

# VIABILIDADE TÉCNICA- ECONÔMICA PARA USO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS EM INDÚSTRIAS DE PRÉ- FABRICADOS

Anderson Renato Vobornik Wolenski <sup>1</sup>

Caroline Leal Faccin <sup>2</sup>

João Paulo Boff Almeida <sup>3</sup>

André Luiz Christoforo <sup>4</sup>

Allan Guimarães Borçato <sup>5</sup>

## RESUMO

O custo do concreto, para fins estruturais, decorre dos insumos e da mão de obra envolvida, tanto na produção quanto em seu lançamento. As altas taxas de fluidez, autoadensamento, trabalhabilidade e melhor acabamento tornam o Concreto Autoadensável (CAA) uma alternativa viável para reduzir os custos relativos à mão de obra. Contudo, o uso de aditivos superplastificantes eleva o custo material na sua composição, quando comparado a um Concreto Convencional (CCV). Assim, esta pesquisa se desenvolve comparando os custos globais para produção de concretos com resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) entre 30 e 50 MPa a partir de experimentações com CAAs e um CCV de referência, com especial uso do Cimento Portland CP V-ARI, visando sua incorporação em uma indústria de pré-fabricados localizada no oeste catarinense. O custo total demonstrou que CAA de classes com  $f_{cm} < 40 \text{ MPa}$  apresentam custo médio 7,60% inferior ao CCV ( $f_{cm} = 33 \text{ MPa}$ ) de referência. Além disso, os custos globais não avaliaram os efeitos gerados no longo prazo como, por exemplo, a elevação da durabilidade em função da menor relação água/cimento ( $a/c$ ), tornando os CAAs aqui pesquisados ainda mais competitivos.

**Palavras-chave:** Construção Civil, Concretos autoadensável, Cimento CP V-ARI.

## INTRODUÇÃO

1 Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) / anderson.wolenski@ifsc.edu.br / <https://orcid.org/0000-0002-5709-1965>

2 Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) / carol.leal1011@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-3156-5982>

3 Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) / boff.joaopaulo@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0001-8667-1718>

4 Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) / chisstoforoal@yahoo.com.br / <https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>

5 Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) / allan.borcato@ifsc.edu.br / <https://orcid.org/0000-0003-3822-2859>

O crescente aumento pela procura por projetos estruturais em concreto armado implica na demanda por pesquisas capazes de auxiliar nos novos desafios da construção civil. Destaca-se o aumento pelo uso do Concreto Autoadensável (CAA), dada sua capacidade de aliar resistência mecânica com fluidez, coesão e trabalhabilidade. Tais propriedades possibilitam um adensamento em função apenas de seu peso próprio, com um completo preenchimento da forma mesmo diante de densas armaduras e/ou dutos, além da manutenção de sua homogeneidade e ausência de segregação nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento, conforme expõe a ABNT NBR 15823 (2017).

Desenvolvido no Japão, na década de 80, o CAA ganhou aplicabilidade em grandes pontes no país, como a *Akashi-Kaikyo*. Pioneiro no assunto, Okamura (1997) define o CAA como um material fluido que pode ser lançado sem necessidade de compactação ou vibração, mantendo-se homogêneo, coeso e sem segregação. No Brasil, este tipo de concreto plástico ganhou destaque a partir dos anos 2000 em edifícios em Goiânia-GO (WOLENSKI, 2010).

Dentre as principais características, o atendimento aos parâmetros de trabalhabilidade e fluidez implica em um CAA com altas taxas de abatimento providas pelo uso de aditivos superplastificantes, capazes de elevar sua fluidez sem acréscimo na relação água/cimento ( $a/c$ ), mantendo a coesão das partículas sem ocorrência de segregação ou exsudação (OKAMURA, 1997; COPPOLA, 2000; NUNES, 2001; GOMES, 2002).

O uso do CAA no Brasil, como alternativa ao Concreto Convencional (CCV), ainda enfrenta uma questão cultural significativa. Por isso, a relevância por pesquisas que demonstrem as vantagens quanto a maior durabilidade e facilidade de adensamento, diante de um CCV que requer um número maior de operários no processo de lançamento/adensamento que, por vezes, acaba por incorrer na ocorrência de nichos (falhas) de concretagem, dada as densas armaduras em projetos estruturais complexos em concreto armado.

Este trabalho objetivou, portanto, avaliar a viabilidade técnica e econômica para incorporação de concretos altamente fluidos produzidos com Cimento Portland CP V-ARI, a partir de ensaios com CAAs e um CCV de referência, com a comparação dos custos de produção para traços com resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) entre 30 e 50 MPa, no contexto das indústrias de pré-fabricados existentes no oeste catarinense, mais precisamente, em São Carlos-SC, berço científico do Núcleo de Pesquisas Aplicadas à Construção Civil (NuPAC<sub>2</sub>) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

## OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Esta pesquisa possui como objetivo principal comparar os custos entre dosagens de CAAs, com as relações  $a/c$  iguais a **0,47**, **0,51** e **0,56** e uso do cimento CP V-ARI, frente a um CCV de referência com  $a/c=0,60$ , visando sua incorporação em indústrias de pré-fabricados de concreto na região oeste de Santa Catarina.

Como objetivos específicos avaliaram-se qualitativamente os parâmetros de fluidez e trabalhabilidade no que tange à determinação do teor ótimo do aditivo superplastificante e dos percentuais ótimos dos agregados miúdo e graúdo, a fim de avaliar os custos dos CAAs pesquisados frente ao CCV de referência.

## METODOLOGIA

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### ***Cimento Portland CP V-ARI***

O uso do CP V-ARI expandiu-se nos últimos anos devido a sua grande aplicabilidade na indústria de pré-fabricados de concreto ocasionada, principalmente, pela sua capacidade de alto ganho de resistência em curtos intervalos de tempo (WOLENSKI, 2010). Segundo Souza *et al.* (2018), este ganho de resistência inicial elevado se deve ao fato de que o CP V-ARI é o cimento comercial que possui a maior quantidade de clínquer, devido ao baixo teor de adições permitidas (até 10% de materiais carbonático). Além disso, o clínquer passa por um processo de moagem mais longo que os cimentos convencionais, garantindo assim uma maior finura, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (SOUZA; MEDEIROS; HOPPE FILHO, 2018).

O CP V-ARI deve apresentar resistência à compressão mínima de 34 MPa aos 7 dias (ABNT NBR 16607, 2018), mas o concreto produzido continua ganhando resistência ao longo do tempo, atingindo valores elevados de resistência com maior rendimento do concreto. Na Tabela 1 são apresentadas as características físicas limites para o cimento aqui adotado.

Tabela 1 - Características físicas do Cimento Portland CP V-ARI segundo ABNT NBR 16607 (2018)

Ensaio Físicos	Unidade	Especificação
Resíduo na peneira # 200 (75 $\mu$ m)	%	< 6
Tempo de início de pega	horas	> 1
Tempo de fim de pega	horas	< 10
Resistência à compressão 1 dia	MPa	> 14
Resistência à compressão 3 dias	MPa	> 24
Resistência à compressão 7 dias	MPa	> 34
Resistência à compressão 28 dias	MPa	-
Percentual de material carbonático	%	< 10

Fonte: Boletim técnico do fabricante (2020)

O emprego do CP V-ARI, nesta pesquisa, elevou inicialmente o custo do traço (na Fase Pasta) para as 03 (três) relações *a/c* estudadas, mas em contrapartida, não exigiu a adoção de adições minerais de finos, como requerido em CAAs produzidos com cimento CP II (FACCIN *et al.*, 2017; BACHENDORF *et al.* 2017) e CP IV (WOLENSKI, 2010).

### ***Aditivo Superplastificante***

O uso de aditivos superplastificantes permite que o CAA alcance alta fluidez no estado fresco, devido a sua base de carboxilatos modificados capazes de reduzir significativamente a quantidade de água na mistura. Neste contexto, o aditivo superplastificante Sika3535<sup>®</sup> (S3535) é aplicado principalmente na confecção de Concretos de Alto Desempenho (CAD), CAA e indústrias de pré-fabricados.

O aditivo é incorporado ao concreto por meio dos efeitos de absorção superficial das partículas de cimento, produzindo concretos de alta resistência com excelente fluidez. Porém, deve-se atentar para o efeito da superdosagem, a qual poderá ocasionar forte exsudação, segregação e retardo excessivo da pega, podendo levar ao não endurecimento ou à perda de resistência do concreto. A Tabela 2 expõe informações técnicas a respeito do aditivo S3535.

Tabela 2 - Propriedades e características do aditivo superplastificante S3535

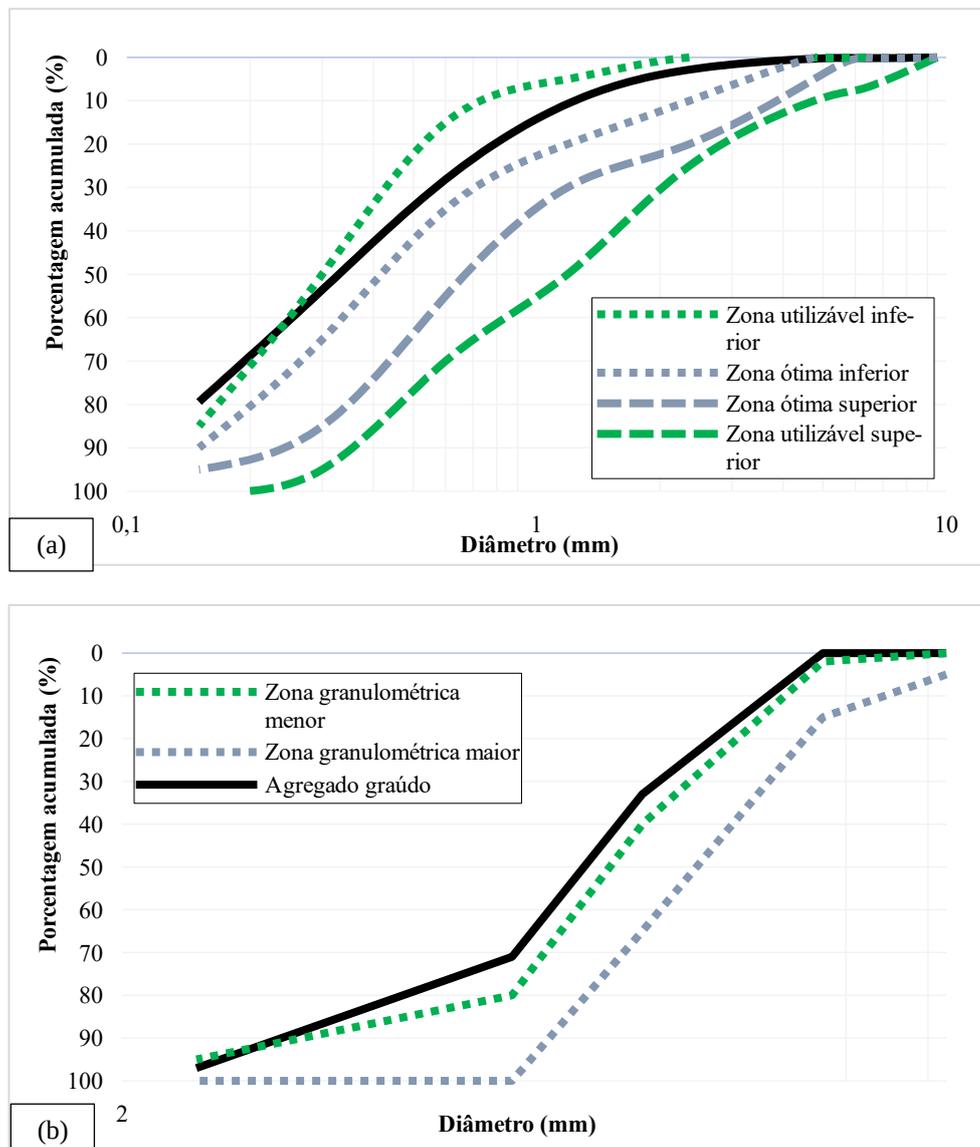
Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
pH	5,0 ± 1,0
Teor de sólidos	28,5 e 31,5 %
Aspecto	Castanho
Massa específica	1,08 ± 0,02 kg/ litro

Fonte: Boletim técnico do fabricante (2020)

### Agregados Miúdo e Graúdo

Como dados fundamentais para a dosagem de CAAs, ensaios de granulometria para os agregados miúdo e graúdo foram realizados conforme a norma ABNT NBR NM 248:2003. Na Figura 1 têm-se, respectivamente, os resultados para a areia fina e brita zero que foram utilizados na presente pesquisa.

Figura 1- Ensaio de granulometria: (a) agregado miúdo; (b) agregado graúdo



Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

O agregado miúdo e agregado graúdo apresentaram módulo de finura de 1,75 e 1,68, respectivamente. Para o diâmetro máximo característico, obtiveram-se os valores de 2,36 mm e o 9,5 mm, respectivamente, para os agregados miúdo e graúdo. Tais ensaios são importantes no que condiz à obtenção dos CAAs e CCV elaborados neste estudo.

## **Fundamentos Experimentais da Pesquisa**

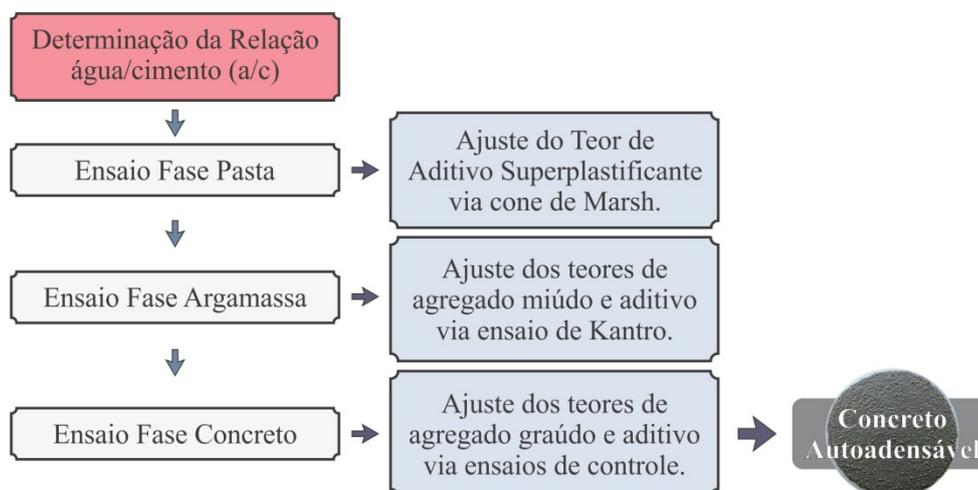
Os experimentos estudaram os parâmetros do CAA para o estado fresco e endurecido capazes de produzir concretos com custo competitivo em relação ao CCV de referência com resistência à compressão média  $f_{cm} \approx 30 \text{ MPa}$ . Adotou-se o método de dosagem proposto pelo método REPETTE-MELO (MELO, 2005) para três relações de  $a/c$ , 0,47; 0,51 e 0,56, a fim de obter CAAs com  $f_{cm}$  iguais a 40 MPa, 35 MPa e 30 MPa, respectivamente.

## **Método de Dosagem para CAA**

O método REPETTE-MELO define as proporções do CAA tomando como ponto de partida a resistência à compressão, de modo a não exigir ao longo de suas etapas o julgamento subjetivo da qualidade da mistura. Os componentes do concreto são ajustados com base em ensaios rápidos e acessíveis, de modo a eliminar decisões que dependam do conhecimento experimental do usuário (MELO, 2005).

O método é baseado na racionalização da dosagem do CAA a partir do estabelecimento da relação água/cimento ( $a/c$ ), segundo as exigências de resistência à compressão, a exemplo do que ocorre com os CCVs. Verifica-se, pela Figura 2, que o processo preconiza o ajuste do teor de aditivo superplastificante em todas as fases de dosagem, pois o aditivo possui relação direta com o custo final do concreto, além de evitar problemas como segregação ou exsudação caso o mesmo seja usado de modo inadequado durante a dosagem do CAA.

Figura 2 – Fluxograma do processo de dosagem do CAA - Método REPETTE-MELO



Fonte: Adaptado de WOLENSKI (2010)

Destaca-se que os experimentos na fase pasta seguem o ensaio de Marsh, conforme propõe a ABNT NBR 7681-2 (2013). Para a fase argamassa, as análises seguem o ensaio de abatimento de *Kantro*, proposto em Gomes (2002). Tais fases são escopos de trabalhos precursores à presente pesquisa e, portanto, são aqui apenas sintetizadas.

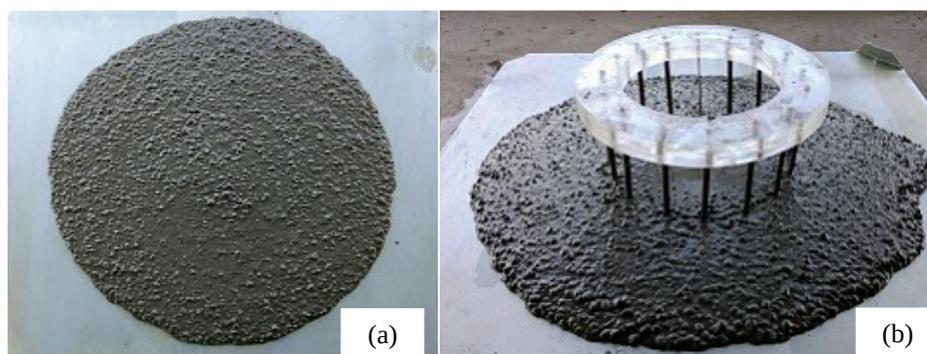
## ***Ensaio de Controle***

Sabe-se que para a elaboração de um CAA deve-se preconizar à diminuição da relação  $a/c$  com a conservação de suas propriedades de fluidez e trabalhabilidade. Assim, a adoção de aditivos em quantidades normalizadas resulta no aumento da trabalhabilidade por um período maior de tempo e na elevação de sua resistência e durabilidade, dado o decréscimo do fator  $a/c$ . Logo, os ensaios aqui propostos buscam avaliar a fluidez, trabalhabilidade, coesão e exsudação, por meio de ensaios de controle para os estados fresco e endurecido do CAA, a fim de determinar os percentuais ótimos de cada material e avaliar sua viabilidade técnica e econômica, frente ao CCV de referência, conforme pressupõe o objetivo central deste estudo.

## ***Estado Fresco***

Produzir um CAA exige elevada fluidez com viscosidade e coesão entre as partículas, a fim de garantir um escoamento contínuo e ausente de segregação e/ou exsudação. O adensamento, por sua vez, requer três requisitos: a capacidade de preenchimento, a resistência à segregação e a capacidade de transpasse entre armaduras densas. Para avaliar tais requisitos, portanto, os ensaios de controle no estado fresco são imprescindíveis para obtenção dos CAAs aqui pesquisados. Nesta pesquisa realizaram-se ensaios de espalhamento, seguindo a ABNT NBR 15823-2 (2017), e o ensaio de anel J, conforme ABNT NBR 15823-3, (2017). A Figura 3 ilustra tais ensaios, capazes de mensurar a fluidez e a habilidade passante do CAA.

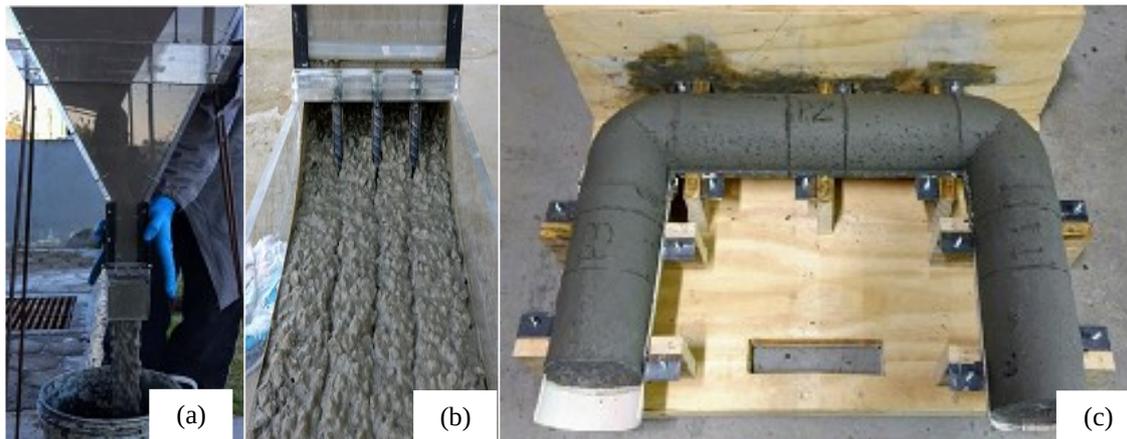
Figura 3 - Ensaio de espalhamento (a) e ensaio do anel J (b)



Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Sequencialmente, foram executados os ensaios do funil V (ABNT NBR 15823-5, 2017), da caixa L (ABNT NBR 15823-4, 2017) e do tubo U (GOMES, 2002), conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Ensaio para o funil V (a), caixa L (b) e tubo U (c)



Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Tais ensaios avaliam o CAA quanto à trabalhabilidade e fluidez, além de avaliar sua habilidade passante e a ocorrência de segregação e exsudação. Em contrapartida, para avaliação do CCV de referência, realizou-se o ensaio de abatimento no cone de Abrams, com valores de abatimento entre 10 e 12 cm. Para todos os concretos, adotaram-se uma betoneira basculante com capacidade de 120 litros, cujo processo de mistura seguiu a proposição detalhada por Wolenski (2010).

### ***Estado Endurecido***

As instruções para a coleta e a preparação dos corpos de prova dos CAAs e CCV pesquisados seguiram o que recomenda a ABNT NBR NM 33 (1998). Confeccionaram-se corpos de prova (CPs) cilíndricos de 10×20 cm, sendo três para cada uma das idades de 1, 7, 14, 21 e 28 dias, a fim de obter a resistência mecânica à compressão média. Os CPs foram armazenados em tanque para cura submersa até a data de rompimento, realizada em prensa servo controlada com capacidade máxima de 1.000 kN (Intermetric iM Unique 2223©).

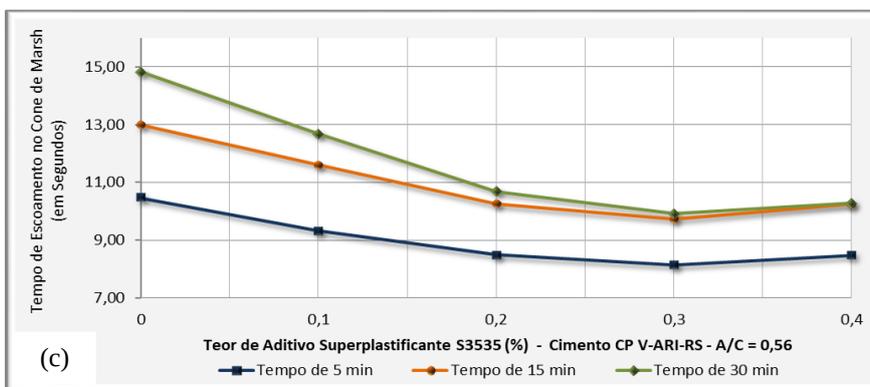
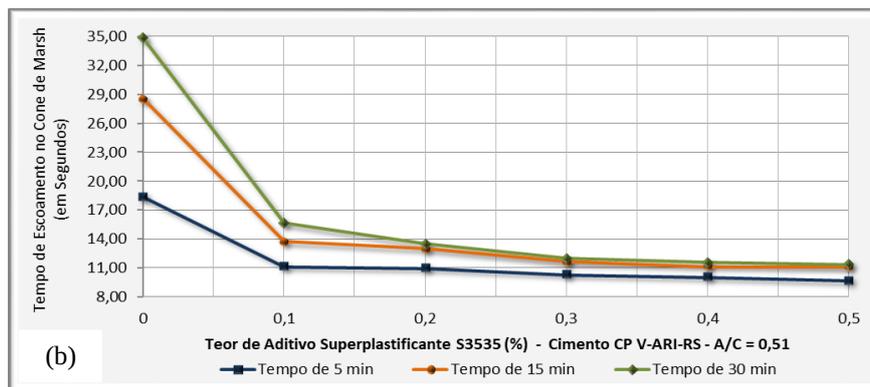
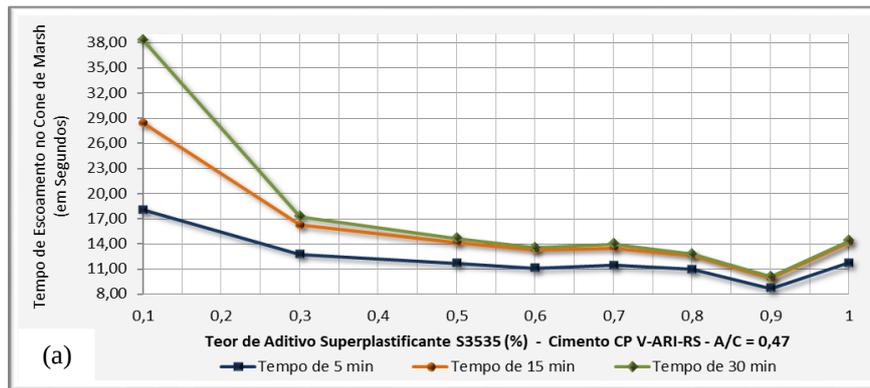
### ***Resultados Experimentais da Pesquisa***

Seguindo a metodologia REPETTE-MELO (MELO, 2005) para os CAAs, os resultados são apresentados na sequência para as três fases: pasta, argamassa e concreto.

#### ***Fase Pasta***

Seguindo o Ensaio de Marsh (ABNT NBR 7681-2, 2013), os teores ótimos para o aditivo superplastificante foram determinados e estão apresentados na Figura 5. Um detalhamento sobre a metodologia do ensaio é obtido em Bachendorf *et al.* (2017).

Figura 5 - Resultados para determinação do teor ótimo de superplastificante: (a) teor de 0,8 % para  $a/c=0,47$ ; (b) teor de 0,4 % para  $a/c=0,51$  e (c) teor de 0,3 % para  $a/c=0,56$



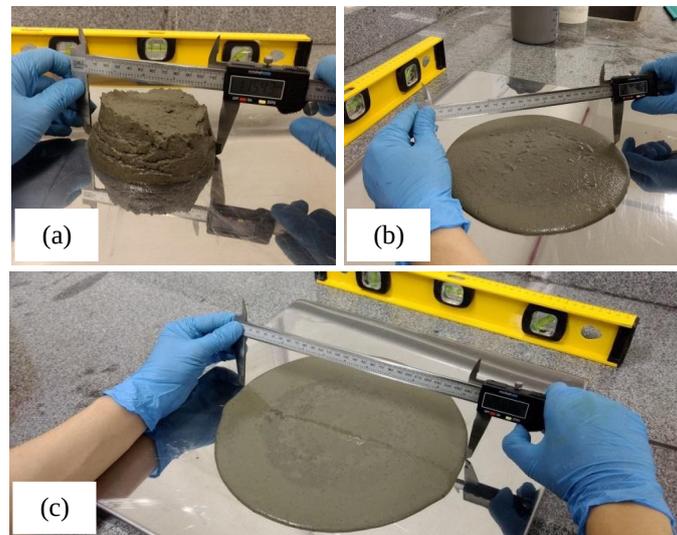
Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Pelos resultados extraídos da Figura 5, destacam-se os teores ótimos de (a) 0,8% para  $a/c=0,47$ , (b) 0,4% para  $a/c=0,51$  e (c) 0,3% para  $a/c=0,56$ , todos com incrementos de tempo inferiores a 1 segundo, conforme preconiza a ABNT NBR 7681-2 (2013).

### ***Fase Argamassa***

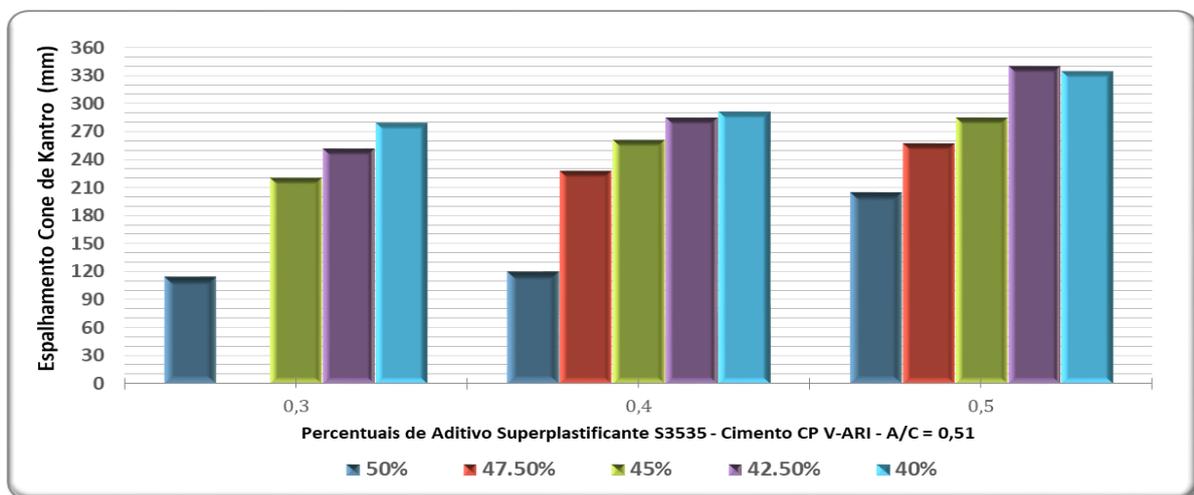
Para a fase Argamassa o ensaio de abatimento de Kantro foi adotado, conforme propõe Gomes (2002), com percentuais ótimos para o agregado miúdo atingidos com espalhamento ideal de  $180 \pm 10 \text{ mm}$ . A Figura 6 sintetiza diferentes espalhamentos obtidos nos ensaios e a Figura 7 ilustra os resultados para  $a/c=0,51$ , com variação percentual entre 40% e 50%.

Figura 6 - Resultados para obtenção do percentual de agregado miúdo na argamassa: (a) elevado teor de areia; (b) argamassa com leve indício de segregação; e (c) argamassa com teor ideal



Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Figura 7 – Síntese dos resultados para a relação  $a/c=0,51$ , com variação dos percentuais de agregado miúdo na argamassa em 50 %, 47,5 %, 45 %, 42,5 % e 40 %



Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Para as 03 (três) relações  $a/c$  obtêm-se, respectivamente, os teores ótimos de agregado miúdo e aditivo: 45 % e 0,55 % ( $a/c=0,47$ ); 45 % e 0,40 % ( $a/c=0,51$ ); 45 % e 0,35 % ( $a/c=0,56$ ). Os percentuais de agregado são obtidos sobre o total da argamassa, enquanto que o aditivo sobre a massa total de finos são todos para um espalhamento ideal de  $180 \pm 10 \text{ mm}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Resultados Fase Concreto

Os resultados são abordados para as três relações  $a/c$  para os estados fresco e endurecido do CAA aqui pesquisado. Na Tabela 3 são agrupados os parâmetros encontrados no estado fresco com uso do cimento CP V-ARI e três relações  $a/c$ .

Tabela 3 - Síntese dos parâmetros do CAA para o estado fresco

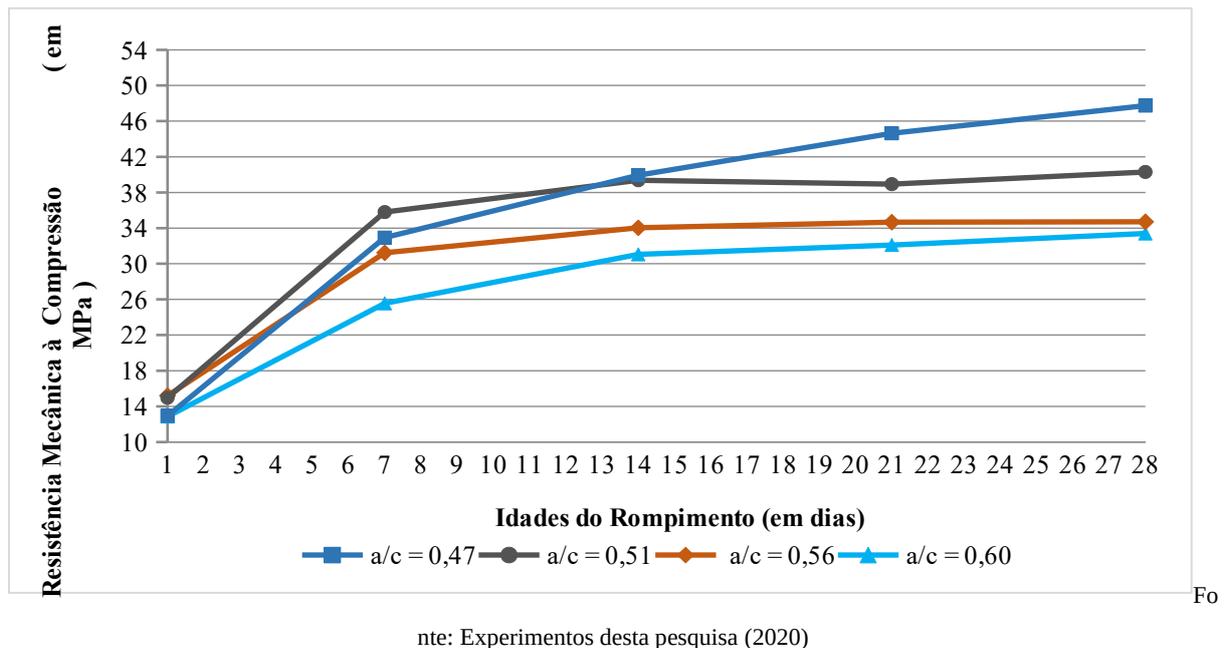
Ensaio	Funil-V	Espalhamento	Anel-J	Caixa-L	Tubo U
Relação $a/c$	Escoamento (T- 30seg)	Ø Abertura (milímetros)	Ø Abertura (milímetros)	Relação H1 e H2	Relação P1, P2 e P3
0,47	2' 53"	695	685	0,99	*
0,51	2' 37"	675	665	0,99	1,09 e 1,12
0,56	2' 13"	678	675	0,99	*

\* Não foram obtidos parâmetros mínimos para validação do ensaio, conforme ABNT NBR 15823 (2017).

Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Tais resultados buscam classificar o CAA quanto à fluidez, escoamento e habilidade passante, compondo os requisitos de aceitação do concreto no estado fresco e adequação dos 3 (três) traços aqui pesquisados. Na Figura 8 estão agrupados os resultados da resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) para os CAAs e CCV no estado endurecido.

Figura 8 - Resultados para as resistências mecânicas à compressão dos CAAs e CCV estudados



Os resultados do concreto no estado endurecido são adotados na determinação da resistência mecânica à compressão média para os diferentes traços estudados, a fim de comparar suas viabilidades técnica e econômica frente a um CCV de referência, visando à empregabilidade em indústrias de pré-fabricados. Logo, os traços dos CAAs estão na Tabela 4 para  $a/c=0,47$ , com  $f_{cm} \approx 48 \text{ MPa}$ ;  $a/c=0,51$  com  $f_{cm} \approx 40 \text{ MPa}$ ; e  $a/c=0,56$  com  $f_{cm} \approx 35 \text{ MPa}$ . Já o CCV é detalhado na Tabela 5 para  $a/c=0,60$  com  $f_{cm} \approx 33 \text{ MPa}$ .

Tabela 4 - Detalhamento dos traços adotados para os CAAs para um volume de  $1 \text{ m}^3$  de concreto.

$a/c$	Brita (%)	Areia (%)	Aditivo (%)	Cimento (kg)	Água (kg)	Água corrigida (kg) *	Areia (kg)	Brita (kg)	Aditivo (kg)
0,47	32,5	45,0	0,55	462,77	217,50	232,13	805,85	958,75	2,545
0,51	32,5	45,0	0,40	440,80	224,81	239,43	805,85	958,75	1,763
0,56	32,5	45,0	0,35	416,09	233,01	247,64	805,85	958,75	1,456

\* A água corrigida é calculada em função dos teores de umidade dos agregados.

Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Tabela 5 - Detalhamento do traço para o CCV ( $f_{cm} \approx 30 \text{ MPa}$ ;  $a/c = 0,60$ ) com volume de  $1 \text{ m}^3$  de concreto.

$a/c$	Brita (%)	Areia (%)	Aditivo (%)	Cimento (kg)	Água (kg)	Água corrigida (kg)*	Areia (kg)	Brita (kg)	Aditivo (g)
0,60	50,0	45,0	0,10	294,99	177,00	197,32	596,93	1475,00	294,99

\* A água corrigida é calculada em função dos teores de umidade dos agregados.

Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Da Tabela 5 destaca-se que o CCV de referência é adotado por empresa parceira que visa à otimização de seus traços para uso em elementos pré-fabricados em concreto. Deste modo, os CAAs aqui pesquisados passam por testes de implantação comercial na empresa, tendo em vista os ganhos obtidos frente ao CCV de referência.

### Estimativa de custos

A estimativa de custos dos CAAs foi pautada em levantamento de preços para região que engloba o município de São Carlos-SC, sem a aplicação de Despesas e Bonificações Indiretas (BDI). Na Tabela 6 têm-se as 03 (três) relações  $a/c$  com uso do cimento CP V-ARI, sendo que os custos do CCV de referência ( $f_{cm} \approx 33 \text{ MPa}$ ) também foram estimados, de modo análogo aos CAAs, para fins de correlação entre os traços.

Tabela 6 - Comparativo de custos entre o CCV de referência e os CAAs

Etapas	Custo CCV (R\$/m <sup>3</sup> ) ( $\approx 33 \text{ MPa}$ )	Custo CAA (R\$/m <sup>3</sup> )		
		$a/c = 0,56$ ( $\approx 35 \text{ MPa}$ )	$a/c = 0,51$ ( $\approx 40 \text{ MPa}$ )	$a/c = 0,47$ ( $\approx 48 \text{ MPa}$ )
Composição do Concreto	300,26	312,99	328,05	347,34
Mistura do Concreto	3,43	3,43	3,43	3,43
Transporte/Lançamento	15,49	15,49	15,49	15,49
Aplicação do Desmoldante	10,66	10,66	10,66	10,66
Adensamento	26,70	5,34	5,34	5,34
Acabamento/Reparos	21,58	1,41	1,41	1,41
Custo Total (Sem BDI)*	378,12	349,32	364,38	383,67
Custo em relação ao CCV (%)	-	-7,6%	-3,6%	+1,5%

\* Custos levantados com base no preço de mercado na região que engloba o estudo.

Fonte: Experimentos desta pesquisa (2020)

Os resultados da Tabela 6 demonstram que o CAA com maior relação ( $a/c=0,56$ ) proporciona um concreto 7,6% mais barato do que o CCV de referência, com uma resistência mecânica de aproximadamente  $f_{cm} \approx 35 \text{ MPa}$ , frente à  $f_{cm} \approx 33 \text{ MPa}$  do CCV.

Como comparativo, Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2015) demonstraram que traços entre 1:3 e 1:4,5 (Cimento:Agregados) geram custo menor por MPa de CAA. Os resultados aqui obtidos comprovam que os CAAs com relações  $a/c = 0,56$  (traço 1:4,2 em massa) e  $a/c = 0,51$  (traço 1:4 em massa) geraram,

respectivamente, concretos com um custo 7,6% e 3,6% menor que o CCV. Por outro lado, o CAA com  $a/c = 0,47$  (traço 1:3,8 em massa) tem custo superior de apenas 1,5%, mas entrega uma resistência de  $f_{cm} \approx 48 \text{ MPa}$  ante  $f_{cm} \approx 33 \text{ MPa}$  do CCV de referência. Por fim, Geyer (2005) *apud* Tutikian e Dal Molin (2015) corroboram para confirmar as vantagens na composição de custos do CAA frente ao CCV, pois mostram que mesmo com custo inicial mais elevado de insumos, os CAAs com resistências entre 20 e 40 MPa possui ganhos no longo prazo dada redução de custos pagos à mão de obra.

## CONCLUSÃO

Nos ensaios de controle no estado fresco foram obtidos CAAs com elevada fluidez e sem indício de segregação e/ou exsudação. No estado endurecido, foram atingidas resistências de aproximadamente 48 MPa, 40 MPa e 35 MPa aos 28 dias, respectivamente, para as relações  $a/c$  iguais a 0,47, 0,51 e 0,56, de modo a gerar uma gama de CAAs com ampla faixa de resistências (35 a 50 MPa) e flexibilizar as diferentes aplicações dentro de indústrias de pré-fabricados com foco em uma relação custo-benefício otimizada.

Destaca-se a obtenção de um concreto com  $f_{cm} \approx 47 \text{ MPa}$ , com custo de 1,5% maior frente ao CCV com resistência de 33 MPa. Tal resultado é muito satisfatório, visto que o aumento da resistência à compressão média foi da ordem de 70% a um custo praticamente insignificante em relação ao CCV de referência, o que representa uma otimização no dimensionamento estrutural, com redução significativa das seções transversais de elementos em concreto armado, proporcionado pelo uso de um CAA de maior resistência mecânica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Santa Catarina (FAPESC) pelo auxílio financeiro. Os agradecimentos se estendem às empresas fornecedoras dos materiais adotados nos ensaios: Votorantim Cimentos, Sika Brasil e CIMEC Pré-fabricados.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-2**: Concreto autoadensável. Parte 2 – Determinação do Espalhamento e do Tempo de Escoamento – Método do Cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-3**: Concreto autoadensável. Parte 3 – Determinação da Habilidade Passante – Método do Anel J. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-4**: Concreto autoadensável. Parte 4 – Determinação da Habilidade Passante – Método da Caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-5**: Concreto autoadensável. Parte 5 – Determinação da Viscosidade – Método do Funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7681-2**: Calda de Cimento para Injeção Parte 2: Determinação do Índice de Fluidez e da Vida Útil - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

BACHENDORF, V. L.; FACCIN, C. L.; SOUZA, S. A. S.; SIEG, A. P. A.; WOLENSKI, A. R. V. Avaliação da Compatibilidade Cimento/Aditivo a partir do Ensaio de Cone de Marsh visando a Elaboração de Concretos Auto-Adensáveis. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

COPPOLA, L. Self-Compacting Concrete, Il Calcestruzzo Autocompattante. Proprietà ed Applicazioni. *In*: Convegno I calcestruzzi autocompattanti, 2000, Bolonha, Itália, **Anais** [...]. Bolonha: SAIE, 2000.

FACCIN, C. L.; BACHENDORF, V. L.; SIEG, A. P. A.; PRADELLA, M.; WOLENSKI, A. R. V. Análise do Comportamento de Pastas de Cimento com Adição de Metacaulim para uso em Concretos Auto-Adensáveis. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

GEYER, A. L. B. Utilização de Concreto Auto-Adensável em Estruturas de Edifícios com Custos Inferiores ao Concreto Convencional. *In*: **12º Concurso Falcão Bauer de Inovação Tecnológica**, CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC), 2005. Disponível em: <http://cbic.org.br>. Acesso em: 12 set. 2021.

GOMES, P. C. C. Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

MELO, K. A. Consideração à Dosagem de Concreto Auto-Adensável com Adição de Fíler Calcário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2005.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável**: tecnologia e propriedades. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil), Universidade do Porto, 198 p., 2001.

OKAMURA, H. Self-Compacting High Performance Concrete. *In*: **Concrete International, ACI**, v. 19. n. 7, p. 50-54, 1997.

SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Avaliação do cimento Portland RS frente ao ataque por sulfato de sódio e magnésio: uma análise física e comparativa em argamassas. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo, v. 11, p. 1053-1075, 2018.

TUTIKIAN, B. F. **Métodos para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 2ª Ed, São Paulo: PINI, 2015.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Boletim de Ensaios de Cimento** – Ficha Técnica do Fabricante. Disponível em: <http://www.votorantimcimentos.com.br>. Acesso em: 05 dez. 2020.

WOLENSKI, A. R. V. **Estudos Teórico e Experimental do Concreto Auto-adensável frente ao emprego do Cimento CP IV e da Adição Mineral de Metacaulim**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Sinop, 2010.