

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

Valência, 5 e 6 de Março de 2018

Concreto autoadensável: estudos de dosagem e validação de campo

Sidiclei Formagini ⁽¹⁾, Lorraine B. M. Barreto ⁽²⁾, Paulo S. Schanoski ⁽²⁾ e Gilson S. Riva ⁽²⁾

⁽¹⁾ FAENG, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

⁽²⁾ MECFOR Engenharia, Brasil.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5277>

RESUMO

Concretos autoadensáveis (CAA) apresentam características de alta fluidez em seu estado fresco, fluindo com relativa facilidade mesmo em elementos esbeltos ou com alta densidade de armadura, dispensando a necessidade de adensamento mecânico. No estado endurecido apresenta propriedades superiores ao concreto tradicional, como a resistência à compressão, maior integridade dos elementos e maior durabilidade e vida útil. Este trabalho apresenta estudo de dosagem experimental de misturas de CAA e suas caracterizações nos estados fresco e endurecido, bem como a validação em campo por meio de sua aplicação em paredes esbeltas de concreto. Os CAA foram produzidos com cimento CP V ARI RS, areia fina natural, agregado basáltico britado com diâmetro máximo de 9,5mm e aditivos químicos. Os CAA produzidos experimentalmente, enquadraram-se como autoadensáveis nos testes de espalhamento pelo cone de Abrams, tempo de viscosidade plástica aparente, habilidade passante pela caixa L com utilização de três barras, viscosidade plástica aparente pelo funil V.

PALAVRAS-CHAVE: cada artigo deve conter entre três a cinco palavras-chave.

1. INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável, CAA, é definido como “concreto que é capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos) enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento” [1]. O uso de concreto com estas características torna-se necessário, principalmente, para a execução de algumas estruturas em concreto, cujas condições de aplicação são difíceis para um concreto convencional, como espessura reduzida dos elementos estruturais, elementos onde não é possível adensar por meio mecânico, ou quando existe alta densidade de armadura dificultando o fluxo do concreto. A Figura 1 ilustra um comparativo de preenchimento uma parede estrutural executada, primeiro com concreto convencional, e depois com CAA, onde observa-se que o uso de concreto convencional não preencheu por completo a forma, sendo necessária uma

posterior correção da falha da estrutura, situação oposta à do uso do CAA onde toda a estrutura foi devidamente preenchida.



(a) deficiência e reparo na parede concretada com concreto convencional.



(b) aspecto da parede com concreto autoadensável.

Figura 1. Parede concretada com concreto convencional e CAA.

Nem sempre é uma tarefa fácil dosar, produzir e determinar as propriedades dos CAA com materiais disponíveis em determinadas regiões do Brasil (devido a gama de materiais com propriedades distintas), bem como validar sua produção para condições restritas de aplicação no campo (tempo de transporte, temperatura e umidade do ar, etc.). Condições no laboratório diferem das de campo, pois no laboratório o processo de mistura, caracterização no estado fresco, moldagem dos corpos de prova, ocorrem em temperatura controlada e leva menos tempo que na situação de sua produção em central dosadora, onde além de sua caracterização, há a necessidade de transportar até o local de aplicação sob as mais diversas situações de temperatura, umidade e demais situações ambientais. A perda de água de amassamento entre a central dosadora e o canteiro de obras, bem como a mistura do aditivo químico no canteiro da obra, requerem maiores cuidados e uma mão de obra especializada, pois qualquer diferença do especificado, podem alterar significativamente as propriedades do concreto fresco (segregação, exsudação ou falta de fluidez) e no estado endurecido (resistência e módulo de elasticidade).

Neste trabalho são elaborados, produzidos e caracterizados três CAA com misturas binárias de materiais cimentícios (cimento Portland CP V e sílica ativa), visando o enquadramento conforme requisitos normativos [1], com resistência estimada à compressão $f_{ck} = 40$ MPa para serem aplicados em uma edificação cujo concreto convencional não seria adequado.

Os objetivos específicos são de dosar, produzir concretos e determinar as propriedades: classe de espalhamento pelo cone de Abrams; habilidade passante pela caixa L; viscosidade plástica aparente pelo funil V; resistência à compressão em idades até 91 dias; módulo estático de elasticidade à compressão; resistência à tração por compressão diametral; índices físicos. Também, a verificação da manutenção das propriedades do CAA e do processo quando produzidos em central dosadora, transportados e aplicados na concretagem de paredes esbeltas em canteiro de obra.

2.- DOSAGEM, PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Neste trabalho são dosadas, produzidas e caracterizadas três misturas de CAA: CAA9,5 (agregados com diâmetro máximo característico de 9,5mm); CAA6,3A e CAA6,3B (agregados com diâmetro máximo característico de 6,3mm).

2.1.- Materiais

2.1.1.- Identificação

Os materiais cimentícios utilizados para a produção do CAA foram o cimento Portland CP-V ARI RS e sílica ativa (SA). Os agregados utilizados foram a areia fina natural quartzosa de rio (AR), britados de origem basáltica com diâmetro máximo característico de 6,3mm (AG6,3) e 9,5mm (AG9,5). Aditivo químico Glenium 51 (SP), MasterPolyheed® 45 e água potável da rede de abastecimento.

2.1.2.- Caracterização

Os materiais foram caracterizados experimentalmente em laboratório e as propriedades necessárias para a formulação das misturas dos CAA, são apresentados no Quadro 1 (materiais cimentícios) e no Quadro 2 (agregados). As distribuições granulométricas dos materiais cimentícios e dos agregados são ilustradas na 'Fig. 1'. A dimensão máxima dos agregados foi limitada a 9,5mm (para não haver descontinuidade no esqueleto granular), uma vez que a areia utilizada era fina (módulo de finura de 1,39), bem como diminuir o risco de segregação durante a aplicação do CAA.

Quadro 1. Principais propriedades dos materiais cimentícios.

<i>Propriedade</i>	<i>Metodologia de ensaio</i>	<i>Cimento</i>	<i>Sílica ativa</i>
Massa específica (g/cm ³)	[2]	3,06	2,21
Área Específica (cm ² /g)	[3]	4597	-
Resistência à compressão f_{c28} (MPa)	[4]	54,0	-
Compacidade experimental (k= 6,7)	[5]	0,61	0,43

Quadro 2. Principais propriedades dos agregados.

<i>Propriedade</i>	<i>Metodologia de ensaio</i>	<i>Material</i>		
		<i>AR</i>	<i>AG6,3</i>	<i>AG9,5</i>
Massa unitária, método C (g/cm ³)	[6]	1,48		1,54
Massa específica (g/cm ³)		2,63	2,95	3,01
Massa específica do agregado S.S.S. (g/cm ³)	[7] e [8]	2,60	2,82	2,89
Massa específica aparente do agregado (g/cm ³)		2,58	2,75	2,83
Absorção de água (%)	[8]		2,5	2,1
Torrões de argila e materiais friáveis (%)	[9]	0,74		
Impureza orgânica (ppm)	[10]	100		
Compacidade experimental (k=9,0)	[5]	0,64	0,58	0,55
Diâmetro máx. característico (mm)	[11]	0,60	6,30	9,50

Nota: S.S.S. – Condição saturada superfície seca.

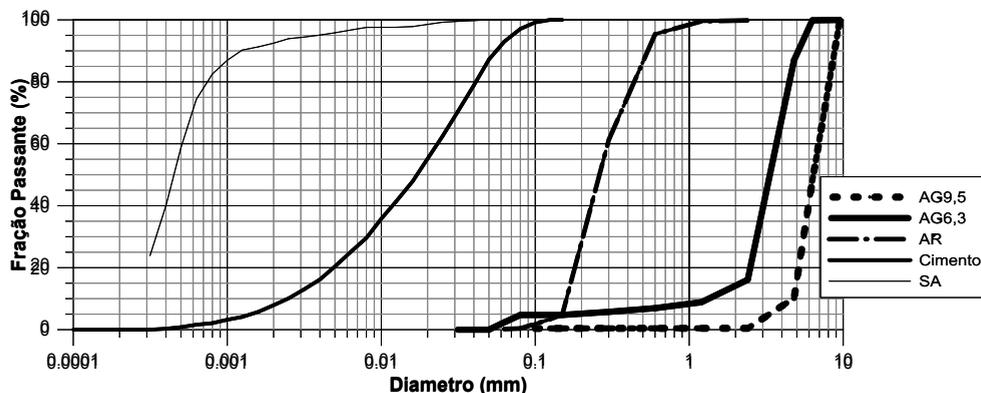


Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais granulares [11].

2.2.- Dosagem dos CAA

As dosagens teóricas foram realizadas pelo aplicativo computacional MECFOR [12], com base na fundamentação teórica no Modelo de Empacotamento Compressível [5]. Realizou-se a simulação de diferentes composições granulares para seleção adequada dos materiais, de forma a produzir o máximo empacotamento da mistura, que atendesse as propriedades desejadas tanto no estado fresco, quanto após o endurecimento. Durante o estudo foram elaboradas e validadas três misturas de CAA. As misturas CAA9,5 e CAA6,3A foram dosados levando em conta um consumo fixo da mistura binária de materiais cimentícios (cimento Portland e sílica ativa), enquanto que, para a mistura CAA6,3B, foi reduzido o teor de sílica ativa, cuja redução foi compensada com acréscimo no teor de areia. Os traços estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Traços dos CAA produzidos para 1m³ de concreto.

Material	Consumo por m ³ de concreto			
	Unidade	CAA9,5	CAA6,3A	CAA6,3B
Cimento	Kg/m ³	350	352	352
Sílica ativa	Kg/m ³	31	30	15
Areia natural	Kg/m ³	701	708	726
Agregado AG6,3	Kg/m ³	329	1131	1131
Agregado AG9,5	Kg/m ³	861	---	---
MasterPolyheed® 45	Litros/m ³	1,1	1,1	1,1
Glenium 51	Litros/m ³	2,1	2,4	2,4
Água	Litros/m ³	192	198	198
Teor de Argamassa	[%]	60,2	93,4	93,4
Consumo: (cimento + SA) / MPa	Kg/MPa	7,2	8,0	8,0
Relação água / materiais cimentícios		0,55	0,56	0,54
Compacidade da mistura (k=6,7)		0,788	0,776	0,774

A distribuição granulométrica da mistura granular dos traços é indicada na 'Fig. 2'. A granulometria referente à mistura CAA9,5 difere das misturas CAA6,3A e CAA6,3B, que se apresentam sobrepostas devida variação somente no teor de SA. Isto ocorre devido à dimensão máxima característica dos agregados serem distintas, proporcionando melhor empacotamento com agregado AG9,5. Percebe-se, ainda, uma descontinuidade da mistura granular entre os diâmetros de 0,6 mm e 2,4 mm devido às limitações de tamanho dos agregados disponíveis.

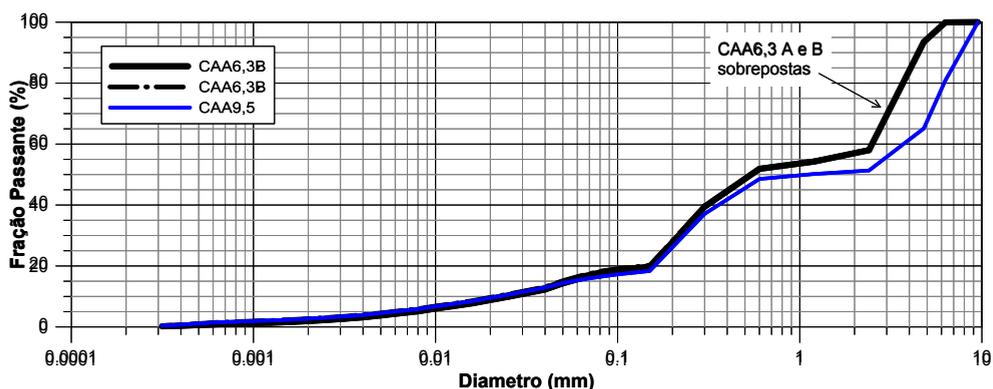


Figura 2. Distribuição granulométrica da mistura granular dos traços.

2.3.- Produção e enquadramento

As misturas foram produzidas em betoneira de eixo inclinado, com volume aproximado de 60 litros cada, quantidade suficiente para os ensaios especificados. As características e propriedades autoadensáveis foram avaliadas e enquadradas conforme [1]. O concreto CAA6,3B (escolhido por razões econômicas), sendo denominado CAA6,3BC, foi produzido em central dosadora na escala de 10 betonadas (volume de 70m³), avaliado e aplicado na construção de paredes estruturais de uma edificação em campo. Foram monitorados e avaliados a manutenção do abatimento, a capacidade de preenchimento das formas e a evolução da resistência à compressão até a idade de 63 dias, bem como verificado possíveis variações em relação a mistura em laboratório, em relação as propriedades no estado fresco e no endurecido.

3.- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Todos os concretos produzidos no laboratório mostraram-se no estado fresco fluidos, coesos e íntegros, não havendo segregação nem exsudação. Deste modo, a limitação dos diâmetros máximos dos agregados corroborou para o bom desempenho dos concretos, principalmente no estado fresco. A 'Figura 3' ilustra detalhes do ensaio de espalhamento e o aspecto das bordas do CAA9,5, CAA6,3A e do CAA6,3B.

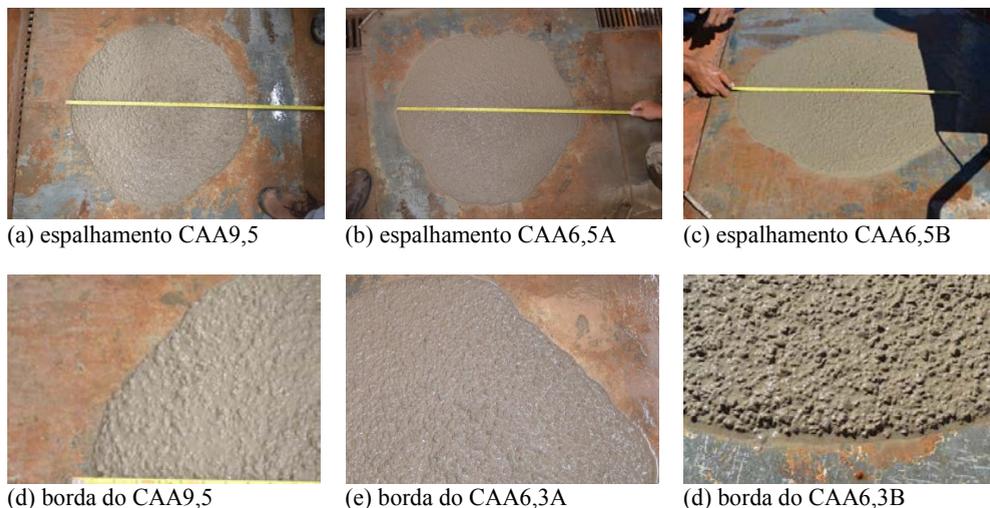


Figura 3. Aspecto dos concretos depois do ensaio de espalhamento em laboratório.

Em relação ao espalhamento pelo cone de Abrams, os concretos apresentaram valores superiores a 600 mm sem que houvesse exsudação ou segregação ('Fig. 3'), enquadrando-se como classe SF1 (CAA9,5) e SF2 (CAA6,3A e B) [1]. Quanto à viscosidade plástica aparente t_{500} , todos os CAA apresentaram tempo de escoamento inferior a 2 segundos, enquadrando-se como VS1. A habilidade passante determinada pela caixa L com 3 barras, não foi atingida pelo CAA9,5, porém os CAA6,3A e B foram enquadrados como classe PL2. Sobre a viscosidade plástica aparente determinada pelo funil V, apresentaram tempos de fluidez inferiores a 9 segundos, enquadrando-se como VF1. Os resultados dos ensaios de caracterização no estado fresco são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Propriedades do concreto no estado fresco.

<i>Ensaio e enquadramento [1]</i>	<i>CAA9,5</i>		<i>CAA6,3A</i>		<i>CAA6,3B</i>	
Espalhamento pelo cone de Abrams (mm)	620	SF1	670	SF2	660	SF1
Viscosidade plástica aparente t_{500}	< 2s	VS1	< 2s	VS1	< 2s	VS1
Habilidade passante caixa L (3 barras)	0,73	--	0,80	PL2	0,81	PL2
Viscosidade plástica aparente, Funil V	5s	VF1	4s	VF1	4s	VF1

Em relação ao CAA6,3BC, detalhes do espalhamento do concreto, de sua aplicação e acabamento são mostrados na 'Fig. 4'. O aditivo químico Glenium 51, foi adicionado no local da concretagem, com o objetivo de garantir maior tempo de manutenção da fluidez do concreto. Observa-se que o CAA manteve o espalhamento do cone de Abrams ('Fig. 4a') conforme determinado em laboratório, bem como o bom preenchimento dos espaços dentro da forma. Sua aplicação ocorreu com facilidade, tempo inferior a 15 minutos para cada betoneira, não havendo segregação ou exsudação da mistura, conforme verificado previamente em laboratório, nem a necessidade de aplicação mecânica de adensamento ('Fig. 3b'). As formas foram retiradas 3 dias após a concretagem e a parede foi monitorada

quanto ao surgimento de fissuras de retração de origem térmica ou por dessecação da superfície do concreto. Não foram observadas fissuras que poderiam estar associadas a estas causas.



Figura 4. Detalhes do concreto CAA6,3B sendo aplicado na concretagem das paredes.

Os valores médios dos ensaios de caracterização mecânica dos CAA e seus respectivos coeficientes de variação (CV) são apresentados no Quadro 5. Para a idade de 28 dias, o valor médio da resistência à compressão simples (f_{cm}) do CAA9,5 foi de 50,5 MPa, com ganho médio de 1,3 MPa em relação ao CAA6,3A, que foi de 49,9 MPa, sendo os resultados considerados estatisticamente iguais. Em relação aos CAA6,3A e CAA6,3B, os resultados também foram estatisticamente iguais, uma vez que se trata de traços parecidos. Em relação aos módulos estáticos de elasticidade à compressão (Em) [13], apresentaram valores estatisticamente iguais, na ordem de 33 GPa. Quanto aos resultados médios de resistência à tração por compressão diametral (f_{ctm}), os valores também se apresentaram estatisticamente iguais, mantendo praticamente constante a relação entre as resistências f_{ctm}/f_{cm} , que foi na ordem de 10%.

Quadro 5. Propriedades do concreto no estado endurecido.

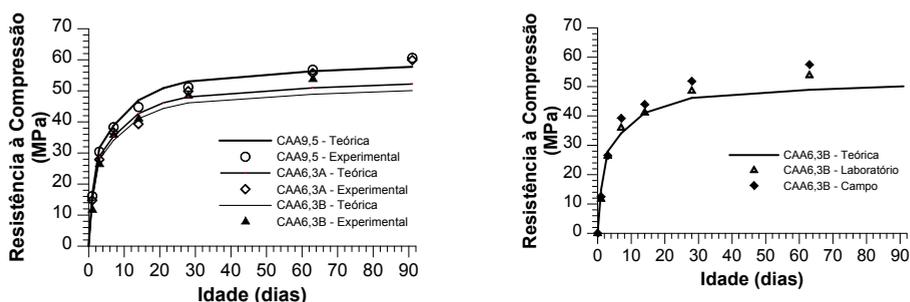
	CAA9,5		CAA6,3A		CAA6,3B	
<i>Resistência média à compressão simples [4]</i>	f_{cm} (MPa)	CV [%]	f_{cm} (MPa)	CV [%]	f_{cm} (MPa)	CV [%]
f _{cm} - 1 dia	16,1	2,2	14,8	0,9	11,7	1,2
f _{cm} - 3 dias	30,4	3,2	27,9	1,9	26,4	0,4
f _{cm} - 7 dias	38,3	7,7	36,6	0,1	35,9	3,3
f _{cm} - 14 dias	44,8	8,6	39,2	0,6	41,1	3,9
f _{cm} - 28 dias	51,2	1,1	49,9	1,2	48,5	3,8
f _{cm} - 63 dias	56,8	1,2	55,7	0,6	53,8	2,2
f _{cm} - 91 dias	60,6	2,3	59,9	3,3	57,2	3,1
<i>Módulo estático de elasticidade à compressão [13]</i>	Em (GPa)	CV [%]	Em (GPa)	CV [%]	Em (GPa)	CV [%]
Em - 28 dias	34,7	3,5	33,2	2,4	32,6	4,7
<i>Resistência à tração por compressão diametral [14]</i>	f_{ctm} (MPa)	CV (%)	f_{ctm} (MPa)	CV (%)	f_{ctm} (MPa)	CV (%)
f _{ctm} - 28 dias	4,63	3,9	4,75	4,5	4,45	4,4

Para o CAA6,3B produzido em central dosadora e aplicado na concretagem das paredes, foram determinados os espalhamentos para os 10 caminhões, bem como as resistências à compressão, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6. Espalhamento e resistência à compressão das betonadas aplicadas na obra.

Betonada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espalham. (mm)	615	530	540	690	670	715	620	695	650	505
Classe	SF1	--	--	SF2	SF2	SF2	SF1	SF2	SF2	--
f_{cm28} (MPa)	57,0	53,2	56,4	55,2	53,5	47,4	47,8	49,7	39,8	57,8

A evolução das resistências à compressão teórica e experimental dos CAA produzidos é mostrada na ‘Fig. 5a’. Percebe-se que o CAA9,5 até a idade de 28 dias, obteve maior valor médio entre as resistências, pelo fato de apresentar maior compacidade da mistura granular que os demais. Já na idade de 63 dias, não houve estatisticamente variação entre os resultados, encontrando-se dentro de um mesmo desvio padrão. A ‘Fig. 5b’ mostra um comparativo de resistência média entre o CAA6,3B produzido em laboratório e o aplicado na obra CAA6,3BC, onde pode ser observado que as resistências dos concretos dosados em central foram superiores a do concreto dosado em laboratório.



(a) curvas teóricas e experimentais de resistência à compressão.

(b) comparativo de resistência teórica versus experimental de laboratório e campo.

Figura 5. Evolução das resistências à compressão dos concretos com a idade.

O consumo necessário do composto binário (cimento Portland e SA) para produzir 1 MPa de resistência à compressão, aos 28 dias, é apresentado no Quadro 9, onde pode ser observado que este consumo (CAA produzido em laboratório) é menor para o concreto CAA9,5.

Quadro 9 – consumo real de materiais cimentícios (cimento + SA) por MPa atingido.

Propriedade	CAA9,5	CAA6,3A	CAA6,3B	CAA6,3BC
Consumo: (cimento + SA) / MPa	7,4	7,7	7,6	7,1

Os valores médios dos ensaios de índices físicos são apresentados no Quadro 10. Observa-se que os valores dos índices de vazios e de absorção de água são maiores para o CAA9,5 do que para os CAA6,3A e CAA6,3B. Quanto às massas específicas das amostras na condição seca, os valores demonstraram-se estaticamente iguais. Já em relação às massas específicas das amostras na condição saturada superfície seca e real, apresentando-se maior para o concreto CAA9,5.

Quadro 10 - Propriedades físicas do concreto no estado endurecido.

<i>Índices Físicos</i>	<i>CAA9,5</i>		<i>CAA6,3A</i>		<i>CAA6,3B</i>	
	<i>Valor</i>	<i>CV</i>	<i>Valor</i>	<i>CV</i>	<i>Valor</i>	<i>CV</i>
Índice de Vazios (%)	10,5	7,6	7,2	0,7	6,7	2,8
Absorção por imersão (%)	4,6	7,3	3,2	0,7	3,0	3,0
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	2,27	0,3	2,27	0,1	2,29	0,2
Massa esp. da amostra saturada (g/cm ³)	2,38	0,7	2,34	0,1	2,35	0,1
Massa específica real (g/cm ³)	2,54	1,2	2,44	0,2	2,45	0,1

4.- CONCLUSÕES

Os concretos em seu estado fresco enquadraram-se como:

- De acordo com teste de espalhamento pelo cone de Abrams, o CAA9,5 foi enquadrado como autoadensável classe SF1 e os CAA6,3A e CAA6,3B como classe SF2;
- Em relação ao tempo de viscosidade plástica aparente, t_{500} , todos os CAA foram enquadrados como classe VS1, com tempo de fluidez inferior a 2 segundos.
- Quanto à habilidade passante pela caixa L com utilização de três barras, o CAA9,5 não foi enquadrado como autoadensável, enquanto que os CAA6,3A e CAA6,3B foram enquadrados como autoadensáveis classe PL2.
- Na viscosidade plástica aparente pelo funil V, todos enquadraram-se como autoadensáveis classe VF1, com tempo de escoamento inferior a 9 segundos.

Em termos de resistência à compressão (28 dias), os CAA9,5 CAA6,3A e CAA6,3B obtiveram 51,2 MPa, 49,9MPa e 48,5MPa, respectivamente. Percebe-se uma leve tendência de queda na resistência entre os concretos, porém esta diferença é muito pequena indicando que os resultados são estatisticamente iguais. Já o módulo estático de elasticidade à compressão, permaneceu estatisticamente inalterado, na ordem de 33 GPa. A relação entre as resistências f_{ctm28}/f_{cm28} foi na ordem de 10%.

A produção do CAA6,3BC em central dosadora e sua aplicação em paredes de uma obra foi realizada com eficiência, sem alterações significativas em suas propriedades.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15823-1 – 'Concreto auto-adensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010'.

- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23 - 'Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001'.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 76 - 'Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998'.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739 - 'Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007'.
- [5] De Larrard, F., 'Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach'. Modern Concrete Technology Series, vol. 9, (E&FN SPON, London, 1999).
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 'NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios'. Rio de Janeiro, 2006.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52 - 'Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente'. Rio de Janeiro, 2009.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53 - 'Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água'. Rio de Janeiro, 2009.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7218. 'Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis'. Rio de Janeiro, 2010.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 49 - 'Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas'. Rio de Janeiro, 2001.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248 - 'Agregados - Determinação da composição granulométrica'. Rio de Janeiro, 2003.
- [12] FORMAGINI, S., 'Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho'. Tese de doutorado (COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005).
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522 - 'Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão'. Rio de Janeiro, 2008.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222 - 'Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos'. Rio de Janeiro, 2010.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.