

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

Miquéias Cruz de Sousa (Aluno / UNASP) E-mail: miqueias_eng@hotmail.com

Lucas da Silva Barboza (Professor Doutor/UNASP) E-mail: lucas.barboza@unasp.edu.br

Artur Lenz Sartorti (Professor Doutor/UNASP) E-mail: artur.sartorti@unasp.edu.br

Resumo: A consolidação do concreto como segundo material mais consumido no mundo tem instigado a busca de soluções para reduzir o consumo de clínquer e as emissões de CO₂. Visando o fornecimento de uma contribuição para a sustentabilidade ambiental e da indústria de cimento, esta pesquisa busca analisar a viabilidade econômica do concreto autoadensável (CAA) com baixo consumo de cimento. Neste contexto, foi realizado um estudo da otimização do esqueleto granular e da composição da pasta, sendo aferido reduções de até 25% do consumo de cimento em relação ao CAA de referência. No que tange aos índices de consumo relativo de cimento e de custo unitário por MPa desenvolvido em 1 m³ de concreto, foi verificado que os CAAs com baixo consumo de cimento apresentaram reduções de até 25,73% e 17,72%, respectivamente, ao ser comparado com o CAA de referência. A maior efetividade na redução do índice de consumo relativo a resistência mecânica à compressão do que no consumo de cimento por m³ de concreto observado, se deve a constatação de maiores patamares de resistência mecânica à compressão para a composição com menor volume de pasta e de maior proximidade ao índice ótimo de vazios encontrado na etapa do empacotamento de agregados. Tal resultado, demonstra indícios de que mesmo nas circunstâncias de dosagens com volume de pasta inferiores, a resistência mecânica à compressão pode ser aumentada, comprovando desta maneira a superioridade técnica e financeira do CAA com baixo consumo de cimento em relação as dosagens convencionais de CAA, além dos ganhos em sustentabilidade obtidos pela redução do consumo de clínquer e das emissões de CO₂ inerentes a menor quantidade de massa de cimento por m³ de concreto.

Palavras-chave: Consumo de cimento. Concreto autoadensável. Sustentabilidade. Dióxido de carbono. Resistência.

STUDY OF THE ECONOMIC VIABILITY OF THE SELF-COMPACTING CONCRETE WITH LOW CONSUMPTION OF CEMENT

Abstract: The consolidation of concrete as the second most consumed material in the world has instigated the search for solutions to reduce clinker consumption and CO₂ emissions. Aiming at providing a contribution to environmental sustainability and the cement industry, this research seeks to analyze the economic viability of self-compacting concrete (SCC) with low cement consumption. In this context, a study of the optimization of the granular skeleton and the composition of the pulp was carried out, and reductions of up to 25% of the cement consumption were measured in relation to the reference SCC. Regarding the relative cement consumption and unit cost indexes per MPa developed in 1 m³ of concrete, it was verified that the low cement consumption SCCs showed reductions of up to 25,73% and 17,72%, respectively, be compared with the reference SCC. The greater effectiveness in the reduction of the index of consumption relative to the mechanical resistance to compression than in the consumption of cement per m³ of concrete observed, is due to the finding of higher levels of mechanical resistance to compression for the composition with smaller pulp volume and higher proximity to the optimum void index found in the aggregate packaging step. This result demonstrates that even in dosage circumstances with lower pulp volume the mechanical compressive strength can be increased, thus demonstrating the technical and financial superiority of the SCC with low cement consumption over conventional SCC dosages, in addition to the sustainability gains obtained by the reduction of the clinker consumption and the CO₂ emissions inherent to the lower amount of cement mass per m³ of concrete.

Keywords: . Cement consumption, Self-compacting concrete, Sustainability, Carbon dioxide, Resistance.

1. Introdução

O concreto autoadensável surge sobre a premissa de ter como atributo principal o preenchimento das fôrmas por ação exclusiva da gravidade, implicando em elevada capacidade de espalhamento, habilidade passante e estabilidade da mistura, preservando simultaneamente as suas propriedades no estado endurecido. O conjunto de tais características, assegura ao material a inibição dos fenômenos da exsudação e da segregação dos seus componentes, impedindo o surgimento de falhas de concretagem e vazios. Tais aspectos conjuntos do CAA em seu estado fresco, é o que o difere de um concreto meramente fluido, o qual é constituído de apenas um elevado abatimento, sendo destituído de quesitos quanto a estabilidade da mistura (BARBOZA, 2016; CORBIOLI, 2016; GOMES; BARROS, 2009; MELO, 2005; REPETTE, 2011; TUTIKIAN, 2004).

Como vantagens para a utilização do CAA, citam-se a eliminação da etapa de adensamento; drástica redução da mão de obra (em até mais de 80%) (REPETTE, 2011); redução do custo com equipamentos; melhor qualidade no acabamento das estruturas; a eliminação do retrabalho por falhas de concretagem; e a redução do tempo de concretagem e do respectivo ruído produzido (BARBOZA, 2016; GOMES; BARROS, 2009; MELO, 2005; REPETTE, 2011; TUTIKIAN, 2004).

Embora o CAA disponha de supremacia técnica indiscutível em relação ao concreto convencional, um dos maiores fatores limitantes para a sua aplicação em larga escala é o seu preço mais elevado, em função do maior dispêndio associado a implementação “volumosa de aditivos” para obter as propriedades fundamentais do CAA (habilidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência a segregação) (ALCOFORADO, 2013; BARBOZA, 2016; PEREIRA, 2010; REBMANN, 2011; REPETTE, 2011; TUTIKIAN, 2004).

Todavia, mesmo que seja fundamentado o preço do CAA como o principal viés para sua maior difusão, tal princípio é refutado ao averiguar o comportamento do custo do CAA por m³ de concreto em virtude de sua resistência. De fato, maiores diferenciais percentuais do preço por metro cúbico do CAA em relação ao concreto convencional, são perceptíveis para menores resistências mecânicas, onde o custo com aditivos é de mais elevada preponderância em relação aos demais insumos intrínsecos a concretagem. Entretanto, para maiores patamares de resistência do concreto, a tendência é de que a diferença de custos do CAA e do concreto convencional diminuam, podendo em certas circunstâncias, haver menor custo para o CAA, conforme foi demonstrado no trabalho de Tutikian (2004) e Alcoforado (2013) (REBMANN, 2011).

Tendo em vista que o uso de aditivos no CAA é influente para o aumento do seu custo, medidas que visem reprimir a quantidade necessária de aditivo para que sejam mantidas as propriedades de fluidez e coesão do CAA, são primordiais para a gênese de um preço de maior competitividade (ALCOFORADO, 2013; REBMANN, 2011; TUTIKIAN, 2004). Ao investigar o método proposto por Gomes (2002) para a dosagem de CAA, é notável que o elemento chave para sua redução de custo é a elaboração de dosagens com baixo consumo de cimento, visto que a composição da pasta é dimensionada a partir da quantidade desse material.

Portanto, ao associar o comportamento do custo por metro quadrado do CAA em função da resistência e o método de dosagem proposto por Gomes (2002), é evidente a relevância do estudo de dosagens de CAA que visem o menor consumo de cimento, tendo por referência os mínimos normativos da NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual declara consumos mínimos de 260 kg/m³ à 360kg/m³ de cimento, objetivando dessa

forma obter a redução dos custos.

Em virtude do crescente consumo de concreto por todo o mundo, além dos benefícios econômicos de dosagens com o menor consumo de cimento, é verificável consequente redução de emissão de dióxido de carbono (CO₂) e da demanda de cimento por metro cúbico de concreto, o que promove a sustentabilidade ambiental e da indústria do concreto, respectivamente (BARBOZA, 2016; MELO, 2005; METHA, 2002; REBMANN, 2011; REBMANN, 2016; SOUZA *et al.*, 2015; WBCSD, 2009).

Os percalços intrínsecos a ausência de padronização da dosagem e o desafio de manter as propriedades fundamentais de fluidez e coesão da mistura com menor demanda de aglomerantes, permeiam a complexidade da obtenção de uma dosagem de concreto autoadensável com baixo consumo de cimento (CAABCC). Todavia, a disseminação do CAA depende da repressão do seu viés econômico, e a partir dessa premissa e de seus consequentes ganhos na sustentabilidade ambiental, é embasado o propósito deste trabalho, o qual é sintetizado justamente pelo estudo do desempenho do CAA pelo método de dosagem de Gomes (2002), ao averiguar o desempenho da resistência mecânica à compressão do concreto para consumo de cimento diversificados, delimitando o intervalo de análise do consumo de cimento a partir do limite mínimo imposto pela NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). Por intermédio do cálculo de índices de consumo que relacionem o consumo de cimento equivalente para o desenvolvimento da resistência mecânica á compressão do concreto, será medida a efetividade de cada dosagem elaborada, tendo por referência um CAA dosado conforme os padrões convencionais de consumo de cimento difundidos na literatura técnica, de modo a possibilitar a quantificação do verdadeiro ganho de performance do CAABCC produzido (BARBOZA, 2016; PEREIRA, 2010; REBMANN, 2011; REBMANN, 2016).

1.1 Indicadores de baixo consumo de cimento

Para o estudo de composições de CAABCC no contexto da viabilidade econômica, a restrição da análise de desempenho em função do consumo de cimento por m³ de concreto, é insuficiente para conceber uma interpretação adequada de desempenho técnico e econômico. Desta forma, é assertiva a consideração da equação 1 para a verificação da performance do concreto gerado, a qual é retratada como índice de consumo (Cr), por intermédio dos parâmetros de consumo de cimento (C) e um termo (p) de indicativo de desempenho do concreto desenvolvido (REBMANN, 2011).

$$C_r = \frac{C}{p} \quad (01)$$

Em termos gerais para a aplicabilidade do termo p da equação 1, é de praxe a adoção da resistência à compressão como critério para aferição da qualidade do concreto produzido no estado endurecido, visto que tal propriedade é intrínseca a efetividade do concreto em termos de desempenho estrutural, sendo esta corriqueiramente expressa em kg/(m³·MPa). Alternativamente, o uso do consumo de aglomerantes ao invés do dispêndio exclusivo de cimento, também pode ser utilizado para a concepção de um Cr (BARBOZA, 2016; REBMANN, 2011).

No âmbito ambiental, é mais assertiva a verificação do parâmetro Cr por substituição do consumo de cimento pela quantidade de clínquer, além da estimativa da emissão de CO₂ por quilo de clínquer produzido. A partir da caracterização da quantidade de CO₂ emitido por MPa desenvolvido em cada m³ de concreto, é que se fundamenta a verificação do viés da sustentabilidade (BARBOZA, 2016; REBMANN, 2011).

Logo, ao aplicar a equação 1 na quantificação dos custos dos materiais constituintes do concreto por m³ produzido, constitui-se uma importante ferramenta para a investigação econômica entre diversas composições de dosagens de concreto, sendo estas aferidas a partir do parâmetro de referência da resistência à compressão do concreto, e dadas em R\$/(m³·MPa).

2. Metodologia de pesquisa e procedimento experimental

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Estruturas e Materiais do Centro Universitário Adventista de São Paulo, sendo constituídos pelo estudo do empacotamento dos agregados, os ensaios de caracterização da pasta (Funil Marsh e ensaio de Kantro), os ensaios de verificação das propriedades do CAA no estado fresco (Funil-V, Caixa-L e *slump-flow test*) e os ensaios de resistência à compressão dos concretos produzidos para diversos índices de consumo de cimento, empregando o CP II Z 32 da marca Votorantim como o material padronizado para todos os ensaios, sob um ambiente com classe de agressividade ambiental II (consumo mínimo de cimento de 280 kg/m³ e 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias) (ABNT NBR 6118: 2014).

Na etapa final da pesquisa, há um confronto das propriedades do CAABCC com o do CAA de referência, tendo por guia resultados decorrentes da literatura técnica sobre o assunto, indicando dessa forma a melhor dosagem através da consideração da viabilidade técnica, econômica e ambiental por intermédio de índices de consumo que relacionem o consumo de cimento equivalente para o desenvolvimento da resistência mecânica à compressão.

2.1 Materiais utilizados

Em virtude da elevada sensibilidade reológica do CAA, a correta designação dos materiais proporciona impactos significativos na redução do consumo de cimento. Embora materiais que possuam aspectos técnicos diferenciados sejam os mais propícios para a produção de concretos com melhor desempenho, este trabalho tem por objetivo de propor uma dosagem de CAA com materiais acessíveis e de viabilidade econômica. Tendo em vista as diretrizes citadas quanto à escolha dos materiais, denota-se na Tabela 1 as especificações técnicas dos materiais utilizados na pesquisa, os quais são inerentes ao mercado da região metropolitana de Campinas – SP.

Tabela 1 - Especificações técnicas dos materiais empregados na dosagem do CAA

Cimento CII-Z-32			
Fabricante	Superfície Blaine	Resistência à compressão aos 28 dias	Teor de clínquer
Votorantim	4595 m ² /kg	37,9 MPa	95%
Sílica Ativa			
Fabricante	Massa específica	Superfície Específica	Teor de SiO ₂
Tecnosil	2,22 g/cm ³	19000 m ² /kg	> 90%
Fíler Calcário			
Fabricante	Coloração	Diâmetro médio	Densidade aparente
Brasil Minas	Branca	45 µm	1,0 a 1,2 g/cm ³
Superplastificante			
Fabricante	Densidade média	pH	Dosagem recomendada em % da massa de cimento
Grace	1,056 g/cm ³	4,3 á 25°C	0,15% a 0,8%
Agregado Miúdo			
DMC	Módulo de	Classificação	Índice de vazios

	finura		
0,3 mm	0,82	Muito fina	41,43 %
Massa específica seca		Massa unitária no estado solto	Massa unitária compactada seca
2,467 g/cm ³		1,440 g/cm ³	1,585 g/cm ³
Agregado Graúdo			
DMC	Módulo de finura	Classificação d/D	Índice de vazios
9,5	5,84	4,75/12,5	48,65
Massa específica seca		Massa unitária no estado solto	Massa unitária compactada seca
2,887 g/cm ³		1,477 g/cm ³	1,562 g/cm ³

Fonte: Autor (2019); Brasil Minas (2019); Grace (2019); TECNOSIL (2019); Votorantim (2019).

2.2 Dosagem da pasta do CAA

O método de dosagem adotado se permeia no método de Gomes (2002), a qual separa as etapas de otimização do esqueleto granular e da pasta (constituída de cimento, sílica ativa, fíler, água e superplastificante), para posterior composição da dosagem a partir do estudo do volume de pasta (BARBOZA, 2016; GOMES; BARROS, 2009).

Quanto aos parâmetros imprescindíveis para a determinação da composição da pasta, estes são: A/C (água/cimento), SA/C (sílica ativa/cimento), SP/C (superplastificante/cimento) e F/C (fíler/cimento). Para a relação A/C, pesquisas apontam que uma relação de 0,4 é ideal para a dosagem do CAA no estado fresco, podendo este valor ser reduzido caso não tenha sido alcançada a resistência solicitada; já para SA/C, é de senso comum entre os pesquisadores a sua fixação em 0,1. Portanto, tais relações foram adotadas no CAA dosado por esta pesquisa. (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOZA, 2016).

Posteriormente a padronização dos parâmetros A/C e SA/C, utiliza-se o ensaio de cone Marsh para a verificação do teor ótimo de aditivo superplastificante, o qual deve ser analisado para diversos teores de adição de fíler por intermédio do ensaio de miniabatimento. Por conseguinte, a pasta há de ser considerada como adequada para os ensaios do CAA no estado fresco apenas para as relações F/C com ótimo teor de SP/C que cumprirem todos os crivos pertinentes ao ensaio do miniabatimento (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOZA, 2016; GOMES; BARROS, 2009; TUTIKIAN, 2004).

A otimização empregada nas etapas predecessoras aos ensaios de verificação do volume de pasta, tem por intuito de utilizar o índice de vazios mínimo como referência do limite inferior para o intervalo de volume de pasta estudado sob os respaldos técnicos de otimização dos parâmetros da pasta. A confirmação da dosagem do CAA a ser utilizada, tem por referência a verificação dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido do CAA (BARBOZA, 2016; GOMES; BARROS, 2009).

2.3 Ensaios preliminares

Para a definição das dosagens de CAA desenvolvidas por esta pesquisa, foi necessário a otimização dos materiais por intermédio dos ensaios de empacotamento dos agregados, avaliação do teor de superplastificante e de fíler calcário.

2.3.1 Empacotamento dos agregados

Para a obtenção do esqueleto granular com o mínimo teor de vazios e máxima massa unitária, empregou-se o procedimento descrito por Rebmann (2011), o qual é embasado na norma NM 45 (ABNT, 2006), considerando os materiais em estado solto (método C

da referida norma), em virtude da ausência do processo de adensamento no CAA (ABNT, 2006; GOMES; BARROS, 2009).

Em síntese, o procedimento do empacotamento de agregados proposto por Rebmann (2011) consiste na composição plena do esqueleto granular por agregados graúdos, cuja proporção é reduzida em até 50% e complementada com agregado miúdo. Posteriormente, reinicia-se o processo com a disposição de 100% de agregado miúdo até 50% do seu valor em massa, substituindo gradualmente por agregado graúdo.

A finalização do ensaio, decorre com a realização do referido ensaio por três vezes, implicando em um resultado inerente a média das três medidas obtidas de massa unitária no estado solto, e conseqüentemente, do índice de vazios calculado. Desta forma, concebe-se sob estes critérios a Figura 1, a qual indica a curva discretizada da massa unitária no estado solto e do índice de vazios.

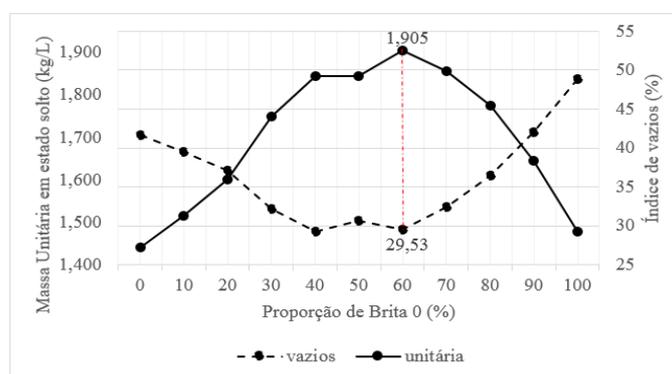


Figura 1 - Curvas da massa unitária no estado solto e do índice de vazios em função da composição dos agregados graúdo e miúdo

Em relação aos resultados aferidos na Figura 1, há dois pontos críticos para análise da relação ótima de agregados graúdos e miúdos: a composição de 40% de brita 0 a qual apresenta o menor índice de vazios) e a amostra com 60% de brita 0 (a qual possui a maior massa unitária e o segundo menor índice de vazios). Em virtude da composição ótima do esqueleto granular ter que atender os critérios de maior massa unitária e menor índice de vazios, e de que o volume de pasta para essa pesquisa ser parametrizado em números inteiros, para ambos os casos o volume de pasta inicial seria de 29% ou 30%.

2.3.2 Avaliação do teor de superplastificante e de fíler calcário

O procedimento para a determinação do teor ótimo de superplastificante é embasado na execução do ensaio do cone de Marsh (para a obtenção do tempo de escoamento) e miniabatimento (para a verificação do abatimento), o qual de acordo com ALMEIDA FILHO (2006), apresenta a seguinte sequência de mistura dos materiais: mistura por 30 segundos em velocidade baixa do cimento e da sílica ativa; após 60 segundos de repouso, 60 segundos de mistura sob velocidade baixa de 2/3 de água e 2/3 de superplastificante; e por fim, ao acrescentar o fíler e o restante do superplastificante e água, mistura-se por 60 segundos em velocidade baixa e em sequência, mais 120 segundos de mistura em velocidade alta.

Como critérios para o estudo do teor ótimo de aditivo superplastificante, foi considerado pastas com a relação F/C de 10%, 20%, 30% e 40% e proporções de SA/C e A/C fixas em 10% e 40%, respectivamente; fixação das condições de temperatura e umidade relativa do ar em $24 \pm 2^\circ\text{C}$ e $70 \pm 10\%$, respectivamente, em virtude da elevada sensibilidade reológica da pasta para a análise preliminar das propriedades intrínsecas a

um CAA; e uma duração de 1 hora do ensaio, em função da sua compatibilidade com a aplicação do concreto na obra, estratificando-se as leituras para 10, 30, 40 e 60 minutos (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOZA, 2016).

Para que o ensaio fosse validado, cada teor de superplastificante foi obtido realizando o mesmo ensaio três vezes e admitindo um coeficiente de variação máximo de 5%, garantindo desta maneira maior confiabilidade quanto aos resultados. Após todas as considerações preliminares, os resultados obtidos nos ensaios geraram as seguintes conclusões:

- Considerando uma relação fixa de SP/C, observou-se que em maiores relações de F/C houve o aumento do tempo de escoamento da pasta no Funil Marsh. Tal fato, está relacionado com a propriedade do fíler calcário em acelerar as reações de hidratação do cimento, fazendo com que para a manutenção da fluidez seja necessária uma maior demanda de aditivo para uma quantidade de água constante. Outro aspecto preponderante, trata-se do incremento da proporção do volume de sólidos em relação ao volume de líquidos em função da menor massa específica do fíler calcário ao comparar com o cimento, gerando dessa maneira incrementos do volume e a concepção de uma pasta com maior plasticidade e coesão. Todavia, nas circunstâncias em que as proporções SP/C e A/C são mantidas, o aumento das relações F/C causou perdas de fluidez na mistura (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOZA, 2016; PEREIRA, 2010; REPETTE, 2011);
- O aumento das relações F/C gerou maior exigência quanto a quantidade mínima de teor SP/C para que a pasta consiga fluir no funil Marsh. Tal acontecimento, se deve a uma limitação do ensaio do funil Marsh, o qual para pastas com alto teor de finos, a aglomeração de cimento com finos proporciona uma obstrução do escoamento da pasta, fazendo com que haja uma má interpretação da sua fluidez. Devido a esses fatores, houve casos de entupimento do funil Marsh devido ao aumento progressivo da relação F/C (BARBOZA, 2016; MELO, 2005; MOLIN, 2011; PEREIRA, 2010).

Para essa pesquisa, há de ser considerado um tempo de leitura de 10 minutos após a mistura do cimento para a determinação do teor ótimo de superplastificante, o qual ao utilizar o software Origin, encontrou-se os teores ótimos de superplastificantes de: 1,256% para FC/C = 0,1; 1,592% para FC/C = 0,2; 1,494% para FC/C = 0,3; e por fim 2,006% para FC/C = 0,4 (ALMEIDA FILHO, 2006; BARBOZA, 2016; GOMES; BARROS, 2009).

Consecutivamente ao ensaio do funil Marsh, executa-se o ensaio de miniabatimento para a constatação se a mistura apresenta adequados parâmetros de coesão. O ensaio do miniabatimento, foi realizado para o tempo de 10 minutos após o início da mistura e para as relações F/C de 10%, 20%, 30% e 40%, onde em todos os casos citados, não houve a segregação da mistura e o espalhamento da pasta ocorreu de forma homogênea e circular.

Dentre as restrições inerentes ao ensaio do miniabatimento (espalhamento no intervalo (180 ± 10) mm; e T115 no intervalo (3 ± 1) s), somente os seguintes elementos atenderam a ambos os critérios: F/C = 10% e SP/C = 1,20%; F/C = 10% e SP/C = 1,60%; F/C = 30% e SP/C = 1,20%; e F/C = 40% e SP/C = 2,00%.

Tendo em vista que o principal objetivo da pesquisa é a produção de um CAA com o mínimo consumo de cimento possível, adotou-se o caso denotado por A/C = 0,4, SA/C

= 0,1, FC/C = 0,40 para uma relação SP/C = 2,00%, visto que a quantidade em massa do filer calcário é contabilizada como em substituição a massa de cimento equivalente.

Da mesma forma que foi verificado no ensaio do cone de Marsh, no ensaio do miniabatimento as dosagens com maiores proporções de FC/C tiveram perda de trabalhabilidade, a qual é traduzida numericamente ao verificar a redução do espalhamento da pasta e do incremento do tempo necessário para a estabilização do seu espalhamento com o aumento das proporções de F/C na mistura.

No que tange a dosagem adotada para o aditivo de 2,00%, embora o fabricante recomende dosagens no intervalo de 0,15% a 0,8% da massa de cimento (GRACE, 2017), para a produção de CAA com baixo consumo de cimento é imprescindível o uso de maiores dosagens de aditivo superplastificante, visto que a redução do consumo de cimento só é viável ao substituí-lo por materiais finos, os quais necessariamente demandam maior consumo de aditivos para um consumo de água constante. As desvantagens econômicas quanto ao elevado custo dos aditivos superplastificantes, são diluídas ao considerar que a redução do consumo de cimento minora a necessidade de aditivos por m³ de concreto. (BARBOZA, 2016; REPETTE, 2011).

2.4 Ensaio no estado fresco

A realização dos procedimentos de ensaio para a aferição das propriedades do CAA no concreto fresco, foram desenvolvidas por meio de uma única betoneira com capacidade de 400 litros, tendo a ordem de mistura padronizada em todas as dosagens.

O procedimento de mistura para os concretos com baixo consumo de cimento segue a recomendação de Almeida Filho (2006), a qual apresenta a seguinte ordem: mistura de 100% do agregado graúdo mais 75% da água total de amassamento (contabilizando também a água necessária para a saturação dos agregados) por 30 segundos (1^a etapa); acréscimo na mistura de 100% de cimento, sílica ativa, pó de calcário e superplastificante, e dos 25% de água restante, misturando-os por 120 segundos (2^a etapa); e por fim, a adição do agregado miúdo, misturando-o por 120 segundos. Desse modo, o tempo total da mistura foi de 4,5 minutos, de forma que a homogeneização dos materiais na betoneira foi garantida.

Para a verificação das habilidades de preenchimento, de passagem e resistência a segregação do CAA, empregou-se os seguintes ensaios do concreto no estado fresco: ensaio de funil-V (*V-funnel test* – Figura 2(a)), ensaio da caixa-L (*L-box test* – Figura 2(b)) e ensaio de espalhamento (*slump flow test* – Figura 2(c)) e. Os procedimentos de ensaio e as especificações técnicas dos equipamentos seguem as prescrições normativas da NBR 15823 (ABNT, 2017), sendo examinado por inspeção visual os aspectos de homogeneidade, teor de argamassa, segregação e exsudação da mistura.

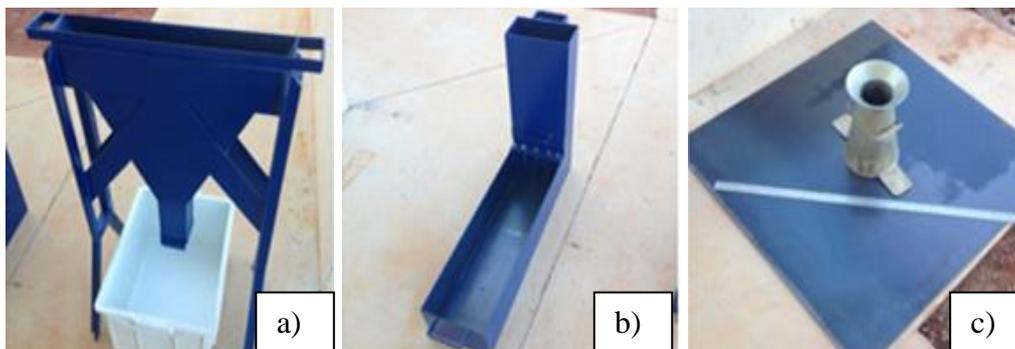


Figura 2 - Ensaio do CAA no estado fresco. (a) Funil-V. (b) Caixa-L. (c) *Slump-flow test*.

2.5 Ensaio no estado endurecido

Os ensaios realizados no estado endurecido consistem em quatro dosagens: um CR e três CAABCC, com aferência da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias. Na totalidade foram dosados trinta e seis corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm, respeitando desta forma a quantidade mínima de corpos de prova estabelecida pela NBR 5739 (ABNT, 2018), a qual é estabelecida em três unidades para cada ruptura. Para a moldagem dos corpos de prova, retificou-se as superfícies inferior e superior do corpo de prova, com o intuito de evitar a concentração de tensões durante os ensaios mecânicos. Após a elaboração do corpo de prova, vedou-se a superfície superior com filme plástico, executou-se a desmoldagem após 24 horas, e posteriormente, aplicou-se a cura submersa até o dia do ensaio.

3 Resultados e análises

3.1 Resultados dos ensaios no estado fresco

Para a verificação da dosagem ideal, principiouse a partir das considerações inerentes a Figura 1 a adoção de um volume de pasta ligeiramente inferior ao índice de vazios encontrado para o esqueleto granular otimizado (o qual foi de 29%), visto que o objetivo dessa pesquisa se trata da produção de CAA com baixo consumo de cimento. Como limites superiores de volume de pasta, considerou-se os percentuais de 35%, 38% e 40%, os quais conforme Almeida Filho (2006), representam faixas de consumo de pasta típicas de CAA convencionais para que as suas propriedades fundamentais sejam atendidas (BARBOZA, 2016; GOMES; BARROS, 2009).

Quanto ao processo de determinação da quantidade de água para os agregados miúdos, obteve-se de forma experimental, variando-se gradativamente a porcentagem de água necessária para fornecer a consistência adequada, verificando se havia segregação e/ou ausência de fluidez. Desta forma, os percentuais de água aplicados para hidratar a areia variaram de 3,34% a 10,61%, cujos valores aumentaram de acordo com a redução do volume de pasta.

Para a verificação dos resultados no estado dos ensaios *slump flow test*, Funil-V e Caixa-L, reserva-se ao primeiro um valor de T500 maior do que dois segundos e um diâmetro de espalhamento compreendido no intervalo de 550 a 850 mm; para o segundo um tempo de escoamento de 9 a 25 s; e por fim, uma relação de altura mínima entre a saída e a entrada da Caixa-L de 0,8 (BARBOZA, 2016).

Para o desenvolvimento do CAABCC e do CR, foi considerado relação A/C de 0,4; relação SA/C de 0,1; 2% da massa de cimento de superplastificante; e relação F/C de 0,4, onde os percentuais indicados de fíler calcário e de sílica ativa, são considerados como em substituição a massa de cimento. Quanto a distribuição dos agregados, esta seguiu a relação de 60% para agregados graúdos e 40% para agregados miúdos. No que tange ao teor de SP/C, este foi definido por base a verificação dos resultados dos ensaios de miniabatimento de tronco de cone e funil Marsh, resultando em 2% sobre a massa de cimento.

Portanto, levando em relevância de que a produção do CAABCC e do CR é realizada para a classe de agressividade ambiental II, ambientes urbanos não litorâneos e resistência mínima a compressão de 30 MPa aos 28 dias, obtêm-se a composição das dosagens para CR 1, CAABCC 1, CAABCC 2 e CAABCC 3 na Tabela 2 e a descrição dos seus parâmetros de dosagem na Tabela 3.

Tabela 2 - Consumo dos materiais por m³ de concreto das dosagens de baixo consumo de cimento (kg/m³)

Materiais	CR 1	CAABCC 1	CAABCC 2	CAABCC 3
Cimento (kg)	434,06	358,10	347,25	325,54
Fíler Calcário (kg)	173,62	143,24	138,90	130,22
Sílica Ativa (kg)	43,41	35,81	34,72	32,55
Areia (kg)	648,70	724,39	735,20	756,82
Brita (kg)	973,06	1086,56	1102,80	1135,23
SP (kg)	8,68	7,16	6,94	6,51
Água (kg)	173,62	143,24	138,90	130,22

A ausência da composição de CAABCC com 29% de volume de pasta nas Tabela 2 e 3, se deve a falha no atendimento dos requisitos mínimos dos ensaios da Caixa-L e Funil-V, estando relacionados a insuficiência do volume de pasta para gerar a viscosidade e coesão necessárias a mistura. A inexecuibilidade dos ensaios da Caixa-L e no Funil-V verificada para o volume de pasta de 29%, advém do entupimento dos equipamentos em função da falta de pasta para gerar uma fluidez mínima a mistura (GOMES; BARROS, 2009).

Tabela 3 - Consumo dos materiais por m³ de concreto das dosagens de baixo consumo de cimento (kg/m³)

Parâmetro	CR 1	CAABCC 1	CAABCC 2	CAABCC 3
Relação água/aglomerantes	0,363	0,363	0,363	0,363
Água p/agregados (%)	3,34	6,00	6,74	7,68
Volume de pasta (%)	40,00	33,00	32,00	30,00
Massa Específica (kg/dm ³)	2,430	2,480	2,465	2,350
Consumo de Cimento (kg/m ³)	434,06	358,10	347,25	325,54
Teor de superplastificante (%)	2,00	2,00	2,00	2,00

De acordo com Repette (2011), CAA produzidos pelos mesmos materiais intrínsecos ao concreto convencional e com incorporação de finos, denotam taxas de consumo de cimento entre 350 a 450 kg/m³ e de 150 a 250 kg/m³ para incorporação de partículas finas (fíler calcário e sílica ativa). Conforme é notado na Tabela 2, o consumo de cimento variou de 325,54 kg/m³ a 358,10 kg/m³, estando estes dentro dos limites mínimos permitidos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para a classe de agressividade ambiental II e abaixo da estimativa usual de consumo indicado por Repette (2011) (excetuando o CAABCC 1). No caso dos finos, o seu consumo indicado na Tabela 2 está dentro do esperado para o CAA.

Com o intuito de sintetizar os resultados dos ensaios do estado fresco para as dosagens otimizadas de CAABCC e CR, demonstra-se a Tabela 4. Embora nos resultados indicados na Tabela 4 para o CR 1 e CAABCC 2 o *slump-flow test* esteja fora dos limites de espalhamento para a classe SF2, este ainda se encontra dentro do intervalo estabelecido para a classe SF3 (760 mm a 850 mm) (ABNT NBR 15823: 2017).

Tabela 4 – Propriedade dos concretos no estado fresco

Propriedades	Limites NBR 15823	CR 1	CAABCC 1	CAABCC 2	CAABCC 3
<i>Slump-flow</i> , d _f (mm)	660 ≤ d _f ≤ 750	815,00	732,50	760,00	667,50
T ₅₀₀ (s)	>2	02''99	06''05	06''23	24''49
Caixa L, H2/H1*	≥0,80	0,81	0,81	0,93	0,82
Caixa L, t ₂₀ (s)	-	01''20	02''24	02''09	02''37
Caixa L, t ₄₀ (s)	-	02''08	08''95	04''83	08''01
Funil V, t _v (s)	9 ≤ t _v ≤ 25	09''11	11''14	10''92	12''49

Entretanto, deve-se ressaltar que além da variação numérica, uma análise qualitativa deve ser considerada para a Tabela 4. Justamente ao verificar visualmente fatores como homogeneidade e a não ocorrência de segregação ou exsudação, foi perceptível que para todos os concretos ilustrados na Tabela 4 uma avaliação positiva dos aspectos avaliados. A única ressalva a ser feita, é que o CAABCC 3 em virtude do seu menor volume de pasta (30%), apresentar menor estabilidade da mistura em relação as demais amostras, entretanto, este mesmo assim foi classificado visualmente como uma mistura estável, ou seja, com uma leve presença de exsudação.

3.2 Resultados dos ensaios no estado endurecido

Na execução do ensaio de resistência a compressão axial foram moldados trinta e seis corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm, com ruptura programada para os 3, 7 e 28 dias. Na Figura 3, denota-se a resistência à compressão obtida, onde em todos os casos a tipologia de ruptura verificada nos corpos de prova foi classificada como ruptura cônica.

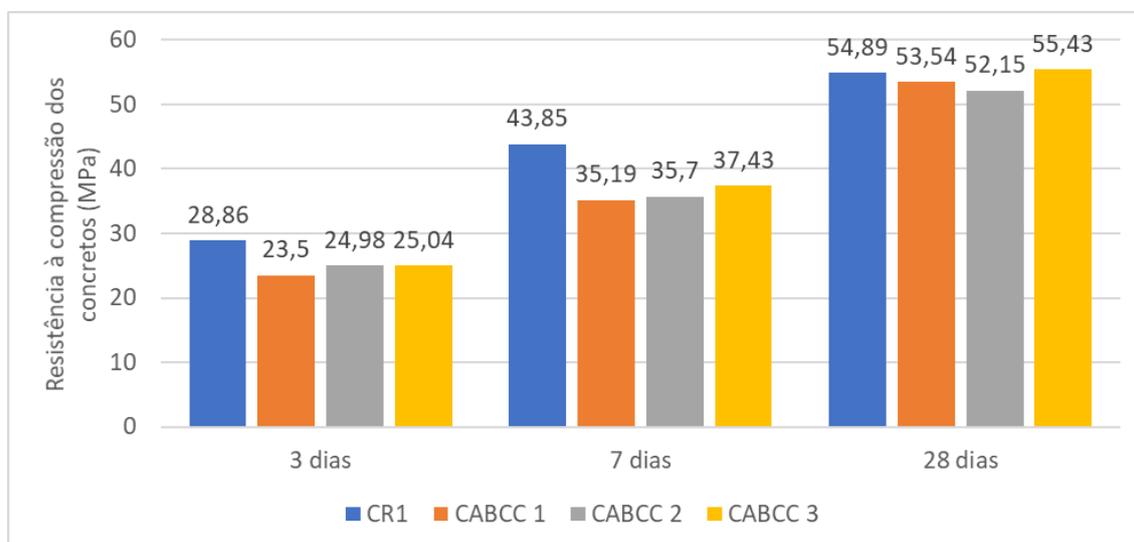


Figura 3 - Resistência à compressão para o CR e CAABCC

Ao constatar os parâmetros estatísticos dos ensaios inerentes a Figura 3, em todos os casos (exceto para o exemplar CR 1 aos 3 dias de ruptura), verificou-se um desempenho de bom a excelente na qualidade do ensaio (equivalente a um coeficiente de variação igual ou inferior a 5) (ABNT, 2017). Todavia, quanto a peculiaridade encontrada para o exemplar CR 1 aos 3 dias de ruptura, esta é intrínseca a falhas durante o processo de retificação em uma de suas amostras, conferindo-lhe desta maneira um elevado coeficiente de variação no valor de 23,17%. Quanto a resistência a compressão aos 28 dias, verifica-se que todos os concretos da Figura 3 atenderem a resistência mínima solicitada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para a classe de agressividade II, a qual é de 30 MPa.

Ao averiguar as resistências mecânicas encontradas, é notável que maiores magnitudes deste parâmetro foi atribuída para os concretos com maior volume de pasta (excetuando o CAABCC 3). Como justificativa para o fato da composição CAABCC 3 apresentar resistência mecânica superior as demais amostras aos 28 dias de idade, trata-se de que o seu volume de pasta de 30% ser o que mais se aproxima do índice de vazios otimizado de 29,53%, descrito como ideal na Figura 1 durante a etapa de empacotamento dos agregados. Tal premissa, corrobora para a formação de um esqueleto granular com alta compactidade e um volume de pasta minimizado, onde este segundo fator atua

diretamente na porosidade e retração do concreto (GOLTERMANN *et al.*, 1997 apud GOMES, 2002). Devido à presença menor de vazios e de porosidade decorrentes da minimização do volume de pasta sob o critério da otimização do empacotamento dos agregados e preenchimento dos vazios pelo volume superior de areia fina (ANDRADE, TUTIKIAN, 2011), o traço do CAABCC 3 demonstrou o melhor resultado de resistência mecânica aos 28 dias na Figura 3.

Todavia, embora o CAABCC 3 tenha tido o melhor desempenho no estado endurecido, é importante ressaltar que dentre as amostras de baixo consumo de cimento esta foi a que apresentou menor fluidez; da mesma forma que o valor mínimo de resistência atribuído ao CAABCC 2, está associado à sua maior fluidez dentre os CAABCC, culminando como a única amostra dos CAABCC com classificação SF3 (760 – 850 mm) no *slump flow test* (Tabela 4).

No que tange a evolução do ganho de resistência mecânica dos 7 aos 28 dias, os resultados foram favoráveis aos concretos com baixo consumo de cimento, apresentando estes um ganho médio de 48,77% neste parâmetro, enquanto para o CR foi verificado apenas um crescimento de 25,18%. Em relação a progressão verificada entre as idades de 3 e 7 dias, os resultados são similares para todas as amostras, exceto na circunstância do CAABCC 2, cujo ganho de resistência foi inferior aos demais, culminando como a pior resistência à compressão encontrada aos 28 dias.

3.3 Avaliação dos indicadores de consumo

Dentre os indicadores de consumo a serem considerados para avaliação das propriedades do CAA produzido, este trabalho analisa o consumo em massa de cimento, dos materiais cimentícios (compostos pelo cimento CP II Z 32 e sílica ativa), do clínquer e do CO₂ para cada m³ de concreto produzido e MPa desenvolvido, ou seja, o consumo em kg·m⁻³/MPa.

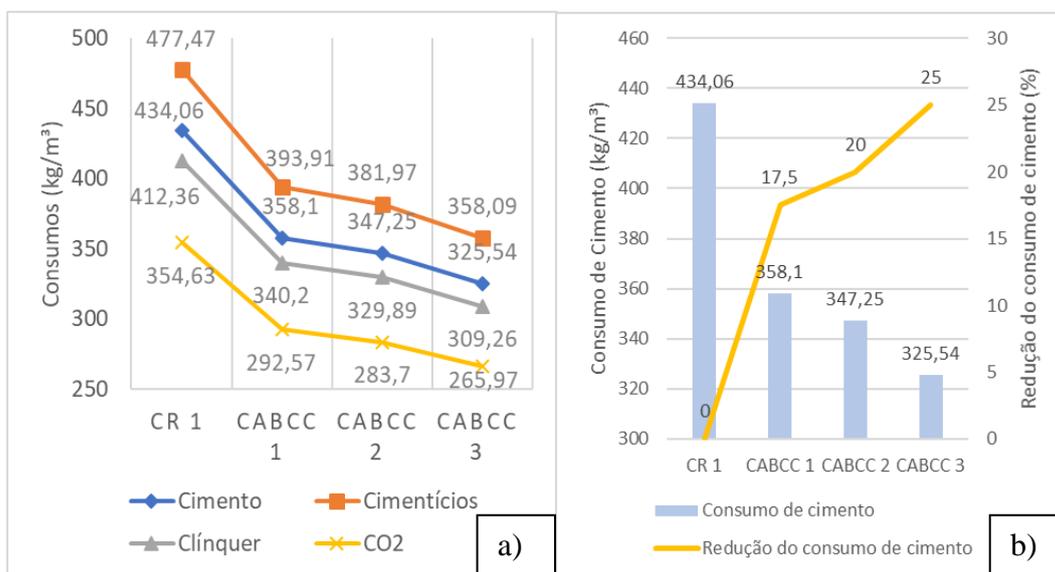


Figura 4 - (a) Consumo de cimento, material cimentícios, clínquer e emissão de CO₂ para as quatro dosagens analisadas. (b) Redução do consumo de cimento.

Para a verificação da correlação da emissão de CO₂ em função do consumo de cimento, aplica-se as recomendações de Rebmann (2011), o qual estima a emissão de 0,86 kg de CO₂ por quilo de clínquer produzido; quanto a quantidade de clínquer necessária para a produção de 1 kg de cimento, esta é determinada pelas especificações técnicas do fabricante, a qual indica um percentual de 95% de clínquer para cada quilo de cimento

consumido. Desta maneira, indica-se na Figura 4(a) os consumos de cimento, materiais cimentícios, clínquer e CO₂.

Com o intuito de verificar a redução do consumo de cimento a partir dos dados indicados na Figura 4(a), aplica-se a equação 2, a qual quantifica a redução do consumo de cimento do parâmetro CAABCCn em análise, ao compará-lo com um consumo de cimento de referência (CR₁). Portanto, denota-se na Figura 4(b) os resultados inerentes a redução do consumo de cimento.

$$CC_{redução} = \frac{CAABCC_n - CR_1}{CR_1} \cdot 100\% \quad (02)$$

Ao relacionar a queda do consumo de cimento verificado na Figura 4(b) com a resistência mecânica à compressão aferida na Figura 3, é notável que as perdas máximas de 4,99% na resistência mecânica à compressão (verificada no CABCC 2) são significativamente inferiores a redução no consumo de cimento denotadas na Figura 4(b).

Todavia, quantificar a viabilidade técnica do CAABCC estritamente pela redução do consumo de cimento por m³ de concreto é inadequado. Desta forma, emprega-se a equação 1 referente ao consumo relativo indicado pela Figura 4(a), onde o parâmetro de avaliação de desempenho é a resistência a compressão aos 28 dias indicada na Figura 3, o que resulta na Figura 5(a).

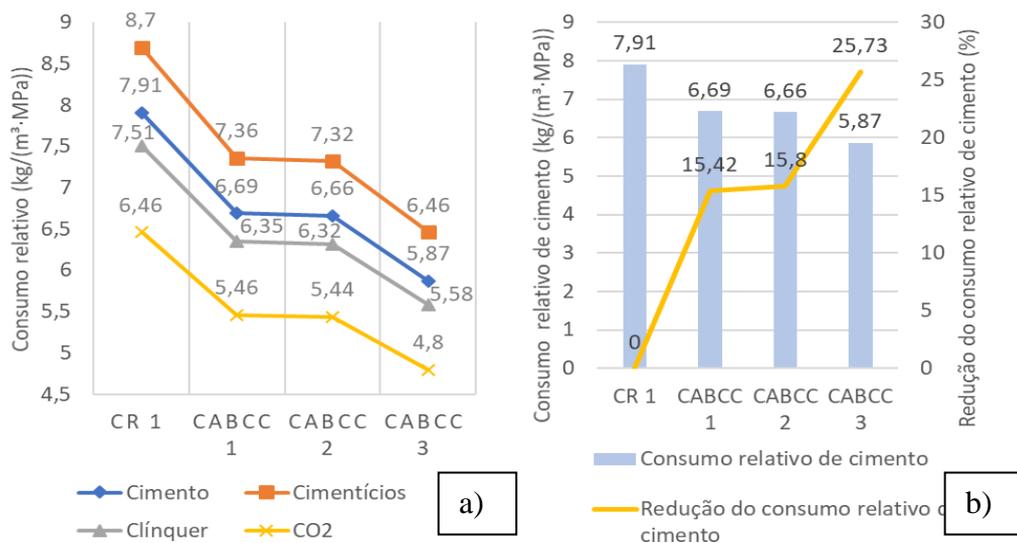


Figura 5 - (a) Consumo relativo de cimento, material cimentícios, clínquer e emissão de CO₂ para as quatro dosagens analisadas com resistência à compressão aos 28 dias. (b) Redução do consumo relativo de cimento.

Ao reaplicar a equação 2 nas informações descritas na Figura 5(a), com o intuito de deduzir a real redução de consumo de cimento por MPa produzido, obtêm-se a Figura 5(b), onde o CR 1 atua como parâmetro de referência. Os valores indicados de consumo relativo de cimento dos CAABCC na Figura 5(b), são condizentes aos obtidos na pesquisa de Barboza (2016), o qual teve consumos de cimento compreendido na faixa de 5,44 kg/(m³·MPa) a 6,46 kg/(m³·MPa).

Ao comparar os resultados das Figuras 4(b) e 5(b), e tendo os parâmetros da Figura 4(b) como modelo base, percebe-se que para o CAABCC 1 e CAABCC 2, a redução do consumo de cimento foi acompanhada de uma queda de desempenho de 11,89% e 21%,

respectivamente, ao considerar a resistência à compressão. Todavia, embora tenha sido aferido um ganho real inferior ao relatado na Figura 4(b), as informações da Figura 5(b) permitem afirmar que independentemente da performance de resistência à compressão para o CAABCC 1 e CAABCC 2 tenham sido menores do que o concreto de referência, ambos os concretos apresentam desempenho real superiores ao CR 1.

Entretanto, dentre as amostras citadas na Figura 5(b), o resultado de maior magnificência é o do CAABCC 3, onde a combinação do volume de pasta com o índice de vazios ótimo oriundo da etapa do empacotamento de agregados, proporcionou ao material um ganho de performance devido os maiores patamares de resistência mecânica à compressão aos 28 dias alcançados. Logo, o fato do percentual de redução do consumo relativo de cimento da Figura 5(b) ter sido ligeiramente superior a queda de consumo de cimento verificada na Figura 4(b) para o CABCC 3, se deve ao seu maior valor de resistência à compressão aos 28 dias em relação ao CR₁, conforme é verificado na Figura 3.

Outro fato importante de ser mencionado, trata-se de que mesmo sob a perspectiva da queda de desempenho do CAABCC 2 ao ponderar a resistência mecânica gerada, esta ocorreu em menor grau do que o CAABCC 1, denotando desta maneira um menor consumo relativo de cimento para o CAABCC 2 e uma tendência de ganho de resistência com o decréscimo do volume de pasta, caso este seja suficientemente próximo ao índice ótimo de vazios indicado na Figura 1.

Ao investigar os ganhos em termos de sustentabilidade pela redução da emissão de CO₂ na Figura 5 devido a redução na utilização de cimento na composição da dosagem, apesar da queda no consumo de cimento ter sido significativa, o cimento CP II Z 32 empregado possui elevada concentração de clínquer em sua constituição, minorando desta forma os ganhos ambientais. Como parâmetro para cimentos com baixo teor de clínquer no cimento, cita-se o cimento CP V ARI utilizado no CAA produzido por PEREIRA (2010), a qual apresentava índices de 60,4%.

Para a verificação dos custos dos concretos, considera-se o custo unitário dos materiais empregados no traço tendo em vista os preços praticados na região metropolitana de Campinas em 2017, conforme é denotado na Tabela 5. Deste modo, a partir dos dados de custo unitários da Tabela 5, elabora-se os custos unitários das dosagens desenvolvidas e a sua redução de custos em relação ao concreto de referência (CR₁) na Figura 6(a).

Tabela 5 – Custo unitário dos materiais utilizados (R\$/kg)

Cimento CPII-Z-32	Sílica Ativa	Fíler Calcário	Brita 0	Areia fina	Aditivo
0,4	1,15	0,75	0,064	0,058	7

Embora o custo do filer calcário seja superior ao cimento na Tabela 5, o critério adotado nesta pesquisa para a avaliação do teor de filer calcário a ser aplicado na dosagem é respaldado em produzir um CABCC com os menores índices possíveis de cimento por m³ de concreto, justificando desta forma a escolha de uma relação F/C de 40% nos ensaios de caracterização da pasta. Tal medida, é ainda respaldada ainda pelos aspectos ambientais envolvidos sob a relação linear intrínseca do uso de clínquer e emissão de CO₂ com a quantidade de cimento presente por m³ de concreto.

Ao analisar a Figura 6(a), é notável que a redução no consumo de cimento implicou

necessariamente na queda de preço dos materiais por m³ de concreto produzido. Tal resultado, é embasado na ação conjunta do custo e da quantidade dos materiais cimento e do fíler calcário serem de maior preponderância. Como o consumo destes materiais é diretamente interligado a quantidade de cimento empregada na dosagem, é de se esperar que ocorra esta devida redução de custos.

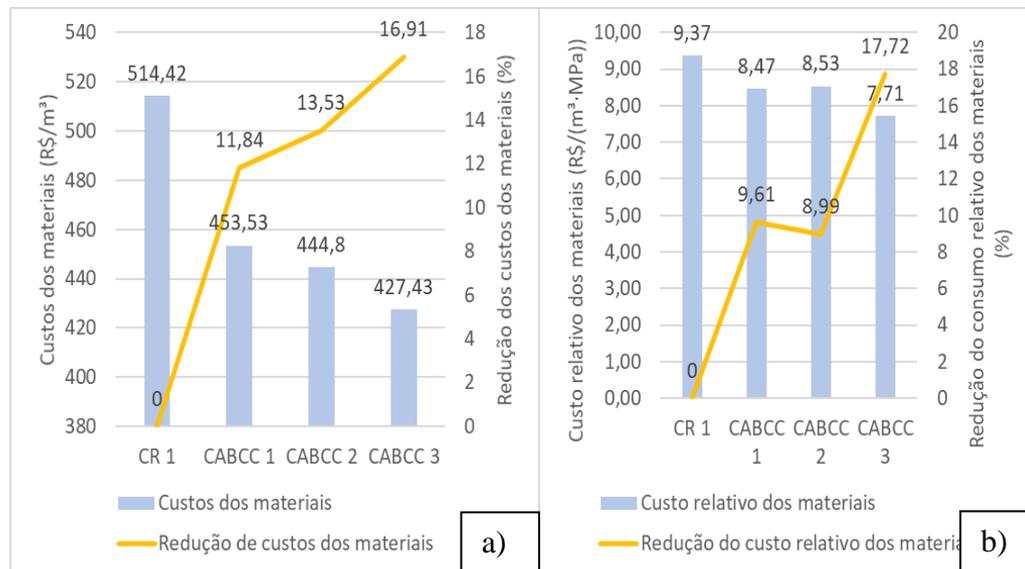


Figura 6 - (a) Custos e redução dos custos dos materiais. (b) Custo relativo e redução do custo relativo dos materiais.

Todavia, ao ponderar o custo relativo dos materiais em função da resistência mecânica à compressão desenvolvida aos 28 dias e a redução de custo percentual em relação ao CR 1 na Figura 6(b), é explícito ao confrontar as reduções de consumo e do custo relativo por MPa desenvolvidos nas Figuras 5(b) e 6(b), respectivamente, que a redução em porcentagem verificada sucede em menor escala no segundo caso. Tal fato, se baseia em que a diminuição do volume de pasta implica no incremento do volume de agregados, o qual necessariamente eleva os custos totais do concreto.

Com o intuito de averiguar com maior profundidade os efeitos de redução de custo do concreto com a diminuição do consumo de cimento, a Figura 7 descreve a composição de custo dos concretos desenvolvidos, cujos resultados permitem explicar com maior clareza as diferenças de comportamento verificadas nas Figuras 5(b) e 6(b).

De acordo com o método de dosagem de Gomes (2002), a linearidade entre os materiais com dosagem diretamente dependente da massa de cimento (fíler calcário, sílica ativa e superplastificante) e dos com dependência indireta (agregados miúdos e graúdos), propicia que os materiais de custo com maior preponderância da Tabela 5 sejam mais proeminentes em composições com maior volume de pasta, fazendo com que os materiais dosados diretamente com a massa de cimento representem de 69,84% à 78,27% no custo total do concreto (Figura 7).

A medida em que os custos com os agregados tornam-se mais preponderantes na produção do CAA, a tendência é de que a redução do custo do concreto seja em menor escala para menores volumes de pasta. Ao considerar os resultados da Figura 6(a), e recordando de que os volumes de pasta do CAABCC 1, CAABCC 2 e CAABCC 3 são de 33%, 32% e 30%, respectivamente, a queda de custo do concreto para cada 1% de volume de pasta reduzido é inferior na composição com menor volume de pasta. Tal fato, é elucidado devido a redução contínua do consumo de cimento proporcionar um

menor impacto na queda de custo de volumes de pasta inferiores, visto que nestes casos os custos com os agregados são de maior relevância.

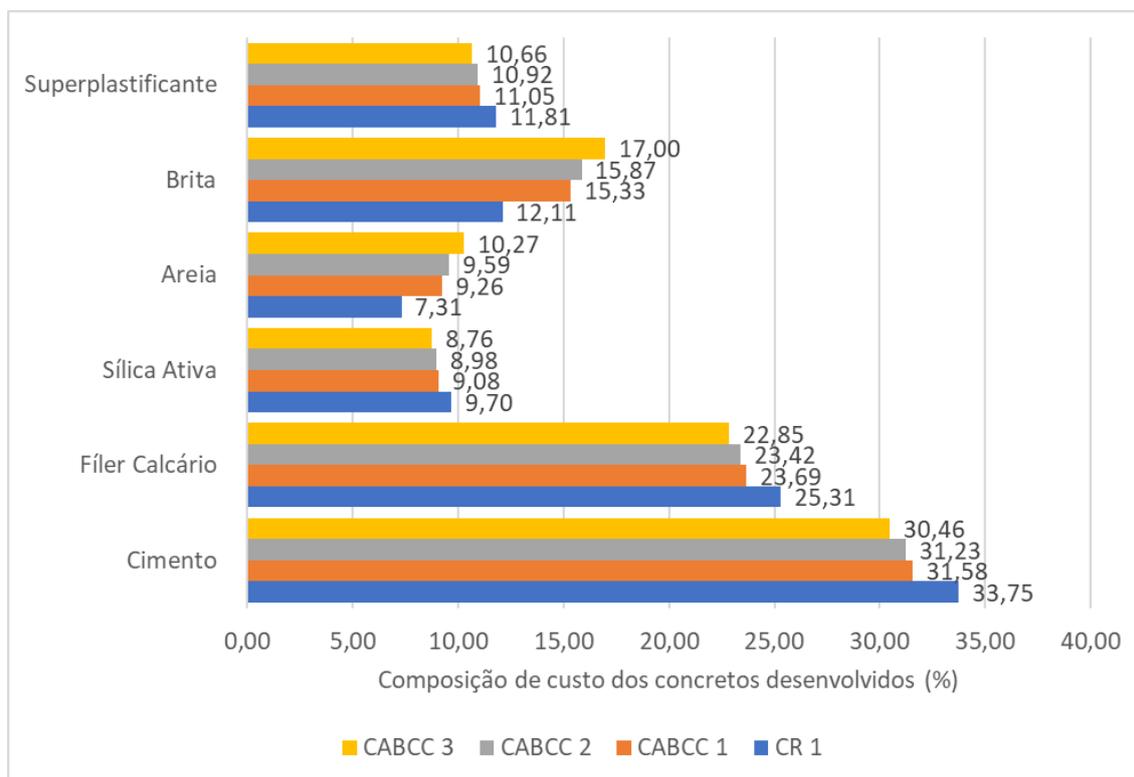


Figura 7- Composição de custo dos concretos desenvolvidos.

Quanto ao custo relativo dos materiais na Figura 6(b), este denota de que a diferença real de desempenho econômico do CAABCC 1 e CAABCC 2 em relação ao CR 1 é inferior ao constatado pela Figura 6(a), devido a menor resistência mecânica destas composições. No caso do CAABCC 3, por este apresentar a maior resistência à compressão aos 28 dias da Figura 3, a sua redução de custo relativo dos materiais é superior a redução do custo dos materiais.

Visto que pela Figura 6(a) a redução dos custos dos materiais tende a ser diminuída em menor escala para volumes de pasta inferiores, o fator decisivo para a maior competitividade de custo relativo dos materiais é justamente de que o volume de pasta esteja suficiente próximo do índice ótimo de vazios denotado pela etapa de empacotamento dos agregados, para que desta forma a dosagem apresente o melhor desempenho de custo relativo dos materiais, e conseqüentemente, o melhor desempenho econômico, conforme foi verificado para o CAABCC 3 na Figura 6(b).

4 Considerações finais

Baseado nos resultados desta pesquisa, conclui-se que mesmo tendo uma redução do consumo de cimento de até 25% para o CAABCC 3 com 30% do volume de pasta, de um modo geral as quedas no desenvolvimento da resistência mecânica aos 28 dias dos concretos com baixo consumo de cimento foram inferiores a redução do consumo de cimento oriundos dos menores volumes de pasta.

No caso específico do CAABCC 3, a redução do volume de pasta ocasionou a redução do consumo de cimento concomitantemente com a elevação da resistência mecânica à

compressão, denotando que para volumes de pasta próximos ao índice de vazios ótimo obtido na fase do empacotamento de agregados, o incremento do volume de agregados proporcionado pela queda de volume de pasta, confere uma microestrutura do concreto com menor porosidade, o que corrobora para ganhos de resistência.

Em termos de viabilidade econômica, mesmo que a inferência do desempenho técnico do CAABCC tenha sido superior do que os termos econômicos, a minimização da quantidade de materiais dependentes diretamente do consumo de cimento foi de maior preponderância do que os aumentos dos custos pelo maior consumo de agregados, proporcionando aos CAABCC um menor custo unitário do que o CR 1.

Quanto ao viés ambiental, embora a queda de até 25% no consumo de cimento implique necessariamente em uma redução equivalente na emissão de CO₂, o fato do cimento escolhido apresentar elevados índices de clínquer em sua composição (95%), caracteriza que o cimento selecionado não é aconselhável em termos de sustentabilidade. Como referência de taxas inferiores de clínquer no cimento, cita-se o cimento CP V ARI empregado no CAA produzido por Pereira (2010), a qual apresentava índices de 60,4%.

Portanto, é conclusivo que para os resultados apresentados nesta pesquisa, todos os CABCC dosados possuíram superior desempenho técnico (kg·m⁻³/MPa) e financeiro (R\$.m⁻³/MPa) do que o concreto CAA de referência, atendendo simultaneamente as exigências do CAA para o estado fresco e endurecido, e comprovando desta forma, a viabilidade econômica do CAABCC.

Referências

ALCOFORADO, L. F. M. *Viabilidade econômica do concreto autoadensável na construção de prédios em Goiânia* – GO. IPOG – Revista Especialize, jan. 2013.

ALMEIDA FILHO, F. M. (2006). *Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos autoadensáveis*. 2006. 292 f. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ANDRADE, J. J. de O.; TUTIKIAN, B. F. *Resistência Mecânica do Concreto*. In: ISAIA, G. C. (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p. 615-651.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 5739**: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118**: *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 9833**: *Concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 12655**: *Concreto de Cimento Portland – preparo, controle e recebimento: procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 15823**: *Concreto autoadensável*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR NM 45**: *Agregados: determinação de massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BARBOZA, L. S. *Estudo sobre o impacto da redução do consumo de cimento no comportamento mecânico do concreto autoadensável*. 2016. 174 f. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

BARROS, A. R. de. *Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço*. Maceió: UFAL, 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BRASIL MINAS (2019). *Pó de calcário* (Ficha técnica, 2015). Disponível em: http://www.brasilminas.net/produtos_item.php?id=calc%C3%A1rio. Acesso em: 21 de fevereiro. 2019.

CHEMISTRY WORLD. *The concrete conundrum.* *Chemistry World*, p. 62-66, mar. 2008. Disponível em: http://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf.: Acesso em: 5 de mar. 2017.

CORBIOLI, N. *Concreto autoadensável se mostra como alternativa viável para o mercado.* 2016. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/236/concreto-autoadensavel-se-mostra-como-alternativa-viavel-para-o-mercado-375638-1.aspx>. Acesso em: 5 de mar. 2017.

DE LARRARD, F.; BOSE, F.; CATHERINE, C.; DEFLORENNE, F. (1997). *The AFREM method for mix-design of high performance concrete.* *Materials and Structures*, Vol. 30, p. 439-446.

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

GOMES, P. C. C. *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.* 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GRACE (2019). *Aditivos para concreto.* Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf. Acesso em: 21 de fevereiro. (2019).

LISBÔA, E. M. (2004). *Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.* Maceió: UFAL, 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*. Jul. 2002.

MELO, K. A. de (2005). *Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário.* Florianópolis: UFSC, 2005. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MORAES, K. A. de M. (2010). *Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável.* Recife: UFPE, 2010. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MOLIN, D. C. C. D., *Adições minerais.* In: ISAIA, G. C. (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p. 261-309.

PEREIRA, T. A. C. (2010). *Concreto autoadensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã ou rocha ou poliamida.* 2009. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

REBMANN, M. S. *Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.* 2011. 211 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2011.

REBMANN, M. S. Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados. 2016. 252 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

REPETTE, W. L., *Concreto Autoadensável.* In: ISAIA, G. C. (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.2, p. 1769-1806.

SOUZA, T. C. C. DE; SUZUKI, S.; LUDVIG, P.; CALIXTO, J. M.; LADEIRA, L. O. *Nanotubos de carbono: um caminho para a sustentabilidade de materiais cimentícios.* *Concreto & Construções: Sustentabilidade na construção – Ecoeficiência do concreto e das estruturas de concreto*, São Paulo, ano LXXVII, p. 20-24, jan./mar. 2015. ISSN 1809-7197.

TECNOSIL (2019). *Sílica Ativa (Ficha técnica do produto).* Disponível em: <http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/download/catalogo-silica-ativa.pdf>. Acesso em: 21 de fevereiro. 2019.

TUTIKIAN, B. F. *Método para dosagem de concretos autoadensáveis.* 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

TUTIKIAN, B. F. *Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis.*

2007. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.

VOTORANTIM (2019). CP II Z-32 (Ficha técnica do produto). Disponível em: <<http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cimento.htm>>. Acesso em: 21 de fevereiro. 2019.

WBCSD. *Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reduction up to 2050*. Geneva/Switzerland: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2009.