partir da definição da viscosidade e fluidez a serem obtidos, podendo ser definido o teor de finos mais adequado para a produção do CAA.

Assim sendo, se torna viável produzir concretos com a substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), levando em consideração as condições as quais os experimentos deste estudo foram submetidos. De modo que, a partir dos resultados obtidos por meio deste estudo, foi possível substituir 40% do agregado miúdo por CBCA obtendo maior massa unitária da composição feita entre areia e CBCA.

5. Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PEU) e ao Departamento de Engenharia Civil (DEC-UEM), pelas contribuições e auxílio durante a pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais de Construção pela disposição de recursos utilizados durante a pesquisa.

À Usina Santa Terezinha pela doação da CBCA.

À BASF do Brasil, que por meio do engenheiro Vitor M. Marconi concedeu o patrocínio do aditivo superplastificante Glenium 51.

6. Referências bibliográficas

- [1] ALCOFORADO, L. F. M. Viabilidade econômica do concreto auto-adensável na construção de prédios em Goiânia – GO. *Journal on-line Especialize, Goiânia*, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2013.
- [2] OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology, Tokyo*, vol. 1, n. 1, p. 5-15, abr. 2003.
- [3] ALCANTARA, M. A. M.; SANTOS, B. V. Concreto auto-adensável com cinzas de bagaço de cana como finos: Reologia do concreto fresco e comportamento no estado endurecido. *Electronic Journal of Civil Engineering*, V. 5, N. 1, p. 17-35, 2012.
- [4] OLIVEIRA, F. L.; MELLO, E. F. A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. *Brazilian Journal of Geosciences, Rio de Janeiro*, V. 37, 2º ed., p 374-389, 2007.
- [5] CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2016 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: CONAB 2016.
- [6] 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.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5733. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991
- [8] OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology, Tokyo*, vol. 1, n. 1, p. 5-15, abr. 2003.
- [9] VOTORANTIM. Catálogo de cimentos 2016. Available in: <<http://www.mapadaobra.com.br/produtos/cimento/linha>>. Access in: November 13, 2015.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 30. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.
- [14] BASF. Ficha técnica de produto: GLENIUM 51 - Aditivo Superplastificante de terceira geração. Available in: <<https://www.ntcbrasil.com.br/wp-content/uploads/2014/12/glenium-51-especificacoes-completas.pdf>>. Access in: July 12, 2015.
- [15] CAZANGA. Calcário Agrícola: características do produto. Available in: <<http://www.cazanga.com.br/index.asp?c=paginas&modulo=conteudo&url=80>>. Access in: August 26, 2015.
- [16] NUNES, I. H. S. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. Masters dissertation. State University of Maringá, UEM, Technology Center, Maringá, 2009.
- [17] SOUTO, J. M. F. Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos. 2009, 118f. Master dissertation. State University of Maringá, UEM, Technology Center, Maringá, 2010.
- [18] NAGANO, M. F. Dosagem do concreto autoadensável utilizando a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 2014, 142f. Master dissertation. State University of Maringá, UEM, Technology Center, Maringá, 2014.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15900-1. Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.
- [20] DOMONE, P. L.; JIN, J. Properties of mortar for self-compacting concrete. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, p. 109-120, 1999.
- [21] TAKADA, K; TANGTEMSIRIKUL, S. Testing of fresh concrete. In: SELF-COMPACTING CONCRETE: STATE-OF-THE-ART REPORT OF RILEM TECHNICAL COMMITTEE 174-SCC. Cachan: RILEM Publications, S.A.R.L., 2000, p. 20-34.
- [22] EDMATSU, H; NISHIDA, N; OUCHI, M. A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. In: FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1999, p. 309-320.
- [23] NEPOMUCENO, M; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. 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*. v. 26, n.1, p. 317-326, 2012.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [26] MACEDO, P. C. Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 2009. 116 f. Master dissertation. Paulista State University, Ilha Solteira Engineering College, 2009.