

Review: métodos experimentais de dosagem de concreto autoadensável (CAA) desenvolvidos no Brasil

Rafael Gómez Fochs¹

Fernando Antonio Piazza Recena²

Isaac Newton Lima da Silva³

Resumo

O concreto autoadensável (CAA) foi desenvolvido, primeiramente, buscando sanar o problema da redução de mão de obra qualificada no Japão. Sua apresentação no mercado proporcionou diversas oportunidades de melhoria de qualidade e produtividade na indústria da construção. Desde então, pesquisadores vêm desenvolvendo trabalhos, a fim de compreender e tornar a dosagem experimental do CAA tão clara e sistemática como a do concreto convencional tem sido nos dias de hoje. No Brasil, os métodos experimentais de dosagem de CAA podem ser divididos em dois grupos: o primeiro se baseia na adição de agregados e na avaliação da mistura, desde a etapa de formulação da pasta até o ajuste final do concreto; o segundo grupo avalia o concreto como um todo, sem a avaliação da pasta ou argamassa de forma isolada. E ainda, utiliza conceitos do método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) para dosagem de concretos convencionais. Através de nove critérios, de aspectos qualitativos e das pesquisas apresentadas pelos autores desses métodos, pode-se evidenciar alguns dos aspectos e características comuns e individuais dos principais métodos de dosagem de CAA empregados no Brasil.

Palavras-chave: Concreto autoadensável (CAA). Método de dosagem. Estudo comparativo.

Abstract

The self-compacting concrete (SCC) was first developed as an attempt to solve the problem of scarce skilled labor in Japan. Its introduction in the market provided several opportunities for improving quality and productivity in the construction industry. Since then, researchers have developed studies to understand and make the trial SCC mix design as clear and systematic as the mix proportions of conventional concrete used nowadays. In Brazil, the trial SCC mix design methods can be divided into two groups: the first one is based on the addition of aggregates and evaluation of the mixture from the paste formulation stage to the final adjustment of the concrete; the second one is evaluated as a whole and the paste or mortar is not evaluated in isolation. Moreover, it uses concepts of the IPT/EPUSP method proposed by Helene and Terzian (1992) for traditional concrete mix design. Through nine criteria of quality aspects and studies made by the authors of these methods, we can highlight some of the common and individual characteristics and aspects of the main methods of dosage of CAA employed in Brazil.

Keywords: Self compacting concrete (SCC). Dosage method. Comparative study.

¹ Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS, Brasil e professor da Faculdade da Serra Gaúcha (FSG), Caxias do Sul, RS. E-mail: rafaelfochs@yahoo.com.br

² Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil e professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS. E-mail: fernando.recena@pucrs.br

³ Doutor em Instrumentação pela University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, Inglaterra e professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS. E-mail: isaac@pucrs.br

1 Introdução

O concreto autoadensável (CAA) é descrito como umas das grandes revoluções ocorridas na tecnologia do concreto nas últimas décadas. Desenvolvido, inicialmente, para garantir o adensamento adequado do concreto sem dependência da habilidade do operário, o CAA provou sua vantagem técnica, econômica e ambiental por inúmeros fatores, entre os quais, mencionam European Federation for Specialist Construction Chemical and Concrete Systems - EFNARC (2002), Tutikian e Dal Molin (2008) e Gomes e Barros (2009), maior velocidade de produção, já que seu lançamento é muito rápido e dispensa adensamento; aumento de qualidade com a redução de falhas de concretagem resultantes de má vibração; ganhos ecológicos, visto que pode utilizar, em sua composição, teores de resíduos industriais; redução do número de trabalhadores envolvidos na concretagem e diminuição do ruído em função da não utilização de equipamentos necessários para o adensamento mecânico.

Apesar das vantagens da utilização desse tipo de concreto e da elaboração de métodos de dosagem de CAA nos últimos anos, Tutikian (2007) verifica que alguns profissionais partem de métodos de dosagem desenvolvidos há mais de 20 anos para criar misturas de CAA, sem considerar os métodos existentes, mais recentes. O mesmo autor verifica, através de pesquisas, que profissionais tomadores de decisão, de forma ainda mais grave, não utilizam o CAA e optam por outro tipo de concreto, fundamentando que seu custo é elevado ou que suas propriedades, no estado endurecido, podem comprometer o desempenho da estrutura.

O estudo e a pesquisa em torno do CAA enquadram-se em um contexto bastante atual no cenário nacional e internacional, com diversas instituições de ensino, realizando pesquisas sobre o tema. Embora exista razo-

ável bibliografia nacional com a descrição de um ou mais métodos de dosagem de CAA desenvolvidos nacionalmente e no exterior, conforme assinalam Tutikian (2004), Melo (2005), Tutikian (2007), Alencar (2008), Tutikian e Dal Molin (2008) e Gomes e Barros (2009), existem poucos estudos teóricos que estabeleçam comparações entre as propostas de dosagem apresentadas.

Dessa maneira, o presente artigo pretende evidenciar alguns dos aspectos e características comuns e individuais dos principais métodos de dosagem de CAA empregados no Brasil.

2 Breve descrição dos métodos nacionais de dosagem de CAA

2.1 Método Gomes *et al.* de 2002

A metodologia propõe a obtenção de CAA de alta resistência à compressão (acima de 40 MPa aos 28 dias), através da otimização da composição da pasta e do esqueleto granular em separado, para posteriormente realizar a mistura desses dois elementos, através da definição do volume ideal de pasta. Conforme Gomes e Barros (2009), as etapas desse método de dosagem, de maneira resumida, são as seguintes:

1ª etapa - escolha dos materiais, atentando para as propriedades desejadas do concreto (exemplo: definição do diâmetro máximo do agregado graúdo em função do espaçamento entre barras de aço da peça que será concretada), e de sua disponibilidade no mercado local;

2ª etapa - definição da composição da pasta, a partir da relação água / cimento (a/c), conforme propriedades de resistência desejadas. A obtenção de um CAA de alta resistência é fundamentada, a partir da utilização de relações água / cimento (a/c) em torno de 0,35 e 0,40. Nessa etapa, define-se o teor de superplastificante / cimento (SP/c) ideal, utilizando o ensaio do cone de Marsh e a relação superplastificante / finos adequada,

utilizando o ensaio de miniabatimento, os resultados desses ensaios devem estar dentro de determinados intervalos para serem aceitos. Os finos poderão ser fíler calcário, metacaulim, cinza de casca de arroz, entre outros. Nessa etapa, também se avalia, visualmente, a adequada coesão da pasta (ausência de segregação). Em resumo, nessa ocasião, determina-se a combinação entre cimento, água, adição e SP (superplastificante) que resultará na pasta com fluidez máxima, menor teor de SP/c e com resistência à segregação;

3ª etapa - definição do esqueleto granular, realizando a mistura não compactada do agregado graúdo com agregado miúdo e identificando a proporção que resulte no menor índice de vazios;

4ª etapa - determinação da quantidade de pasta que preencha os vazios dos agregados e assegure uma distância adequada entre as partículas dos agregados. O volume de pasta adequado é o que garante o concreto atender as propriedades de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e ausência de segregação. São testados, através dos ensaios de espalhamento, funil V, caixa L e tubo U, concretos com diversos volumes de pasta, e a mistura que atender aos requisitos exigidos pelos ensaios e que apresentar o menor volume de pasta será a mistura ideal. As figuras 1, 2 e 3 ilustram os ensaios de espalhamento, funil V e caixa L, respectivamente.



Figura 1: Ensaio de espalhamento de um CAA
Fonte: Fochs (2011).



Figura 2: Ensaio Funil V do CAA
Fonte: Fochs (2011).



Figura 3: Ensaio da Caixa L do CAA
Fonte: Fochs (2011).

2.2 Método Repette e Melo de 2005

O método Repette e Melo de 2005 parte do estabelecimento da relação a/c, possibilitando produzir CAA com resistências à compressão atingidas em concretos convencionais (entre 25 e 45 MPa aos 28 dias). As etapas do método são, resumidamente, as seguintes:

1ª etapa - definição de, no mínimo, três relações a/c, com base na resistência à compressão desejada;

2ª etapa - definição da melhor combinação entre os agregados miúdos (areia fina e areia média) e entre os agregados graúdos (brita 1 e brita 0), com intuito de reduzir o índice de vazios de cada grupo de agregados;

3ª etapa - definição do teor de finos, através da avaliação da pasta, sendo dosado em substituição ao cimento, e do teor ideal de SP, utilizando o ensaio do cone de Marsh de maneira semelhante ao método Gomes *et al.* de 2002. Os finos poderão ser fíler calcário, cinza volante, escória de alto forno, entre outros;

4ª etapa - definição do volume ideal de agregado miúdo, testando diferentes teores de agregado miúdo com diferentes teores de SP. O volume ideal de agregado miúdo é o máximo possível, desde que sejam atendidos os requisitos de autoadensabilidade, testados através dos ensaios de espalhamento e funil V para argamassa. Pode-se ajustar o teor de finos, conforme necessidade. Nessa etapa, também se deve realizar ensaio de resistência à compressão, nos corpos de prova de argamassa, para verificar possíveis erros de dosagem;

5ª etapa - definição do teor ideal de agregado graúdo, novamente testando diferentes faixas de adição. Nessa etapa, também se ajusta a dosagem de SP e realizam-se os ensaios de trabalhabilidade para o concreto: espalhamento, funil V e caixa L. A resistência à compressão deve ser avaliada para o concreto.

2.3 Método Tutikian de 2004

O método proposto por Tutikian de 2004 é baseado no método de dosagem para concreto convencional IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). O método produz um concreto convencional em que se adiciona

o SP, aumentando drasticamente a fluidez e ocorrendo a segregação; com a adição de finos corrige-se a viscosidade, eliminando a segregação, o resultado é o CAA. As etapas desse método de dosagem são, basicamente, as seguintes:

1ª etapa - especificar o diâmetro máximo do agregado graúdo, conforme aplicação, e o fino que será adicionado. Esse último, deverá ter área superficial maior que a do componente que será substituído (cimento ou areia média). Se o fino for pozolânico (exemplo do metacaulim) substituirá o cimento, caso o fino seja não pozolânico (exemplo do fíler calcário e da areia fina) substituirá a areia média;

2ª etapa - determinação do teor ideal de argamassa seca para o traço intermediário, conforme procedimento do método do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) para concretos convencionais, sem a adição de SP ou finos;

3ª etapa - determinação de, no mínimo, três traços-base para o desenho do diagrama de dosagem: um rico, um intermediário e um pobre;

4ª etapa - dosagem como um concreto convencional, primeiramente, para o traço intermediário, colocação do SP e, conseqüentemente, ocorrência da segregação do material;

5ª etapa - colocação de finos na mistura, corrigindo a segregação - como o acerto é por substituição, deve-se tomar cuidado para manter as proporções de materiais e o mesmo teor de argamassa; dessa maneira, a adição de finos é acompanhada pela adição dos outros materiais;

6ª etapa - ensaios de trabalhabilidade até a obtenção do CAA. Realização do mesmo procedimento para os demais traços-base (rico e pobre);

7ª etapa - ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade;

8ª etapa - desenho do diagrama de dosagem e desempenho.

Em relação à 8ª etapa, conforme Tutikian (2007), o objetivo do diagrama de desempenho é similar ao de dosagem: com dois ou três resultados de um determinado ensaio, preferencialmente os de durabilidade, ter possibilidade da determinação das equações de comportamento e a possibilidade de cálculo dessa propriedade para quaisquer valores de resistência à compressão, por exemplo. O diagrama de desempenho consiste em relacionar a resistência à compressão com propriedades de durabilidade ou até mecânicas do concreto.

2.4 Método Tutikian e Dal Molin de 2007

Segundo os autores, a metodologia de dosagem:

Utiliza os conceitos de O'Reilly (1992) para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de De Larrard (1999) para escolha dos materiais, o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP para permitir os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada de uma mesma família estudada, o acerto do teor de aditivo, relação água/cimento e o procedimento básico de Tutikian de 2004 (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As etapas desse método de dosagem, de maneira resumida, são as seguintes:

1ª etapa - assim como em Tutikian (2004), acrescido da sugestão de priorizar agregados arredondados, com o menor diâmetro máximo possível e com faixas granulométricas contínuas;

2ª etapa - realização do empacotamento dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro de partículas. Inicia-se com a brita, caso existam dois tipos de agregado graúdo, esses são empacotados, e é escolhida a combinação com menor índice de vazios. Depois essa mistura é empacotada com a areia média, na qual é encontrada a combinação, entre esses agregados, que resulte no menor índice de vazios. Finalmente, a mistura resultante é empacotada com o fino utilizado

(areia fina, por exemplo) e, novamente, define-se a combinação com menor índice de vazios. O único material que não é empacotado é o cimento;

3ª etapa - estimativa da relação a/c e do teor de SP para o traço intermediário, conforme experiência do responsável, antes da mistura dos materiais. Pode-se realizar a mistura do traço intermediário, visto que o proporcionamento entre os agregados já foi definido na etapa anterior, e a quantidade de cimento para o traço intermediário é estipulada normalmente em torno da relação 1 : 4,5 (1 kg de cimento para 4,5 kg de agregados) e, assim, verificar a necessidade de ajustes da relação a/c e do teor de SP estimados;

4ª etapa - mistura de, no mínimo, três traços-base para o desenho do diagrama de dosagem: um rico, um intermediário e um pobre;

5ª etapa - ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade;

6ª etapa - desenho do diagrama de dosagem e de desempenho.

2.5 Método Alencar e Helene de 2006

Conforme Alencar (2008), a metodologia utiliza o conceito de correção da coesão do concreto fresco, para subsidiar a grande fluidez, com incremento de adições minerais para a substituição do cimento, quando o fino for pozolânico (exemplo do metacaulim) ou do agregado miúdo, quando o fino não for pozolânico (exemplo do filer calcário), com área superficial maior do que o material substituído. Cria uma correlação entre a relação agregado/cimento e o conteúdo ideal de substituição, agregando um quarto (4º) quadrante ao diagrama de dosagem. Quanto ao proporcionamento dos agregados, o método Alencar e Helene de 2006 sugere a mistura de duas classes de brita para redução do índice de vazios dos agregados graúdos. As etapas desse método de dosagem, de maneira resumida, são as seguintes:

1ª etapa - para o traço intermediário determinar o teor ideal de argamassa, teor de substituição, teor de SP e relação água / aglomerante (a/agl), concomitantemente, utilizando os ensaios de trabalhabilidade até atingir as características de um CAA, conforme nível de autoadensabilidade desejado. A massa do aglomerante é definida como o somatório da massa do cimento e da massa do fino pozolânico;

2ª etapa - realização da dosagem para os traços mais ricos e mais pobres, mantendo a dosagem do SP e teor de argamassa constante, conforme definido no traço intermediário. O teor de substituição será variável para cada traço;

3ª etapa - ensaio de resistência à compressão;

4ª etapa - desenho do diagrama de dosagem.

3 Comparação entre os métodos nacionais de dosagem de CAA

Com base nos métodos descritos anteriormente, bem como, através de nove critérios, de aspectos qualitativos e das pesquisas apresentadas pelos autores desses métodos, este estudo objetiva compreender melhor os conceitos, utilizados para a elaboração dos métodos, e verificar peculiaridades, semelhanças, vantagens e/ou inconvenientes na utilização de cada um desses métodos.

Nesse sentido, o quadro 1 (Apêndice A) ilustra o estudo comparativo entre os cinco métodos nacionais de dosagem de CAA descritos nas seções anteriores.

Primeiramente, verifica-se uma divisão dos métodos de dosagem em dois grupos. O primeiro grupo, formado pelos métodos Gomes *et al.* de 2002 e Repette e Melo de 2005, avalia as características da pasta, no caso do primeiro método, e da pasta e da argamassa, no caso do segundo método, em termos de fluidez, viscosidade e segregação, conforme itens 2 e 3 do quadro 1 para, posteriormente,

avaliar as características do concreto. Esses métodos estabelecem que as características da pasta ou da pasta e argamassa governam o comportamento do fluxo do concreto.

Outro critério importante desse grupo, conforme item 4 do quadro 1, é a tentativa de extrair o máximo aproveitamento do SP, através da determinação do ponto de saturação. Segundo Melo (2005), ponto de saturação ou teor ideal de SP é o teor máximo de SP capaz de promover o aumento de fluidez; a partir desse teor, efeitos indesejáveis podem comprometer a mistura.

Contudo, no que se refere à determinação do conteúdo ideal de SP, Alencar e Helene (2006 *apud* ALENCAR, 2008, p. 60) tecem a seguinte crítica sobre esses métodos:

Esses passos intermediários e pouco objetivos acabam por gerar procedimento lento e trabalhoso sem fundamento tecnológico nem científico, pois o conteúdo ideal e ótimo do aditivo depende da interação de todos os elementos do traço [...] e isso só é possível quando se produz o concreto.

Pereira (2010) concorda que a reologia do concreto é resultado da interação de todos os componentes, assim como definido por Alencar e Helene (2006), entretanto ressalta que existem relatos de bons resultados de dosagens de CAA, através da otimização em separado da pasta e agregados. O autor argumenta também sobre a possibilidade de uma melhor verificação da compatibilidade entre cimento e SP, quando se avalia somente a pasta ou argamassa através do ensaio de cone de Marsh ou do ensaio de miniabatimento.

Adicionalmente, verifica-se que os métodos do primeiro grupo buscam determinar a melhor proporção dos materiais, desde a etapa de dosagem da pasta até a etapa final de ajuste do concreto, evitando ao máximo o julgamento e a dependência da experiência do profissional responsável pela dosagem.

Alencar e Helene (2006, p. 48) avaliam os métodos dentro deste primeiro grupo analisado:

Os métodos normalmente empregados para dosificação de CAA são complexos e baseiam-se na incorporação de agregados. É definido inicialmente o teor de aditivo com base na saturação da pasta, que é posteriormente ajustado novamente na fase de composição da argamassa e só por fim no concreto; ensaiados em um laboratório bem equipado e com aparelhos muito específicos. Um processo demorado e difícil de ser realizado em planta industrial de pré-moldados ou centrais dosadoras.

Tutikian (2004, p. 80) verifica também a desvantagem de otimizar o concreto de forma fragmentada, ou seja, estudar, em separado, pasta e esqueleto granular como definido no método Gomes *et al.* de 2002:

Mas a divisão em duas partes, que já foi citada como vantagem, também pode ser considerada uma desvantagem, pois o concreto é uma mistura entre diversos materiais que trabalham em conjunto, assim é perigoso quantificar um a um, não considerando a interação entre eles.

Uma diferença importante entre esses dois métodos do primeiro grupo, encontra-se na faixa de resistência à compressão resultante da dosagem. O método Gomes *et al.* de 2002 foi concebido para a dosagem de CAA com resistências mais altas, a partir de 40 MPa, enquanto o método Repette e Melo de 2005 trabalha com faixas próximas de um concreto convencional, entre 20 e 45 MPa.

Os itens 2, 3 e 7 do quadro 1 demonstram que os métodos do segundo grupo, formado pelos métodos Tutikian de 2004, Tutikian e Dal Molin de 2007 e Alencar e Helene de 2006, avaliam o comportamento do concreto como um todo, sem a prévia avaliação das características de fluidez, viscosidade e segregação da pasta e/ou argamassa.

Com relação à correção do teor de argamassa, conforme item 6 do quadro 1, verifica-se que os métodos Tutikian de 2004 e Alencar e Helene de 2006 utilizam o procedimento de dosagem de concreto

convencional, do método do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), como ponto de partida para determinar o teor ideal de argamassa seca do CAA. No método Tutikian de 2004, o teor de argamassa encontrado para o concreto convencional será o mesmo utilizado na dosagem do CAA, portanto, não há ajustes e pode resultar em valores baixos, da ordem de 45%. Já no método Alencar e Helene de 2006, Alencar (2008) sugere iniciar com um teor de argamassa em torno de 53% e, se necessário, para se atingir a trabalhabilidade requerida, pode-se aumentar esse teor. No método Repette e Melo de 2005, o teor de argamassa pode ser ajustado na etapa de escolha do teor de agregado graúdo. Nos métodos Gomes *et al.* de 2002 e Tutikian e Dal Molin de 2007, o teor de argamassa não é ajustado.

O método Tutikian e Dal Molin de 2007 utiliza conceitos de empacotamento para determinação da melhor relação entre as partículas. Dessa maneira, o teor de argamassa de uma mesma família de concretos é variável e depende do empacotamento entre os agregados e finos. É possível observar que o proporcionamento entre agregados e finos é constante para todos os traços, mas, como a porcentagem de cimento varia para cada traço, o teor de argamassa é menor para traços mais pobres e maior para traços mais ricos. Conforme Apêndice A, item 1 do quadro 1, esse é o método do segundo grupo que apresenta o estudo mais aprofundado com relação ao proporcionamento dos materiais. O método Gomes *et al.* de 2002 define a melhor combinação entre agregado miúdo e agregado graúdo, através da determinação da mistura não compactada com o menor índice de vazios e a maior densidade. O método Repette e Melo de 2005 determina a melhor combinação entre areia média e areia fina e entre brita 1 e brita 0. Já no método Alencar e Helene de 2006, o proporcionamento dos agregados restringe-se à combinação de duas classes de agregados graúdos.

Conforme item 8 do quadro 1, todos os três métodos do segundo grupo utilizam os fundamentos do método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) para construção dos diagramas de dosagem do CAA. No método Alencar e Helene de 2006, acrescento-se um quarto (4º) quadrante, relacionando a adição de finos com a relação agregado / cimento (m). Segundo o autor, formulações mais pobres em cimento exigem maior teor de substituição de finos (T), para manter a coesão. No método Tutikian de 2004, acrescentou-se uma curva de custo e o desenho de outro diagrama, denominado “diagrama de desempenho”. No método Tutikian e Dal Molin de 2007, acrescentou-se um quarto (4º) quadrante, relacionando teor de argamassa com consumo de cimento e, como no método anterior, acrescentou-se uma curva de custo e o desenho do “diagrama de desempenho”. O método Repette e Melo de 2005 grafica a “lei de Abrams”, a relação entre a/c e o consumo de filer, a relação consumo de filer e o consumo de cimento, para auxiliar o processo de dosagem.

Pode-se, ainda, verificar que o método Tutikian de 2004 sofreu melhorias, que resultou no método Tutikian e Dal Molin de 2007, conforme relatado por Tutikian (2007, p. 53-54):

Porém, observou-se, durante a dosagem do CAA, que o teor de argamassa ideal é baixo para que a mistura passe pelos obstáculos facilmente.

Outro ponto observado com a prática, onde o método pode ser aperfeiçoado, é em relação à dependência de uma certa experiência do responsável pela dosagem. Isto ocorre, pois o acerto da quantidade de água, do aditivo superplastificante e do porcentual de finos é experimental.

Por fim, ainda há a crítica sobre o fato de o método não contemplar o estudo prévio dos agregados, fazendo com que se determine aleatoriamente a proporção entre duas classes de agregados graúdos, se for do interesse do profissional esta composição.

Mais alguns comentários podem ser feitos em relação ao método Tutikian e Dal Molin de 2007:

- a) a realização de empacotamento das partículas da mistura, resultando em uma relação de proporcionamento entre os materiais, minimiza a tarefa experimental da definição do teor ideal de argamassa, o que ocorre no método Tutikian de 2004 e Alencar e Helene de 2006;
- b) o fato do o teor de argamassa ser menor em traços mais pobres, com menor porcentagem de cimento, vai contra a ideia de Alencar (2008), o qual estabelece que misturas mais pobres necessitam de maior quantidade de finos, para manter a coesão e que as misturas de CAA necessitam de incrementos no teor de argamassa, para a melhora da habilidade passante entre as armaduras;
- c) a grande quantidade de finos, muitas vezes, utilizada nesse método, para a redução do teor de vazios e aumento da compacidade, pode resultar em um abatimento inicial baixo ou, na pior das situações, demandar uma quantidade de água inicial elevada para realização da mistura antes da adição do SP.

Sobre o método Alencar e Helene de 2006, também é possível realizar os seguintes comentários:

- a) o processo de definição do teor ideal de argamassa, teor ideal de substituição, teor de SP e da relação a/agl, através dos diversos ensaios de trabalhabilidade, torna a dosagem dependente da experiência do responsável pela dosagem, assim como o método Tutikian de 2004;
- b) o aumento do teor de argamassa (item 6 do quadro 1) como artifício para

obter uma maior capacidade passante é válida, considerando, no dizer de Castro (2007), como verdadeiro o fato de que, quanto maior o teor de argamassa, maior será a trabalhabilidade do concreto e, particularmente, importante, quando se verifica a perda de trabalhabilidade extremamente rápida dos SP utilizados no mercado. O CAA, dosado dessa maneira, pode apresentar uma característica de autoadensabilidade não tão dependente do SP e de finos.

Quanto à utilização de aditivos plastificantes, conforme item 5 do quadro 1, averiguou-se que somente os métodos Tutikian de 2004 e Tutikian e Dal Molin de 2007 sugerem a utilização desse aditivo, para a obtenção de um maior abatimento inicial, antes da adição do SP, e para alcançar maior eficiência, já que alguns SP, não atingem máximo desempenho em misturas muito secas (com baixo abatimento).

Outro fato importante verificado, conforme item 9, é que todos os métodos de dosagem estudados possibilitam a utilização de materiais finos, pozolânicos ou não pozolânicos, nas misturas de CAA, viabilizando assim a absorção de certos resíduos industriais. Esses materiais finos cumprem uma função importante no estado fresco da mistura do CAA: fornecer resistência à segregação.

4 Considerações finais

Considerando os aspectos levantados nos itens anteriores, pode-se constatar uma divisão dos métodos de dosagem de CAA nacionais em dois grupos. O primeiro grupo, formado pelos métodos de Gomes *et al.* de 2002 e Repette e Melo de 2005, considera a dosagem do CAA, desde a etapa do proporcionamento dos agregados e finos, posteriormente realizando a dosagem da pasta, ou da pasta e argamassa, para,

finalmente, realizar a dosagem do concreto. Esses métodos buscam a dosagem ótima de SP, através do ponto de saturação, o que pode reduzir custos e resultar em uma maior manutenção do efeito do SP sobre a mistura; apresentam um processo de dosagem menos dependente da experiência de quem utiliza o método, pois as etapas de dosagem são mais técnicas, definindo, através de ensaios e diagramas, as dosagens ótimas de SP, finos, cimento e agregados. Podem, contudo, demandar em um número maior de testes e análises e em uma estrutura laboratorial mais bem equipada.

O segundo grupo avalia o CAA como um todo, realizando os ajustes direto na mistura do concreto. Os métodos Tutikian de 2004 e Alencar e Helene de 2006 utilizam o conceito de ajuste de coesão, através de substituição do cimento ou areia média, conforme o fino a ser utilizado. Portanto, esses dois métodos são muito parecidos, visto que partem de uma mistura inicial de concreto convencional e vão realizando ajustes e ensaios neste até resultar no CAA. Adicionalmente, verifica-se a necessidade de alguma experiência do responsável, durante esse processo iterativo da transformação, já que são diversos ajustes e ensaios realizados durante a dosagem do CAA e, em função da rápida perda de efeito do SP, gera a necessidade da redosagem do SP.

O método Tutikian e Dal Molin de 2007 utiliza o conceito de empacotamento para encontrar o menor índice de vazios da mistura e, assim, determinar o teor de argamassa. Verifica-se que esse método de dosagem, ao contrário dos outros métodos do mesmo grupo, dificilmente, necessita de ajustes durante a dosagem. A metodologia de realizar a combinação entre todos os agregados torna a mistura muito pouco segregável, portanto, o procedimento resume-se em combinar os agregados, definir os traços-base e adicionar o SP até a mistura atingir a trabalhabilidade requerida.

Por fim, é possível sugerir o estudo experimental desses métodos, verificando as vantagens e desvantagens com o enfoque prático da dosagem, visto a limitação de ordem teórica apresentada neste artigo.

Referências

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem de concreto autoadensável**: produção de pré-fabricados. 2008. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19092008-161938/pt-br.php>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

ALENCAR, R. S. A.; HELENE, P. R. L. Concreto autoadensável de elevada resistência: Inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. **Revista Concreto e Construções**, ano 34, n. 43, p. 43-52, jun./ago. 2006. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/rev_construcao_43.htm>. Acesso: 25 nov. 2011.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-04032008-082549/pt-br.php>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. 2002. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

FOCHS, R. G. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://tede.pucrs.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3753>. Acesso em: 25 nov. 2011.

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

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filler calcário**. 2005. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibra de lã de rocha ou poliamida**. 2010. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2010ME_TobiasAzevedodaCostaPereira.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2011.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3918/000450678.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

_____. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis.** 2007. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11309/000611153.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

_____; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável.** São Paulo: Pini, 2008.

APÊNDICE A

Quadro 1: Comparação entre os métodos nacionais de dosagem de CAA

| Método | Critério em aspecto avaliado | Métodos nacionais de dosagem de CAA | | | | |
|--------|--|-------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------|
| | | Gomes et al. de 2002 | Respette e Melo de 2005 | Tutidiam de 2004 | Tutidiam e Dal Molin de 2007 | Alencar e Helena de 2006 |
| 1 | Busca o melhor proporcionamento dos agregados através da redução do volume de esboços entre as partículas. | SIM | SIM | NÃO | SIM | SIM |
| 2 | Avalia e ajusta indiretamente a viscosidade e fluidez da pasta. | SIM | SIM | NÃO | NÃO | NÃO |
| 3 | Avalia e ajusta indiretamente a viscosidade e fluidez da argamassa. | NÃO | SIM | NÃO | NÃO | NÃO |
| 4 | Determina o ponto de saturação de SP. | SIM | SIM | NÃO | NÃO | NÃO |
| 5 | Utiliza plastificante para melhoria da trabalhabilidade do concreto antes da adição do SP. | NÃO | NÃO | SIM | SIM | NÃO |
| 6 | Corrige o teor de argamassa com objetivo de aumentar a trabalhabilidade do CAA. | NÃO | SIM | NÃO | NÃO | SIM |
| 7 | Considera as características de fluidez, viscosidade e coesão do concreto como um todo, sem avaliar pasta e argamassa em separado. | NÃO | NÃO | SIM | SIM | SIM |
| 8 | Utiliza algum tipo de diagrama para estimar futuras dosagens de CAA. (*critério ou aspecto não identificado na literatura pesquisada). | * | SIM | SIM | SIM | SIM |
| 9 | Utiliza finos pozolânicos ou não pozolânicos na mistura com intuito de aumentar a estabilidade e evitar a segregação. | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM |

Fonte: Os autores (2012).