

Estudo de viabilidade e durabilidade de concreto auto-adensável em canteiro de obra. Caso da Arena Pernambuco

Carlos Calado¹

Aires Camões²

Tibério
Andrade³

Béda
Barkokébas⁴

Bianca
Vasconcelos⁵

RESUMO

A pesquisa estudou a aplicação, resistência e durabilidade de concreto auto-adensável (CAA) numa grande obra, comparando-se seu desempenho com concreto convencional vibrado (CC) de características similares, aferindo-se sua viabilidade de custo.

Os estudos foram na obra da Arena Pernambuco e incidiram nas betonagens efetuadas durante os meses de maio, junho e julho de 2012, para coleta de dados, acompanhamento dos ensaios rotineiros de controle do concreto e realização de ensaios de resistência e durabilidade específicos da pesquisa.

A resistência à compressão do CAA foi em média 4,5% superior, e suas formas reforçadas para suportar maior pressão lateral do concreto. Os resultados de durabilidade foram favoráveis ao CAA, tendo custo dos materiais cerca de 13,5% superior ao CC.

Palavras-chave: concreto auto-adensável (CAA), durabilidade e aplicabilidade em canteiro de obra.

1. INTRODUÇÃO

Enquanto o concreto convencional (CC) começou a ser regularmente aplicado a partir do início do século XX, o concreto auto-adensável (CAA) foi desenvolvido e começou a ser aplicado aproximadamente noventa anos depois. Há então necessidade de se ter melhor conhecimento e validação do novo material, nos diversos aspectos, a fim de que os projetistas e construtores especifiquem e apliquem CAA como alternativa de uso ao CC. Rich *et al* [1] estudou a aceitação do CAA entre os empresários da construção civil do Reino Unido e concluiu que as pesquisas, à época, desenvolviam estudos específicos do material em questão, sem no entanto buscar identificar oferta de outros valores aos construtores, a exemplo de como, quando e onde aplicar CAA, desde a tomada de decisão dentro do planejamento do processo, bem como tempo de construção. Ou seja, o CAA deveria ser visto como um método e não apenas um material.

¹ C-TAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, PORTUGAL. carlos.calado@upe.br

² C-TAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, PORTUGAL. aires@civil.uminho.pt

³ Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Brazil. tiberio@tecomat.com.br

⁴ Programa de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Brazil. beda.jr@upe.br

⁵ Programa de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Brazil. bianca.vasconcelos@upe.br

Dessa forma, a presente pesquisa objetivou desenvolver estudos com CAA e CC dentro de um canteiro de obras, apropriando-se do comportamento real dos dois tipos de concreto com aplicação em larga escala, para obtenção de respostas quanto a efetiva possibilidade do uso de CAA no lugar do CC. A Arena Pernambuco foi a obra escolhida para a aplicação da pesquisa, estando localizada na região metropolitana do Recife, possui 128.000 m² de área construída com capacidade para 46.105 pessoas, tendo sua estrutura sido executada em concreto armado em todos os níveis, inclusive nas áreas de arquibancada. O volume de concreto definido em projeto foi de aproximadamente 58.000 m³, distribuído em 06 elevações, sendo 40% (23.200 m³) de CAA e 60% (34.800 m³) de CC. As fundações foram constituídas de sapatas apoiadas diretamente sobre o solo e estacas tipo raiz, moldadas *in loco*. O empreendimento foi construído entre os anos de 2011 e 2013 para sediar jogos da Copa das Confederações em 2013 e Copa do Mundo em 2014, torneios esses patrocinados pela FIFA. O meio ambiente local apresenta os seguintes valores médios anuais: temperatura de 26°C, umidade relativa do ar de 80%, precipitação pluviométrica de 2.418 mm, incidência solar igual a 2.551 horas, e atmosfera marinha por tratar-se de cidade marítima (Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Recife#Clima>) [2]. Entende-se que a competitividade do CAA dependerá do atendimento às viabilidades técnica e econômica. A viabilidade técnica estará associada aos aspectos amplos de trabalhabilidade na aplicação do concreto fresco, assim como resistência e durabilidade do concreto endurecido. A viabilidade econômica deverá ser atendida no conjunto das etapas de materiais, fabricação e aplicação do CAA [3]. Buscou-se ainda comparativo de desempenho entre CAA e CC a partir de composições aplicadas na obra.

O comportamento reológico do concreto fresco mostra fluidez, diferentemente do concreto endurecido que apresenta deformação plástica e fluência. A tensão de escoamento relaciona-se com o espalhamento, ou seja, ela fisicamente pode ser interpretada como a tensão necessária a ultrapassar para que se inicie o escoamento da mistura fluida. Dessa forma, quanto maior essa tensão, maior dificuldade terá o CAA para iniciar o escoamento, o que representa redução de trabalhabilidade. As progressivas alterações físico-químicas do material compósito dependem do tempo [4].

Para os construtores aplicarem CAA nas suas obras, o tempo disponível entre o início da mistura e a conclusão do adensamento nas formas, quando então se inicia a cura, representa importante desafio a ser atendido. As etapas consideradas na aplicação do concreto fresco são: mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto nas formas, exigindo-se em cada uma delas, trabalhabilidade compatível. O CAA, para a manutenção da auto-adensabilidade, necessitará atendimento à fluidez, capacidade de preenchimento, viscosidade, capacidade de passagem e resistência à segregação. O tempo inicial de pega, juntamente com a consistência e coesividade do concreto fresco, determinam o tempo de duração em que a mistura permanece plástica e trabalhável, podendo ser manuseada e aplicada no canteiro de obra, onde para regiões com temperatura mais elevada, caso do Recife, o tempo disponível para aplicação do CAA fresco pode ser reduzido em relação às regiões de clima mais frio. A operação de mistura exige tempo mínimo necessário para que se produza uma composição de concreto uniforme atendendo a resistência especificada, levando-se em consideração o tipo de equipamento misturador, o número de rotações e energia aplicada [5,6,7].

Alguns fatores influenciam na redução da trabalhabilidade: riqueza da mistura, propriedades do cimento, condições do agregado, tempo prolongado de mistura, desempenho dos aditivos plastificantes e superplastificantes, e a temperatura. O CAA obtido na região provém de composições que associam conteúdo de pó com os aditivos. Os plastificantes são aditivos redutores de água e modificadores de viscosidade e, espera-se que estabilizem a pasta pelo aumento da viscosidade da solução aquosa. Os superplastificantes têm efeitos sobre a dispersão de partículas de cimento por meio de repulsão estérica e/ou eletrostática, com características de elevada redução de água. A adsorção do aditivo pode estender a manutenção da fluidez através da dispersão das partículas de cimento, mas, a concentração de íons sulfato na solução pode ajudar a reduzir a intensidade do efeito estérico do polímero, provocando aumento exponencial da tensão de escoamento da mistura, o que pode explicar a perda de eficiência do aditivo observado nas obras, reduzindo a trabalhabilidade e limitando as operações de concretagem, principalmente em temperaturas elevadas onde as reações internas do concreto ocorrem em menor tempo. Verifica-se que o tempo de pega sofre retardo excessivo quando se aplicam

dosagens elevadas de aditivos, independentemente do tipo de cimento aplicado. Some-se ainda a compatibilidade dos aditivos com o cimento, desempenho e custo, o que leva a buscar-se a determinação da dosagem ideal de superplastificante a ser especificada numa composição com base no seu teor de saturação. O cimento e o superplastificante se ligam através de interações físicas e químicas que levam a diferentes características ao concreto, tanto no estado fresco, quanto no endurecido, incluindo o processo de hidratação. A temperatura mais elevada provoca rápida taxa de hidratação inicial retardando a hidratação subsequente, produzindo distribuição não uniforme dos produtos de hidratação dentro da pasta. Isso devido a alta taxa de hidratação inicial reduzir o tempo necessário disponível para a difusão dos produtos de hidratação distantes das partículas de cimento e para precipitação uniforme nos espaços intersticiais, como ocorre nas baixas temperaturas. Então, o concreto aplicado e curado a alta temperatura endurece mais rápido, mas apresenta resistências menores que os aplicados e curados em temperaturas mais baixas. [5,8,9,10,11,12,13,14].

Outros aspectos executivos a destacar são as formas, projeto e execução; e processo de lançamento, a exemplo de bombeamento. Para melhorar o bombeamento do concreto, De Schutter [15] estudou a questão e apresentou as seguintes recomendações: aperfeiçoamento da curva granulométrica; do conteúdo de pasta e de finos; aumento do conteúdo de cimento; buscar baixa relação água/cimento associado à consistência fluida; aplicação de agente modificador de viscosidade. Entende-se por melhorar a bombeabilidade a redução na pressão de bombeamento, redução do atrito e desgaste mecânico dos componentes, aumento da produtividade, redução do bloqueio de linhas, e economia de energia. O processo de lançamento afeta a pressão lateral do CAA sobre a forma. Com base nos estudos desenvolvidos por Torgal e Jalali [16], verifica-se que para redução dos custos de formas especiais para CAA, deve-se considerar: influência entre empuxo, composição e consistência do CAA; concretagem pelo topo ou pela base; densidade de armadura; material utilizado na fabricação e montagem das formas; controle da velocidade de lançamento; monitoramento contínuo dos empuxos na forma. Khayat e Omran [17] realizaram estudos e concluíram que o nível de tixotropia e a taxa de lançamento do CAA têm influência significativa sobre a pressão lateral exercida pelo CAA sobre as formas. Quanto maior o nível de tixotropia do CAA menores pressões laterais, quanto maior a taxa de lançamento, maiores pressões laterais. Silva e Brito [18] com base nos seus estudos, observaram que para temperaturas iniciais mais elevadas houve redução da pressão do CAA sobre a forma por conta do processo de hidratação e endurecimento ser mais rápido, devido ao desenvolvimento de maior coesão e consequente diminuição da pressão.

Em relação aos métodos de cura, Girish *et al.* [19] estudaram comparativo de resistência à compressão do concreto para diferentes métodos de cura, tais como cura úmida, com ar, com membrana e auto cura. Imersão, névoa de água ou pulverização, juta ou pano molhado, são técnicas de adição de água, enquanto que folhas de plástico, retirada retardada das formas e membranas de cura, são técnicas de retenção de água. Os resultados mostraram que o método de cura úmida conduziu às mais elevadas resistências à compressão tanto aos 7 quanto aos 28 dias de cura.

A resistência e o módulo de elasticidade do CAA foram estudados por Desnerck [20] a partir de banco de dados obtido em mais de 250 trabalhos publicados, onde na comparação entre CAA e CC, verificou-se que as resistências do CAA foram aproximadamente 10% mais elevadas, possivelmente devido à maior densidade da microestrutura do auto-adensável. Verificou-se também que o tipo de agregado e o volume da pasta têm influência pequena para o módulo de elasticidade. Para o coeficiente de fluência, há aumento entre 5 a 10% quando se aumenta o conteúdo de pó, o que exigirá maior atenção no controle das deformações para CAA, destacando-se as pontes construídas em balanços sucessivos [21].

A durabilidade do concreto sofre influências adversas que envolvem o transporte de fluidos tais como água pura ou carreando íons cloreto, gás carbônico e oxigênio, além de possíveis danos mecânicos. Esses fluidos podem penetrar e se mover dentro do concreto através de meio poroso, pela fluidez, difusão e absorção. Os poros interconectados elevam a permeabilidade. Gás carbônico leva à carbonatação da pasta hidratada e o oxigênio permite o progresso da corrosão das armaduras envolvidas pelo concreto. Resultado, concreto denso e pouco permeável reduz muito o ingresso de agentes agressivos no seu interior, limitando os ataques corrosivos apenas à sua superfície. Relação

água/cimento, temperatura, grau de hidratação, adições minerais, porosidade capilar, permeabilidade, dentre outros fatores, influenciam nas propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável e concreto convencional vibrado [6,22,23].

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os estudos da pesquisa se desenvolveram no canteiro da obra da Arena Pernambuco, durante um período de sua execução, em três fases: (a) primeira fase de estudos do projeto estrutural, metodologia executiva adotada, materiais empregados e aplicação de questionário para obtenção de informações sobre o desenvolvimento parcial dos trabalhos com identificação dos acertos, dos problemas identificados e das ações corretivas adotadas; (b) segunda fase da pesquisa dentro do canteiro da obra para acompanhamento das etapas executivas com coleta de dados no local e execução de ensaios específicos da pesquisa, nos meses de maio, junho e julho de 2012; (c) avaliação das informações obtidas e dos resultados dos ensaios realizados para obtenção de possíveis respostas aos objetivos da pesquisa aplicada.

Objetivou-se obter respostas quanto ao CAA poder ser aplicado nas regiões de clima quente em meio ambiente mais agressivo, em face de possível viabilidade técnica e econômica comparativamente ao CC. A obra da Arena Pernambuco ao aplicar 58.000 m³ de concreto, sendo 40% de CAA e 60% de CC, tornou-se um grande laboratório de pesquisa em campo. Assim, do conjunto de composições aplicadas, foram escolhidas cinco composições com maior volume de uso, três de CAA e duas de CC, para coleta dos dados de caracterização do concreto fresco, *slump flow* para CAA e *slump* para CC, e resistência à compressão para o concreto endurecido, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Composições de CAA e CC aplicadas na pesquisa.

	Composições				
	CAA - 009	CAA - 017	CAA - 024	CC - 012	CC - 019
Tipo de cimento	CP-II F 32	CP-IV 32 RS	CP-II F 32	CP-II F 32	CP-IV 32 RS
Consumo de cimento	499	525	532	451	476
Areia	856	778	732	815	681
Brita 19 mm	830	798	-	917	946
Brita 12,5 mm	-	-	778	-	-
Água	199	236	215	180	214
Relação (A/C)	0,40	0,45	0,40	0,40	0,45
Plastificante	3,44 ⁽¹⁾	4,83 ⁽²⁾	-	3,12 ⁽¹⁾	4,38 ⁽²⁾
Superplastificante	4,94 ⁽³⁾	5,78 ⁽⁴⁾	4,13 ⁽³⁾	1,98 ⁽³⁾	2,09 ⁽⁴⁾
Resistência $f_{ck,28}$ (MPa)	40	40	40	40	40
<i>Slump flow/Slump</i> (mm)	> 700	> 700	> 700	140 ± 20	140 ± 20
Aplicações	Paredes e pilares	Paredes e pilares	Pré-moldados	Vigas	Fundações

Cimentos: CP-II F 32 equivalente a CEM II/A-L; CP-IV 32 RS equivalente a CEM IV/B 32,5
 Unidade: kg/m³
 Plastificante: ⁽¹⁾SIKAMENT PF 175; ⁽²⁾VIAMIX 261R
 Superplastificante: ⁽³⁾VISCOCRET 5800; ⁽⁴⁾VIAFLUX 2200

Para responder a possível viabilidade da aplicação de CAA fresco em larga escala, concentrou-se a pesquisa nos aspectos de: estudos para determinação das composições adotadas; escolha das classes de espalhamento (CAA) e abatimento (CC); tempo disponível de trabalhabilidade para as operações de transporte, lançamento, adensamento e acabamento; tipo de lançamento adotado para colocação do CAA nas formas; comportamento das formas em face da possível maior pressão lateral do CAA fresco; desempenho dos aditivos para manutenção da trabalhabilidade do CAA durante as operações de concretagem e acabamento. Os ensaios de espalhamento (*slump flow*) foram feitos com base na Norma NBR 15823-2 (2010); os ensaios de abatimento (*slump test*) foram feitos com base na Norma NBR NM 67 (1998).

Para aplicação dos ensaios específicos da pesquisa no canteiro da obra, das cinco composições estudadas com o concreto fresco, escolheu-se uma representativa de CAA (CAA -009) e outra de CC (CC-012), onde elas possuíam: mesma relação água/cimento (0,40); mesmo tipo de cimento (CP-II F 32); mesmo tipo de agregados e aditivos; e maiores volumes aplicados na obra. Os estudos foram realizados igualmente para as duas composições escolhidas de CAA e CC, permitindo comparativo de desempenho entre os dois concretos, a partir de dois tipos de amostras: tipo 1, corpos de prova moldados conforme recomendações normativas, com armazenamento em condições de laboratório (CP) (ver Fig. 1); tipo 2, corpos de prova, extraídos de placas de concreto moldadas e curadas simulando as mesmas condições ambientais do concreto moldado nos elementos estruturais da obra, chamados testemunhos (TE) (ver Fig. 2). Realizaram-se ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, e buscou-se realizar estudos de durabilidade pouco usuais em canteiro de obra nova, aplicando-se estudos típicos de laboratórios de pesquisa. Os ensaios de durabilidade aplicados aos corpos de prova (CP) e testemunhos (TE) foram: Difusão de íons cloreto; Absorção de água por capilaridade; Cálculo do índice de vazios.



Figura 1. Corpos de prova (CP).



Figura 2. Testemunhos (TE).

Os ensaios de resistência à compressão foram feitos com base na Norma NBR-5739 (2007) e os ensaios de módulo de elasticidade com base na Norma NBR-8522 (2008), tendo todas as amostras, CP e TE, a idade de 33 dias quando da realização dos ensaios: difusão de íons cloreto com base na ASTM C 1202 (1997); absorção de água por capilaridade com base nas Normas NBR-9779 (2012) e NBR-7222 (2011); cálculo do índice de vazios com base na Norma NBR-9778 (2009).

O estudo de viabilidade econômica procurou estabelecer comparativo de custo a partir dos materiais aplicados em cada uma das composições de CAA e CC, de modo a possibilitar comparativo entre os concretos e com as referências bibliográficas existentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entre os meses de maio e julho de 2012 a construção da Arena Pernambuco encontrava-se na fase de execução da superestrutura, com o início de montagem das estruturas pré-moldadas das arquibancadas inferior e superior (ver Fig. 3). A utilização de concreto auto-adensável neste período foi intensificada; todas as estruturas pré-moldadas das arquibancadas, vigas de apoio e degraus, foram realizadas com CAA, além de pilares e paredes das rampas de acesso (ver Fig. 4). No período referido foram aplicados aproximadamente 15.000 m³ de concreto, cerca de 26% do total previsto para a obra; destes, cerca de 40% (6.000 m³) foram CAA, o que corresponde a um volume médio mensal de 2.000 m³. A decisão de estudar e aplicar CAA na obra da Arena Pernambuco foi da área técnica da construtora levando em consideração, principalmente, a existência de elementos estruturais com grande densidade de armadura, dificuldade de acesso dos vibradores para adensamento do CC, necessidade de lançamento do concreto de maiores alturas livres, e menores prazos de execução.



Figura 3. Arquibancadas.



Figura 4. Rampas de acesso.

As centrais de concreto foram instaladas no canteiro de obras. O concreto era transportado em caminhões betoneira e lançado através de bombeamento. O tempo necessário de trabalhabilidade para realização das operações desde a fabricação até o final do adensamento e acabamento nas formas foi no máximo, de 90 minutos. Relativamente aos componentes dos concretos salienta-se: Ligantes: dois tipos de cimento foram aplicados: CP-IV 32 RS, cimento portland pozolânico aplicado nos elementos de fundação, sendo a pozolana metacaulim, argila ativada termicamente de 600°C a 700°C; CP-II F 32, cimento portland composto com filer calcário aplicado nos elementos da superestrutura. Agregados: os agregados foram selecionados considerando seu potencial de reatividade com álcalis. As jazidas aprovadas foram monitoradas, sendo realizados ensaios petrográficos e de reatividade álcali-agregado semestralmente para acompanhamento do fornecimento. Aditivos: a dificuldade inicial encontrada foi a compatibilidade de aditivos para atender a necessidade das composições, principalmente quanto ao tempo e manutenção de lançamento, para os dois tipos de cimento aplicados. Procurou-se manter a trabalhabilidade do concreto dentro do prazo máximo necessário de 90 minutos com temperatura média aferida de 34°C. Foram testadas 13 composições experimentais com aplicação de 20 aditivos plastificantes e superplastificantes fornecidos por sete diferentes fabricantes, com dosagem variando de 0,8% a 1,4%, com espalhamento de 700 mm a 745 mm e espalhamento após uma hora variando de 630 mm a 685 mm. Das 13 composições estudadas, cinco atenderam aos requisitos técnicos exigidos (ver Quadro 1). A composição CAA – 024 foi aplicada nos elementos pré-moldados das arquibancadas, que foram deslocados do pátio da linha de produção para berços de apoio em toda a extensão das peças até a retirada para transporte e lançamento nos apoios definitivos, com 24 horas após a concretagem.

As formas industrializadas aplicadas precisaram ser adaptadas para suportar as pressões laterais geradas pelo CAA fresco e também permitir melhor acabamento final do concreto. Elas foram estruturadas com aço e utilizaram madeira compensada nas faces em contato com o concreto, com melhor isolamento das juntas dos painéis para evitar fuga de finos da argamassa.

O Quadro 2 apresenta os resultados coletados no canteiro de obra do controle tecnológico do concreto nos meses de maio a julho de 2012. Foram apresentados os valores médios de cada um dos grupos de resultados com base no número de amostras consideradas. A temperatura inicial foi medida na central de concreto, enquanto que a temperatura final foi medida na bomba quando da operação de lançamento. O espalhamento foi medido para o CAA e o abatimento foi medido para o CC.

Quadro 2. Resultados de temperaturas e espalhamento/abatimento.

Mês (2012)	No. Amostras	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Espalhamento/abatimento (mm)
Composição: CAA – 009 (Volume aplicado = 2763 m ³)				
Maio	27	34,4	33,8	700
Junho	90	32,8	33,1	702
Julho	81	32,1	32,8	705
Composição: CAA – 017 (Volume aplicado = 1084 m ³)				
Maio	27	34,4	33,8	700
Junho	90	32,8	33,1	702
Julho	81	32,1	32,8	705
Composição: CAA – 024 (Volume aplicado = 2198 m ³)				
Maio	27	34,4	33,8	700
Junho	90	32,8	33,1	702
Julho	81	32,1	32,8	705
Composição: CC – 012 (Volume aplicado = 6106 m ³)				
Maio	27	34,4	33,8	700
Junho	90	32,8	33,1	702
Julho	81	32,1	32,8	705
Composição: CC – 019 (Volume aplicado = 2526 m ³)				
Maio	27	34,4	33,8	700
Junho	90	32,8	33,1	702
Julho	81	32,1	32,8	705

O Quadro 3 apresenta os resultados coletados no canteiro de obra do controle tecnológico do concreto nos meses de maio a julho de 2012. Foram apresentados os valores médios de cada um dos grupos de resultados com base no número de amostras consideradas. Os resultados contemplam as cinco composições analisadas, com os resultados obtidos nos meses de maio, junho e julho de 2012. Também está indicado o volume total de CAA e CC aplicado para cada uma das composições nos três meses referidos.

Quadro 3. Resultados de resistência à compressão aos sete e aos 28 dias.

Mês (2012)	No. Amostras	Resistência (MPa) 07 dias	Média (±) Desvio padrão	Resistência (MPa) 28 dias	Média (±) Desvio padrão
Composição: CAA – 009 (Volume aplicado = 2763 m ³)					
Maio	27	44,1±4,57		48,5±3,49	
Junho	90	38,1±5,14	39,99±5,07	49,5±4,98	49,96±4,69
Julho	81	40,7±4,13		51,0±4,53	
Composição: CAA – 017 (Volume aplicado = 1084 m ³)					
Maio	27	45,4±4,17		50,1±3,05	
Junho	90	36,6±5,22	39,40±6,12	49,1±5,89	49,80±4,60
Julho	81	37,8±5,28		50,3±4,15	
Composição: CAA – 024 (Volume aplicado = 2198 m ³)					
Maio	27	37,3±3,82		42,2±4,32	
Junho	90	40,1±3,73	41,60±4,36	49,7±3,84	50,50±4,56
Julho	81	41,9±4,41		50,7±4,63	
Composição: CC – 012 (Volume aplicado = 6106 m ³)					
Maio	27	43,1±3,70		49,0±3,34	
Junho	90	36,5±4,60	38,70±4,97	47,5±4,14	48,60±4,01
Julho	81	38,8±4,60		49,2±4,00	
Composição: CC – 019 (Volume aplicado = 2526 m ³)					
Maio	27	40,5±5,49		52,4±2,58	
Junho	90	32,1±5,21	34,20±4,89	46,1±2,95	47,50±4,01
Julho	81	35,3±4,11		48,2±4,31	

O Quadro 4 a seguir apresenta os resultados do conjunto dos ensaios específicos da pesquisa realizados no canteiro da obra com os corpos de prova (ver Fig. 1) CAA – 009 (CP), CC – 012 (CP); e testemunhos (ver Fig. 2) CAA – 009 (TE) e CC – 012 (TE). Os resultados apresentados se referem aos ensaios de: resistência à compressão; módulo de elasticidade; difusão de ions cloreto; absorção de água por capilaridade; índice de vazios. Os resultados apresentados de resistência à compressão e módulo de elasticidade são referentes aos valores médios para 5 (cinco) exemplares para cada um dos ensaios realizados. As amostras (CP) e (TE) tinham a idade de 33 dias quando da realização dos ensaios de resistência e módulo de elasticidade; 60 dias quando da realização dos ensaios de difusão de ions cloreto; 35 dias quando da realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade e índice de vazios. Os resultados de absorção de água apresentam leituras feitas após 72 horas de ensaio.

Quadro 4. Resultados do conjunto dos ensaios específicos da pesquisa no canteiro da obra.

Ensaio	Composição	Tipo da amostra	Resultado
Resistência f _{ckj} (MPa)	CAA-009	CP	62,58 ± 1,72
		TE	63,14 ± 3,22
	CC-012	CP	57,42 ± 1,69
		TE	56,73 ± 3,65
Módulo de elasticidade E _{ci} (Gpa)	CAA -009	CP	41,10 ± 0,87
		TE	39,90 ± 1,17
	CC-012	CP	38,20 ± 1,31
		TE	39,40 ± 2,32

Quadro 4. (Continuação).

Difusão de ions cloretos	CAA -009	CP	1665
		TE	2585
Carga média passante em Coulombs (C)	CC-012	CP	2040
		TE	2940
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	CAA -009	CP	0,424
		TE	0.446
	CC-012	CP	0.467
		TE	0.573
Índice de vazios I _v (%)	CAA -009	CP	8.99
		TE	11.24
	CC-012	CP	10.59
		TE	12.22

Os valores dos resultados apresentados referem-se à média dos resultados para cada um dos exemplares de amostras ensaiadas: 05 exemplares para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade; 03 exemplares para os ensaios de difusão de ions cloreto, absorção de água por capilaridade e cálculo do índice de vazios.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os gráficos de difusão de ions cloretos, absorção de água por capilaridade e índice de vazios, respectivamente. Todos os gráficos foram feitos a partir dos resultados apresentados no Quadro 4 para as amostras CP e TE das composições CAA-009 e CC-012.

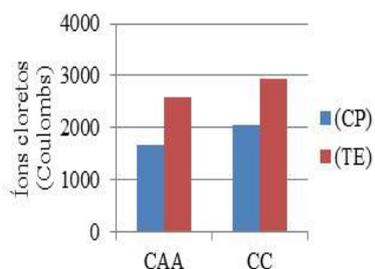


Figura 5. Difusão de ions cloretos.

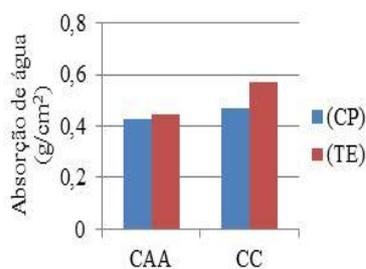


Figura 6. Absorção de água.

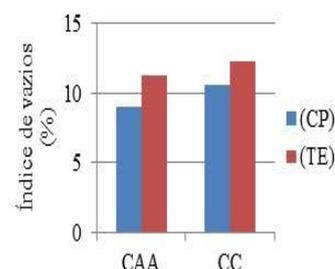


Figura 7. Índice de vazios.

O Quadro 5 apresenta o custo comparativo entre as composições CAA-009 e CC-012 a partir do quantitativo dos materiais aplicados, aplicando-se ponderação que levou em conta a variação de quantidades e o custo unitário dos materiais aplicados nas duas composições estudadas.

Quadro 5. Custo comparativo das composições CAA-009 e CC-012.

Materiais (kg/m ³)	Composições			
	CC-012		CAA-009	
	Quantidade	Custo 1	Quantidade	Custo 2
Cimento	451	100	499	110,64
Areia	815	100	856	105,03
Brita 19 mm	917	100	830	90,51
Água	180	100	199	110,56
Plastificante	3,12	100	3,44	110,33
Superplastificante	1,98	100	4,94	248,89
Total		100		113,45

Verificou-se aumento aproximado de 13,45% no custo unitário do CAA em relação ao CC, levando-se em consideração o custo dos materiais aplicados.

CONCLUSÕES

Os resultados foram obtidos aplicando-se a metodologia de trabalho adotada. Dessa forma, após a realização da pesquisa no canteiro de obra da Arena Pernambuco, pode-se apresentar algumas conclusões conforme enumeradas a seguir:

- 1) Ao estudar os resultados do questionário aplicado para obtenção do histórico da obra, desde a etapa do projeto até o início da pesquisa no canteiro da obra, foi possível verificar que as conclusões de Rich *et al* (2010)¹ na Inglaterra, continuavam válidas para o Brasil. O projeto estrutural, escolha inicial dos materiais, logística executiva, formas, por exemplo, deixaram claro que tudo foi estabelecido para uma obra com concreto convencional vibrado. A decisão de aplicar grande volume de concreto auto-adensável, cerca de 40% do volume total aplicado, foi tomada com a obra já iniciada, pela equipe técnica de execução a partir de algumas variáveis determinantes: necessidade de redução de prazos executivos; elementos estruturais com elevada densidade de armadura; elementos estruturais com geometria de inviável acesso para os vibradores; estabelecimento de logística executiva mais racional;
- 2) O CAA apresentou resistências à compressão levemente superiores às do CC equivalente, tanto aos sete dias, quanto aos 28 (vinte e oito) dias. A diferença apresentou-se maior aos sete dias, diminuindo aos 28 dias;
- 3) A trabalhabilidade do CAA fresco representou o maior desafio com que os executores se depararam, obrigando-os a manter controle tecnológico de alta efetividade e qualidade, o que permitiu que os objetivos perseguidos pela produção fossem atendidos;
- 4) O segundo maior desafio enfrentado foi adaptar as formas para CAA. Como ainda não há escala de uso do CAA em relação ao CC, as formas foram as usualmente empregadas para CC com adaptações de reforço. No entanto, apesar dos cuidados, em algumas situações a estrutura da forma não suportou a pressão lateral exercida pelo CAA, maior que o CC, o que obrigou a produção a adotar maiores cuidados e promover adaptações durante as operações de lançamento do concreto;
- 5) Ao ser analisado o CAA endurecido, verificou-se que houve efetivamente pequeno ganho de resistência em relação ao CC, o mesmo acontecendo em relação à durabilidade a partir dos resultados dos ensaios de durabilidade realizados;
- 6) O projeto estrutural não sofreu análise complementar em face da substituição parcial do CC pelo CAA. Assim, a análise ficou restrita à verificação sistemática dos resultados da resistência à compressão, e assistemática do módulo de elasticidade.

Assim, os resultados da pesquisa demonstraram que há enorme possibilidade do concreto auto-adensável ser empregado como alternativa viável ao uso do concreto convencional vibrado, no que depender dos construtores e projetistas, mesmo em regiões de clima quente.

REFERÊNCIAS

- [1] Rich, D. [*et al.*] (2010). To SCC or Not To SCC? UK Contractor's Views. *Theme: Production and Placement of SCC*, 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and the 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, 26 to 29 September, Montreal, Canada, pp. 669 – 676.
- [2] Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), *Available in: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Recife#Clima>*, Jan 14th/2015.
- [3] De Schutter, G. (2013). Towards the Concrete Factory of the Future with SCC. *Proc. of Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Illinois, USA, May 12-15.

- [4] Desnerck, P. (2012). Properties of fresh self-compacting concrete mixes. *Proc. Of Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*. Universiteit GENT. 54° IBRACON, Maceió, Brazil, October.
- [5] Neville, A.M.; Brooks, J.J. (2013) *Concrete Technology*, 2nd ed. Copyright Licensing Agency Ltd, 90, Tottenham Court Road, London, United Kingdom, pp. 452.
- [6] Soroka, I. (2004) *Concrete in Hot Environments*, Published by E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, pp. 179-200.
- [7] De Schutter, G. (2012). Hydration and microstructure. *Proc. of Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*. 54° IBRACON, Maceió, Brazil, October.
- [8] Griesser, A. (2002). *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*. Swiss Federal Institute of Technology – Zurich, Tese de doutoramento.
- [9] Camões, A. (2005). Influência da presença de adições minerais no comportamento do betão fresco em composições com incorporação de superplastificantes. *Revista de Engenharia Civil-Universidade do Minho*, N. 23, pp. 19-30.
- [10] Phan, T.H. [et al.] (2006). Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, N.36, pp. 1807-1813.
- [11] Carneiro, F.D. [et al.] (2012). The influence of temperature of the cement on the characteristics of fresh concrete performances. I SILAMCAA, 54° IBRACON, ISSN 2175-8182, Outubro, Brazil.
- [12] Mikanovic, N.; Jolicoeur, C. (2008). Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes. *Cement and Concrete Research*, N. 38, pp. 907-919.
- [13] Petit, J-Y. [et al.] (2010). Effect of temperature on the rheology of flowable mortars. *Cement & Concrete Composites*, N.32, pp. 43-53.
- [14] Ghafoori, N.; Diawara, H. (2010). Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, N. 24, pp. 946-955.
- [15] De Schutter, G. (2012). Construction process. *Proc. of Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*. 54° IBRACON, Maceió, Brazil, October.
- [16] Torgal, F.P.; Jalali, S. (2010). Considerações sobre o impulso dos BAC's no dimensionamento de cofragens verticais. *Anais do bac 2010 – 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável, Guimarães – 1 e 2 de Julho*.
- [17] Khayat, K.H.; Omran, A.F. (2011). Field Validation of SCC Formwork Pressure Prediction Models. *Concrete International*, June, pp. 33-39.
- [18] Silva, P.; Brito, J. (2010). A pressão exercida pelo betão auto-compactável (BAC) nas cofragens. *Anais 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável, Guimarães – 1 e 2 de Julho*.
- [19] Girish, S. [et al.] (2013). Comparative Study of Self-cured Concrete with Conventionally Cured Concrete. *Proc. of 7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*, Paris, from the 1st to the 6th of September.
- [20] Desnerck, P. (2012). Engineering properties of self-compacting concrete. *Proc. Of Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*. Universiteit GENT. 54° IBRACON, Maceió, Brazil, October.
- [21] Bazant, Z.P. [et al.] (2011). Excessive Creep Deflections: An Awakening. *Concrete International*, August, pp. 44-46.
- [22] De Schutter, G. (2012). Durability. *Proc. of Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*. 54° IBRACON, Maceió, Brazil, October.
- [23] Anagnostopoulos, I.; Sideris, K.K. (2010). Assessment and Comparison of Transport Properties in Order to Evaluate the Potential Durability of Self-compacting and Conventional Concretes. *Proc. of 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and the 4th North American Conference on the Design and Use of SCC*, Montreal, Canada, pp. 1005-1012.