

Verificação da existência de propriedades autoadensáveis em concretos de alto desempenho, através de ensaios experimentais.

Investigation of the existence of self compacting properties in high performance concrete through experimental tests

Thalmus Magnoni Fenato¹; Berenice M. Toralles Carbonari²;
Francisco M. Leite³; Heitor H. Yoshida⁴

Resumo

O concreto auto adensável (CAA) é caracterizado pela capacidade de fluir pelo interior da fôrma e preenche-la unicamente pela força da gravidade, com coesão e viscosidade adequadas, de forma que não ocorra a segregação. Uma característica é a presença de finos (os quais conferem a coesão necessária) e de grãos com diâmetro máximo de 20 mm. Este trabalho apresenta alguns procedimentos e métodos experimentais que possibilitam a avaliação de propriedades de autoadensabilidade em concretos de alto desempenho, visto que o concreto em estudo possui grãos menores que 20 mm e em sua massa, há a presença de finos (pó-de-brita, sílica ativa e cinza volante), fatores que definem as propriedades auto adensáveis. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do tema e posteriormente, foram fabricados os equipamentos para realização dos ensaios, a fim de se verificar as propriedades relativas à autoadensabilidade: coesão, viscosidade e segregação. Para o trabalho, foram produzidos dois concretos, ambos produzidos com Cimento Portland ARI, areia grossa, brita 0, pó-de-brita, superplastificante a base de cadeias de éter-carboxilatos, mas diferenciaram-se um do outro pela presença de adição mineral, sílica ativa ou cinza volante. A partir dos resultados obtidos, foi verificado se os concretos de alto desempenho produzidos possuíam características de autoadensabilidade e, neste caso, os dois foram positivos. Também foi analisado o comportamento desses concretos no estado endurecido, através da resistência à compressão. A verificação desses parâmetros quantitativos indica se o material em estudo pode ser empregado como auto adensável, conseguindo o desempenho esperado desse tipo de concreto. O CAA possui uma série de vantagens, como, por exemplo: a redução de mão-de-obra; a não utilização de vibrador e o preenchimento de fôrmas com elevada densidade de armadura ou de geometria complexa.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Concretos especiais. Superplastificantes. Adições minerais.

Abstract

The self compacting concrete is characterized by its capacity to flow inside the formwork filling it exclusively by the force of the gravity with adequate cohesion and viscosity in such a way that segregation does not occur. One of its characteristic is the presence of fines which provide the necessary cohesion,

¹ Engenheiro Civil. Plaenge Empreendimentos. E-mail: tmagnoni_2@yahoo.com.br.

² Doutora pela Universidad Polytecnica de Catalunya, Espanha; Chefe Departamento de Construção Civil – Dcci-UEL, Professora Departamento Construção Civil – Dcci/Uel, Universidade Estadual de Londrina, Londrina – PR. E-mail: btoraes@uel.br

³ Professor Departamento construção civil – Dcci/Uel, Aluno mestrado UEL, Universidade Estadual de Londrina - UEL

⁴ Aluno do curso de graduação de engenharia civil, Pesquisador bolsista de Iniciação Científica pela IC – UEL, Universidade Estadual de Londrina - UEL

and grains with maximum diameter of 20 mm. This work presents some procedures and experimental methods that make it possible to evaluate self compacting properties of high performance concrete. First, a bibliographical review on the subject was carried out, and later, the equipment used for the accomplishment of the assays were manufactured, in order to verify the properties related to the self compacting concrete: cohesion, viscosity and segregation. As for the work, two concretes were produced with Portland ARI Cement, thick sand, stone powder, sand 0, superplasticizer made of ether-carboxilate chains that differentiate from each other for the presence of active silica in one of them and fly ash in the other. Based on the results, it was verified whether the high performance concrete had self compacting characteristics. In this case, both were considered positive. It was also analyzed the behavior of these concretes in their hardened state by means of the compressive strength test. The Self Compacting Concrete has many advantages such as: reduction in the number of employees, shorter construction period, the non-use of the vibrator and the filling of formworks with high density of... or of complex geometry.

Key words: Self compacting concrete. High performance concrete. Superplasticizer.

Introdução

O concreto auto adensável foi introduzido no mercado há cerca de dezessete anos, pelo professor Okamura (GETTU; AGULLÓ, 2003), da Universidade de Tóquio.

Esse tipo de concreto tem mostrado grandes vantagens, as quais têm sido cada vez mais exigidas no âmbito da construção civil. Dentre elas, salientam-se: ritmos acelerados de construção, a fim de diminuir o tempo de execução; a preocupação com o meio ambiente e condições de saúde adequadas aos trabalhadores.

Ao relacionar as vantagens do CAA, mediante essas exigências, pode-se citar as seguintes: a redução considerável do tempo de execução da obra, pois elimina-se a etapa de vibração e espalhamento; facilidade na concretagem de elementos mais complexos e de difícil execução, devido à capacidade de vencer obstáculos. No aspecto ambiental cabe citar a redução de ruídos, mediante a retirada da etapa de vibração, o que traz benefícios ao ambiente do trabalhador (principalmente na indústria de pré-fabricação) e também à vizinhança exposta ao ruído.

Com o reconhecimento dos benefícios trazidos por este concreto nas obras já realizadas, o interesse do setor da construção tem crescido significativamente nos últimos anos. No Japão e também Europa se constróem desde túneis, pontes de grande extensão, edifícios altos e até elementos pré-fabricados. O grande desenvolvimento da indústria de pré-moldados tem solicitado cada vez mais a utilização de concretos auto adensáveis (GETTU; AGULLÓ, 2003).

Este trabalho tem o objetivo geral de verificar a autoadensabilidade de concretos de alto desempenho, produzidos com agregados existentes na região de Londrina-PR e fabricar equipamentos para viabilizar a verificação das propriedades de autoadensabilidade dos concretos, por meios de ensaios experimentais.

Breve Histórico

O concreto auto adensável foi desenvolvido pelo professor Okamura, da Universidade de Tóquio. Em 1983, os pesquisadores da área de concreto do Japão já buscavam uma solução para melhorar a durabilidade do concreto. Sendo assim, chegaram à conclusão de que, para se obter um concreto de boa durabilidade era necessário conseguir uma boa compactação do material e, para isso, deveria haver uma boa qualidade de mão-de-obra. Na época, o país não contava com a mão-de-obra especializada o suficiente para a obtenção do concreto desejado. Então, foi proposto pelo Professor Okamura que se desenvolvesse um concreto que se compactasse unicamente pelo seu peso próprio, sem necessidade de vibração. A idéia era conseguir uma fluidez tal que o material preenchesse as fôrmas e passasse por entre as armaduras, mesmo que elas fossem densas. Os objetivos a serem atingidos eram: um concreto auto adensável, no estado fresco, e proteção contra fatores externos, após a cura total. Em 1986, essa idéia foi proposta e em 1988, surgiu o concreto autoadensável.

Propriedades

As características básicas do concreto auto adensável são: alta fluidez e resistência à segregação, sendo necessária a existência de coesão e viscosidade.

Pode-se dizer que a fluidez é a capacidade de deformação, do concreto, no estado fresco. E esta a propriedade é que capacitará o concreto para preencher todos os espaços das fôrmas e fazê-lo se espalhar. A viscosidade e coesão farão com que haja a interação entre os agregados graúdos e a argamassa e não permitirão que estes se separem.

O que mais influencia as propriedades citadas anteriormente é o tamanho do agregado e, principalmente, a presença de finos.

Na composição granular do concreto observam-se vazios entre os agregados graúdos (OKAMURA; OUCHI, 2003). Devido a essa falta de material, ocorre a colisão entre os agregados, gerando o atrito. Isso origina um aumento de tensão interna localizada. A tensão gerada pela fluidez do concreto absorve a energia que daria continuidade ao escorrimento do material, fazendo-o perder a capacidade de fluir por um espaço mais longo. Então, a energia que seria dissipada pelo andamento do material, é absorvida pelo atrito gerado nas colisões. Ao dissipar-se a energia, além de diminuir a fluidez, os agregados são bloqueados no meio do caminho, ou seja, não encontram a energia necessária que os levaria mais adiante. Esse fato pode causar a segregação e levar o concreto a acumular e desprender-se da argamassa.

Para conter o acréscimo de tensão interna, é recomendada a introdução dos finos na argamassa. Esses materiais de pequeno tamanho alojam-se entre os agregados graúdos, amortizando a colisão entre eles, diminuindo o atrito e, conseqüentemente, a possibilidade de um acréscimo de tensão interna.

Portanto, a introdução de finos na matriz gera um acréscimo de argamassa. Decorre que, com o aumento de argamassa, os agregados são envolvidos por ela e, além de ficarem menos favoráveis às colisões, cria-se uma força que os prende na argamassa, podendo ser chamada de coesão. Essa propriedade está diretamente relacionada à viscosidade do material.

Devido ao envoltório de argamassa sobre os agregados graúdos, há a diminuição do deslocamento relativo entre eles, mediante a passagem de obstáculos, como por exemplo, armaduras. Essa diminuição de deslocamento relativo significa que o material está coeso e viscoso suficientemente para não permitir a segregação. Se os deslocamentos relativos fossem grandes, resultaria que não houve uma homogeneização dos agregados, durante a movimentação do concreto, e sim a segregação.

A argamassa também gera uma propriedade, que se chama transferência de tensão (OKAMURA; OUCHI, 2003). A tensão normal dos agregados é transferida para a argamassa e conseqüentemente, amortizada. O grau de diminuição da tensão de cisalhamento está diretamente relacionado com as características físicas dos agregados graúdos, como, por exemplo, o formato.

É importante observar a diferença entre o concreto fluido e o auto adensável. Para um concreto ser chamado de auto adensável, este deve possuir alta fluidez e ser resistente à segregação, ou seja, ser coeso e viscoso e ao mesmo tempo, tendo alta fluidez.

Materiais

Em relação aos materiais, os concretos auto adensáveis diferenciam-se dos convencionais, porque no auto adensável é necessário a utilização de aditivos superplastificantes, finos (pó-de-brita, sílica ativa, cinza volante, etc.) e modificadores de viscosidade em alguns casos.

Abaixo seguem algumas recomendações encontradas na literatura.

Agregados – além das recomendações gerais (estarem isentos de matéria orgânica e, preferencialmente, terem granulometria contínua), só há uma restrição: os agregados graúdos devem ter dimensão máxima de 19 mm (GETTU; AGULLÓ, 2003) O seu tamanho tem grande influência na propriedade de capacidade de passagem por obstáculos e na homogeneidade durante o escorrimento. Além disso, os agregados interferem na segregação e exsudação, mas o efeito é amenizado na presença de argamassa em torno deles.

Finos – esses materiais, juntamente com a areia, formam a argamassa. São materiais muito finos, geralmente de dimensões entre 90 a 125 micras (GETTU; AGULLÓ, 2003). Podem ser utilizados como finos: cinza volante, sílica ativa, pó de quartzo, etc. Os finos têm a capacidade de reter a água da pasta e também reduzem o consumo de cimento, por substituição. Cabe salientar que, mesmo com essa substituição, o consumo de cimento, no concreto auto adensável, tende a ser mais elevado, se comparado ao concreto convencional. Okamura e Ouchi (2003) recomenda que seja feito um ajuste experimentalmente na relação água/finos devido às propriedades características de cada tipo de material.

Aditivos Superplastificantes – esse material é responsável pela fluidez do concreto, e assim permite uma redução significativa, na relação água/finos. A água, além de ser responsável pela reação de hidratação, confere ao concreto trabalhabilidade, porém, quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade e, portanto, se torna mais permeável. O emprego do aditivo superplastificante permite que a relação água/cimento seja diminuída, sem que o concreto perca sua fluidez. Isso se dá devido às forças de atração e repulsão do cimento, conferidas pelo aditivo. O superplastificante à base de copolímeros e em particular, de éter de policarboxilatos, cria uma camada de adsorção de grande volume ao redor das partículas de cimento. Essa camada de adsorção é formada por longas cadeias e ramificações, as quais por repulsão eletrostática não permitem que as partículas de cimento se agreguem, ou floculem, mantendo assim, a alta fluidez. A repulsão eletrostática é responsável pela diminuição da água na mistura, pois mesmo com menor quantidade de água garante a dispersão das partículas de cimento hidratado. Okamura e Ouchi (2003) recomenda também que seja feito um teste experimental, antes do uso do aditivo, e que se analise qual é a melhor proporção encontrada para a viscosidade e fluidez desejada. Para cada marca de aditivo pode haver uma dosagem diferente.

Agentes Modificadores De Viscosidade (AMV) – “são aditivos químicos que melhoram

substancialmente a coesão do concreto” (GETTU; AGULLÓ, 2003). Este tipo de aditivo nem sempre é necessário. Os AMV proporcionam a obtenção de um concreto altamente fluido e estável, sem segregação e exsudação, sendo essas propriedades importantes, principalmente, para concretos bombeados. O desempenho dos AMV é influenciado pela quantidade de cimento, temperatura e módulo de finura dos finos (GETTU; AGULLÓ, 2003). Esse tipo de material só gerará um resultado eficiente se for compatível com os demais aditivos utilizados, podendo causar vários problemas nas propriedades dos concretos auto adensáveis. Segundo Gettu e Agulló (2003) eles são divididos em três classes: A – polímeros orgânicos sintéticos ou naturais, solúveis em água; B – floculante orgânicos, solúveis em água; e C – emulsões. Neste trabalho, não se fez necessário o seu uso.

Os demais materiais seguem as recomendações gerais aos concretos convencionais e de alto desempenho. Além disso, para a escolha do tipo de cimento é necessário considerar a característica do projeto.

Dosagem

Existem vários métodos de dosagem para a produção do concreto auto adensável, mas neste trabalho não há interesse em descrevê-los. A seguir, estão relacionadas algumas recomendações para a dosagem de concretos auto adensáveis.

Segundo Okamura e Ouchi (2003) A porcentagem recomendada de agregado graúdo (em volume sólido total) é de 50% e para obter essa proporção, deve-se somar o volume de todos os componentes sólidos; cimento, areia, etc e depois multiplicar essa soma por 50%. O resultado obtido é a quantidade de agregado graúdo que deve ser adicionado à mistura. Para os finos, é recomendado 40% do volume de argamassa (a argamassa é composta pelo cimento, areia e água). O volume totalizado pela mistura dos componentes da argamassa deve ser multiplicado por 40%, e o resultado obtido é a quantidade que deve ser adicionada de finos. Há vários tipos de finos, como, por exemplo, sílica ativa, cinza pozzolônica, e outros mais.

Relação Água/finos – 0,9 a 1,0 (em volume). É necessário saber qual o volume de finos para obter a quantidade de água, ou vice-versa. Por exemplo: uma relação a/c de 0,4, consumo de cimento de 350kg/m³, ter-se-ão 140 litros de água. Se as recomendações do professor Okamura forem seguidas, e a relação a/f for fixada em 0,95, deverá-se adicionar à mistura 133 litros de finos. Considerando que o fino utilizado seja a cinza volante de massa específica 2350 kg/m³, deverão ser acrescentados à mistura 312,5 kg de cinza volante.

Aditivo Superplastificante: Segundo o Professor Okamura, a dosagem de aditivo superplastificante varia com a marca e com os materiais relacionados. Sendo assim, testes prévios devem ser realizados, considerando-se as características de auto adensabilidade exigidas para o tipo de concreto desejado.

Segundo Gettu e Agulló (2003) estabelece faixas de consumos de materiais para produção de concretos auto adensáveis, conforme pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa das quantidades de materiais para a produção de um concreto auto adensável.

| Constituintes | Composição | | |
|---------------|--------------|-----------|-------------------|
| FINOS | Finos | 450 - 600 | kg/m ³ |
| | Cimento | 200 - 400 | kg/m ³ |
| ÁGUA | Água | 160 - 200 | kg/m ³ |
| | Água/cimento | 0,5 - 1,0 | Em massa |
| | Água/finos | 0,9 - 1,0 | Em volume |
| AGREGADOS | Areia/brita | 1 | Não citado |

A Tabela 1 apresenta algumas recomendações de intervalos de quantidade de materiais, com os quais se consegue atingir um concreto auto adensável.

As quantidades de finos, cimento e água estão em massa (kg) para a produção de um metro cúbico de concreto, e as relações a/c e a/f em massa e volume, respectivamente. O autor recomenda que a quantidade de superplastificante seja testada na trabalhabilidade da argamassa, e o valor ideal de superplastificante é aquele o qual resulta uma trabalhabilidade previamente definida e esperada. Para definir a trabalhabilidade da argamassa, devem ser realizados ensaios.

Gettu e Agulló (2003) apresenta, conforme a Tabela 2, os consumos de materiais de concreto auto adensável de resistência convencional (<30MPa).

A Tabela 2 apresenta um resumo de consumo de materiais, para produção de concreto auto adensável, a partir de estudos de vários autores.

Na Tabela 2, verifica-se que os diversos autores, ao tratarem do concreto auto adensável de 30MPa, mencionam uma variação razoável nos consumos dos materiais. As resistências obtidas superam em muito a desejada, e isso confirma a necessidade de mais estudos para a produção de concretos autoadensáveis de resistências convencionais. Os estudos devem sempre estar baseados nos materiais regionais e serem um ponto de partida para a execução em obra desse tipo de concreto.

Tabela 2. Quantidade de materiais para a produção de um concreto auto adensável de resistência normal, segundo vários autores.

| Materiais (Kg/m ³) | | | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cimento | 218 | 350 | 370 | 280 | 380 | 300 | 450 |
| Cinzas volantes | 125 | - | 159 | - | - | 148 | - |
| Escórias | 280 | - | -- | - | - | 63 | - |
| Filler Calcário | - | 134 | | 240 | 20 | - | 100 |
| Areia Grossa | 686 | 852 | 782 | 865 | 900 | 928 | 840 |
| Agregado graúdo | | | | | | | |
| máximo 10 mm | | 363 | - | - | - | - | - |
| máximo 16 mm | | - | - | - | 800 | - | - |
| máximo 20 mm | 785 | 571 | 820 | 750 | - | 718 | 770 |
| Superplastificante | 8,2 | 7,1 | 10 | 4,2 | 4 | 8,2 | 9,6 |
| AMV | | - | - | - | 2 | - | - |
| Aditivo Incorporador ar | 0,8 | - | - | - | - | - | - |
| Relação A/C | 0,82 | 0,48 | 0,5 | 0,71 | 0,53 | 0,57 | 0,33 |
| Relação água/finos | 0,28 | 0,34 | 0,35 | 0,36 | 0,5 | 0,4 | 0,27 |
| Resit. Comp 28 dias (Mpa) | n.d | 50 | 47 | 47 | 48 | 41 | 50 |

Fonte: adaptado de (GETTU, 2003)

n.d. – dados não disponíveis

Consumos de materiais de concreto auto adensável de alta resistência

Observa-se na tabela 3, que para a obtenção de concretos auto adensáveis de alta resistência, os consumos de cimento aumentam consideravelmente. Já a relação a/c, para os vários autores, permanece em torno de 0,35.

Porém, observa-se que para os diversos autores, as resistências à compressão apresentam um desvio padrão de 8,92 MPa, mesmo com a relação a/c em torno de 0,35. Isso reafirma a necessidade de estudos considerando o tipo e a origem dos diferentes materiais empregados.

Tabela 3. Quantidade de materiais para a produção de um concreto auto adensável de alta resistência, segundo vários autores.

| Materiais (Kg/m ³) | Nishizaki et | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Cimento | 515 | 405 | 505 | 432 | 465 | 458 | 501 |
| Sílica Ativa | - | - | - | 43 | - | - | - |
| Cinzas Volantes | - | - | - | - | - | 275 | 200 |
| Filer Calcáreo | 70 | 121 | 75 | 130 | 186 | - | - |
| Areia | 737 | 895 | 861 | 791 | 791 | 744 | 771 |
| Brita, máx 12/16 mm | - | - | - | 834 | 834 | 696 | 721 |
| Brita, max 20/24mm | 789 | 732 | 882 | - | - | - | - |
| Superplastificante | 9 | 3,4 | 12,8 | 16 | 12 | 8 | 10 |
| AMV | - | - | 0,1 | - | - | - | - |
| Relação Água/cimento | 0,33 | 0,4 | 0,37 | 0,4 | 0,35 | 0,4 | 0,35 |
| Relação água/finos | 0,29 | 0,31 | 0,32 | 0,29 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Resist. Compressão há 28 dias (Mpa) | 60 | 69 | 80 | 63 | 56 | 68 | 78 |

Fonte: adaptado.de (GETTU, 2003).

Ensaio para caracterização de concretos auto adensáveis.

Para a caracterização do concreto é necessária a quantificação de propriedades auto adensáveis. Essa quantificação é uma avaliação qualitativa e visual das propriedades auto adensáveis. Como citadas anteriormente, o concreto para ser auto adensável tem que possuir alta fluidez, ao mesmo tempo ter coesão e viscosidade para que não haja segregação e nem exsudação.

A fluidez é facilmente quantificável, porém a coesão e viscosidade estão correlacionadas com a fluidez, capacidade de passagem por obstáculos e também com a segregação, que na maioria dos ensaios é analisada visualmente. A exsudação, embora avaliada visualmente, é muito fácil de ser identificada.

A seguir serão descritos os equipamentos e ensaios utilizados nesse trabalho. Todos estão baseados nas recomendações de Gettu et al. (2004) e Bárragan et al.(2004).

Extensão do fluxo

O ensaio avalia a fluidez do concreto pelo seu peso próprio e a segregação, a Figura 1 mostra os equipamentos necessários e suas dimensões, para a realização do ensaio de extensão de fluxo. É necessário utilizar um cronômetro, um cone de Abrams, uma chapa de metal de dimensão de 80x80 cm. Na chapa metálica deve-se inscrever dois círculos, um de diâmetro de 30 cm e outro de 50 cm.

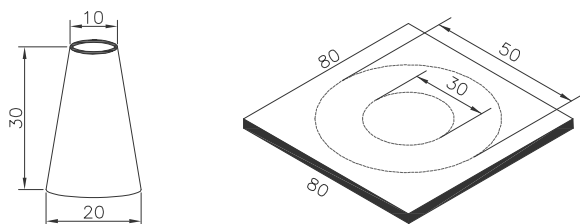


Figura 1. Equipamento para realização de ensaio de extensão de fluxo.

Para a realização do ensaio, deve-se umedecer a superfície, sem deixar película de água sobre ela; colocar o cone centralizado na circunferência de 30 cm; enche-lo de concreto; o concreto não deve ser compactado; retirar o cone de forma cuidadosa e contínua; marcar o tempo que o concreto leva para atingir a circunferência de 50 cm e medir o diâmetro do concreto espalhado, em duas direções.

Neste ensaio, os resultados esperados são:

$$1 < T_{-50} < 10s$$

$$60 < df < 80cm$$

Onde:

t-50 – tempo que o concreto leva para chegar até a circunferência de 50 cm de diâmetro.

df – diâmetro final (média dos dois diâmetros medidos).

| | |
|------------|-------------------------|
| SEGREGAÇÃO | Se os agregados graúdos |
| | |

Quadro 1. Análise de segregação e exsudação

Recomenda-se repetir o ensaio, quando os diâmetros diferem de 5 cm um do outro. Não é recomendado para concretos com agregados maiores que 40 mm.

Caixa em L

No ensaio da Caixa em L, avalia-se a facilidade que o concreto tem de passar por obstáculos. Neste ensaio quantifica-se o bloqueio e a fluidez, a segregação pode ser avaliada visualmente.

Para a realização deste ensaio, faz-se necessário a utilização de 2 cronômetros e uma caixa em forma de L. Na saída da caixa, deve-se colocar um aparato com barras metálicas, separadas entre si de no máximo 3 vezes a dimensão máxima do agregado.

Após a porta de saída devem-se marcar duas linhas, uma a 20 cm e outra a 40 cm, a partir da portinhola de saída. Essa portinhola segura o concreto na posição vertical e quando aberta, o concreto é liberado para o fluxo horizontal.

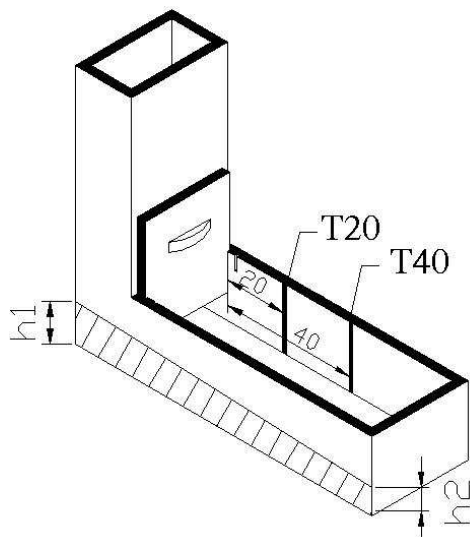


Figura 2. Caixa em L

Para o bom procedimento do ensaio deve-se: umedecer as paredes com um pano úmido; colocar o concreto dentro da parte vertical e deixá-lo por 10 segundos; abrir a portinhola rapidamente; marcar o tempo que o concreto leva para atingir a linha de 20 cm (T-20) e a de 40 cm (T-40) e medir as alturas internas (h1) e externa (h2).

Os resultados esperados neste ensaio seguem-se:

$$T - 20 < 1,5s$$

$$T - 40 < 2,5s$$

$$h2/h1 > 0,80 - \text{Satisfatório}$$

$$h2/h1 < 0,60 - \text{Somente Elementos Estruturais.}$$

| | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |

Quadro 2. Análise de resistência à segregação

Funil em V

O objetivo é avaliar a fluidez do concreto em áreas restringidas, através de seu peso próprio.

A Figura 3 mostra o equipamento funil em V, necessário para o ensaio. Além dele, é necessário o uso de um cronômetro. As dimensões do funil em V estão descritas mais adiantes, neste trabalho.

O procedimento para realização desse ensaio é bem simples deve-se: umedecer o interior do funil com um pano úmido; encher o funil de concreto; abrir a portinhola; medir o tempo em que o concreto demora a esvaziar o funil (Tp).

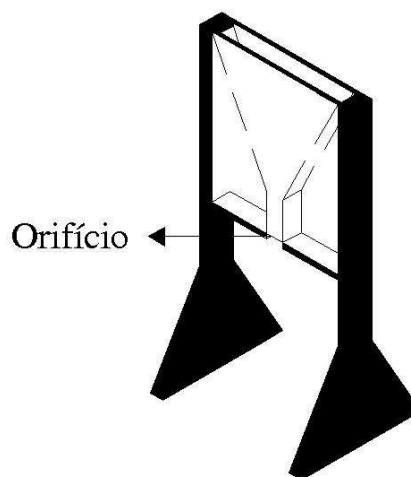


Figura 3. Funil em V

O tempo de passagem de todo o material contido no funil, pela portinhola de saída deverá ser:

$$5s < T_p < 25s$$

Anel Japonês

Este ensaio tem como objetivo avaliar a capacidade de passagem por obstáculos e a fluidez.

A Figura 4 mostra o anel japonês, sendo necessários para a realização do ensaio: uma régua metálica, um cone de Abrams, uma chapa metálica 80x80 cm, um anel com barras espaçadas entre si de no máximo três vezes o diâmetro do agregado.

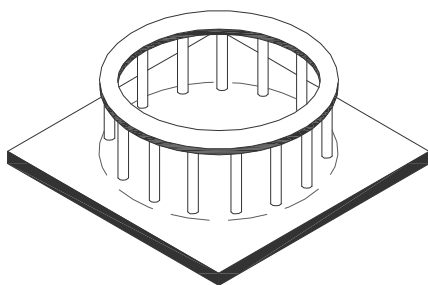


Figura 4. Anel Japonês

Para sua realização, é necessário umedecer a chapa com um pano úmido; centralizar o anel; centralizar o cone de Abrams, dentro do anel; encher o cone de concreto; retirar o cone de forma cautelosa e contínua, sem bater no anel; medir três alturas internas ao anel (h_1) e três externas (h_2), calculando a média de cada uma das alturas; medir a extensão do diâmetro final do concreto (tirar duas medidas em duas direções).

Os resultados esperados são:

$$h_1 - h_2 \leq 10 \text{ mm (} h_1-h_2 \text{ em módulo)}$$

$$L_f \geq L - 5 \text{ mm}$$

L_f – extensão final do ensaio de escorrimento com a presença do anel

L – extensão final do ensaio de escorrimento sem a presença do anel

h_1 – altura interna

h_2 – altura externa

Materiais e Métodos

Materiais

Os materiais empregados para a produção do concreto, neste trabalho, estão relacionados no Quadro 3.

Os agregados utilizados são todos encontrados na região de Londrina – PR.

| Materiais | Massa Específica (g/cm ³) |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Areia grossa | 2,61 |
| Brita 0 - basalto | 2,96 |
| Pó-de-brita - basalto | 2,91 |
| Brita 1 - basalto | 2,99 |
| Cimento Portland ARI V - CAUÊ | 3,14 |
| Sílica ativa | 2,22 |
| Cinza volante | 2,35 |
| Glenium 51 (superplastificante) | 1,06 |
| Água | 1 |

Quadro 3. Massas Específicas (g/cm³) dos materiais utilizados

Método

Para atingir o objetivo proposto, foram produzidos dois concretos de alto desempenho, um com sílica ativa e outro com cinza volante. Ambos foram fabricados em betoneiras de eixo inclinado e tiveram as propriedades auto adensáveis testadas imediatamente após a fabricação. Para esses concretos, também foi verificada a resistência à compressão e a massa específica aparente.

Produção dos concretos.

A produção dos concretos foi feita em dois dias consecutivos, tendo seu início marcado para as seis horas da manhã, para que a temperatura não influenciasse os resultados.

Primeiramente, foi colocado o cimento simultaneamente com a cinza volante, ou a sílica ativa, dependendo do concreto que estava sendo fabricado. Esses dois materiais foram misturados na betoneira com 80% da água de amassamento e, após dois minutos, foi colocado o aditivo superplastificante. Posteriormente à colocação desses materiais, procedeu-se a mistura na betoneira por nove minutos, para que o superplastificante começasse a agir. Após os nove minutos, sempre com a betoneira em movimento, foi introduzido o pó-de-brita, seguido da areia, da brita zero e por último os 20% restantes de água e 20% do superplastificante, misturou-se por mais nove minutos e, após esse tempo, inicia-se a caracterização da massa específica e a execução dos ensaios de verificação da auto adensabilidade dos concretos.

Na tabela 4, encontra-se os consumos dos materiais utilizados na fabricação dos concretos.

Tabela 4. Consumo de materiais (kg/m³) do concreto de alta resistência com cinza volante e brita zero - B0CV e sílica ativa e brita zero – B0SA

| | BOCV | | M. Esp. | Massa |
|-----------------|---------|--------|---------|--------|
| | M. Esp. | Massa | | |
| cimento CPV ARI | 3,14 | 552,22 | 3,14 | 550,20 |
| Cinza volante | 2,35 | 55,22 | - | - |
| Sílica Ativa | - | - | 2,22 | 55,00 |
| Glenium 51 | 1,06 | 7,360 | 1,06 | 7,340 |
| areia grossa | 2,61 | 617,89 | 2,61 | 617,89 |
| pó-de-brita | 2,91 | 617,89 | 2,91 | 617,89 |
| brita ZERO | 2,96 | 529,67 | 2,96 | 529,67 |
| água | 1,00 | 165,67 | 1,00 | 165,51 |

Execução dos Equipamentos e Realização dos Ensaios de Verificação de Propriedades de Auto Adensabilidade.

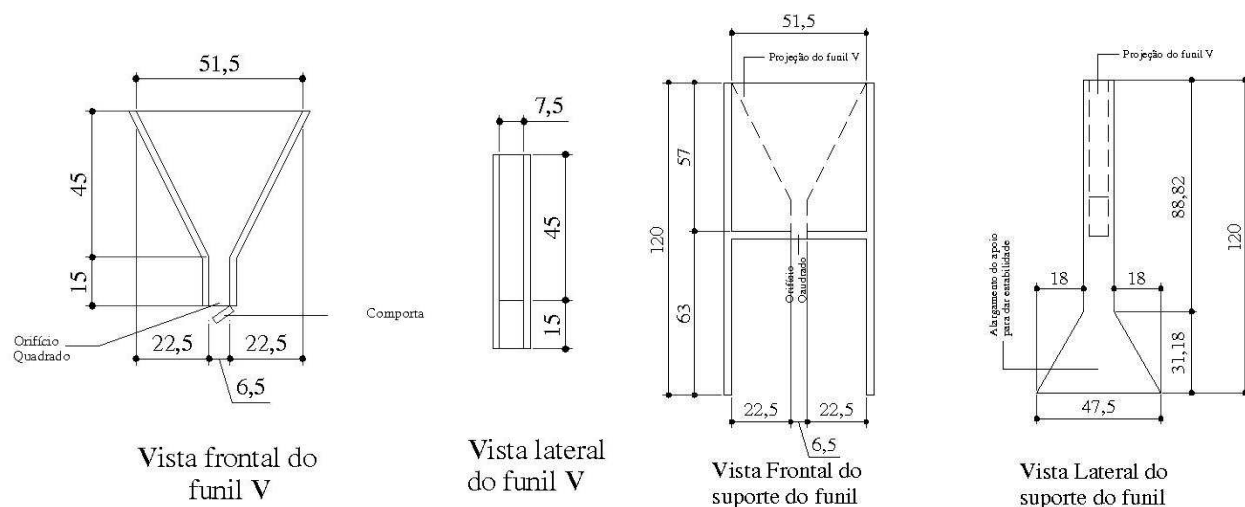
Os equipamentos (caixa em L e funil em V) foram produzidos em madeira. A caixa em L é desmontável, para facilitar sua limpeza e manutenção. O anel japonês é de aço tem diâmetro de 50 cm, possui barras com altura de 10 cm,

diâmetro de 10 mm e distância entre cada uma de aproximadamente 4,0 cm. Essas barras são rosqueadas em porcas soldadas ao longo da circunferência do anel.

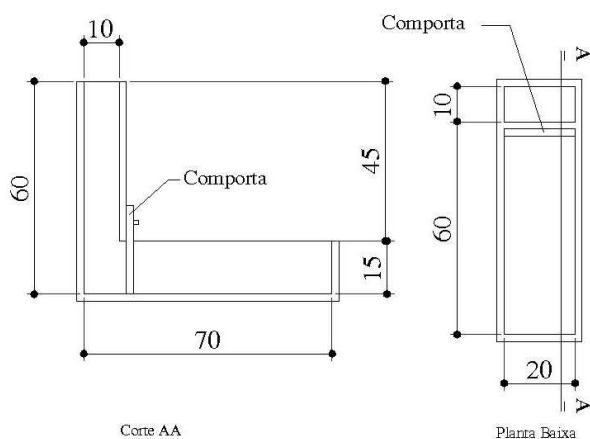
O cone de Abrams é de metal e não foi necessária sua fabricação.

As dimensões do funil em V e da caixa em L estão descritos abaixo:

Cone em V



Caixa em L



Antes de iniciar os ensaios o concreto foi pesado, a fim de encontrar sua massa específica aparente.

Os ensaios realizados foram em ordem de procedimento: ensaio de fluxo, utilizando o cone de Abrams, caixa em L, funil em V e, por último, anel japonês. Os procedimentos utilizados para a realização dos ensaios citados acima estão descrito no item 2.5, deste trabalho.

Após a realização desses ensaios, foram moldados 6 corpos de provas cilíndricos ($\varnothing 10\text{cm} \times h=20\text{cm}$) para cada tipo de concreto, para a realização de ensaios de resistência à compressão, segundo a norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Após um dia da moldagem dos corpos-de-prova, foi realizado o ensaio de resistência à compressão em três espécimes. Este ensaio também foi realizado, ao sétimo dia, em três corpos de provas. Os resultados desses ensaios são mostrados na tabela 9.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de resistência à compressão foi uma prensa hidráulica, da marca EMIC, com capacidade de carga de 1.200 KN e nível de leitura para cada 2 KN.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LabMat), da Universidade Estadual de Londrina-PR. Este laboratório não possui controle de temperatura. Entretanto, as temperaturas médias no momento em

que o concreto estava sendo produzido, foram medidas e encontram-se na Tabela 7.

Resultados dos Ensaio de Auto Adensabilidade e de Resistência à Compressão

Os resultados dos ensaios de auto adensabilidade e de resistência à compressão, encontram-se descritos nas tabelas abaixo.

Tabela 5. Resultados do Ensaio de Resistência à compressão e Massa Específica Aparente

| TRAÇO | idade | Média (MPa) | Massa Específica Aparente(g/cm ³) |
|-------|-------|-------------|---|
| BOCV | 1 | 41,85 | 2,41 |
| | 7 | 65,45 | |
| BOSA | 1 | 47,59 | 2,45 |
| | 7 | 60,08 | |

Tabela 6. Resultados dos ensaios de auto adensabilidade

| | Unid | BOCV | BOSA |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| 1 - SLUMP FLOW | | | |
| Tempo atingir 50 cm | (seg) | 2,06 | 3,08 |
| Diâmetro Final | (cm) | 81 | 66,5 |
| Houve exsudação ? | | não | não |
| Houve segregação ? | | não | não |
| 2 - CAIXA EM "L" | | | |
| Tempo para atingir 20 cm | (seg) | 0,91 | 1,13 |
| Tempo para atingir 40 cm | (seg) | 1,22 | 2,8 |
| altura início (H1) = | (mm) | 85,00 | 93 |
| altura final (H2) = | (mm) | 80,00 | 80 |
| coeficiente de bloqueio = | | 0,94 | 0,86 |
| 3 - FUNIL EM "V" | | | |
| Tempo para fluir | (seg) | 7,43 | 7,28 |
| 4 - ANEL JAPONÊS (J ring) | | | |
| Hi médio = | (mm) | 18 | 24,33 |
| He médio = | (mm) | 10,75 | 14,5 |
| Hi - He | | 7,25 | 9,83 |
| média dos 2 diâmetros = | (mm) | 86,5 | 66 |
| Dslump - D(ext. fluxo)= | mm | 5,5 | -0,5 |

Tabela 7. Temperatura do ambiente durante a produção do concreto e Massa Unitária dos concretos produzidos.

| Descrição | BOCV | BOSA |
|-------------------------------------|-------|------|
| Temperatura de fabricação (°C) | 21,20 | 22,8 |
| Massa unitária (g/cm ³) | 2,41 | 2,45 |

Análise dos Resultados

Abaixo está a tabela que mostra os resultados dos ensaios de verificação de autoadensabilidade, esperados na avaliação de concretos.

Tabela 8. Resultados esperados, dos ensaios, para concretos auto adensáveis.

| | | |
|---------------------------------|--------------------------|------|
| 1 - SLUMP FLOW | | |
| TEMPO P/ ATINGIR diâm. 50 mm | LIMITE (seg) | |
| | MIN | MAX |
| | > 1 | < 10 |
| DIÂMETRO FINAL | LIMITE (cm) | |
| | df2-df1<= | 5 |
| | > 60 | < 80 |
| 2 - CAIXA EM L | | |
| TEMPO PARA ATINGIR | LIMITE (seg) | |
| distância de 20cm (T20) | < 1,5 | |
| distância de 40cm (T40) = | < 2,5 | |
| h(externa)/h(interna) | LIMITE | |
| | coef. de bloqueio >= | 0,8 |
| 3 - FUNIL EM "V" | | |
| TEMPO PARA FLUIR | LIMITE (seg) | |
| | MIN | MAX |
| | > 6 | < 10 |
| 4 - ANEL JAPONÊS | | |
| Relação entre as Alturas | LIMITE (mm) | |
| | Hi-He<= | 10 |
| Relação entre diâmetros | LIMITE (mm) | |
| | Dslump - D(ext. fluxo)<= | 50 |

Analisando-se as tabelas de 6 e a 8, conclui-se que os dois concretos de alta resistência são auto adensáveis. O traço em que a cinza volante esteve presente, apresentou uma maior fluidez.

No concreto com cinza volante - B0CV, observa-se que, no ensaio de escorrimento (Slump flow), o concreto passou do limite imposto pelas recomendações espanholas, fato também verificado

na relação dos diâmetros entre os ensaios de escorrimento e anel japonês. Porém, ao analisar os demais ensaios, percebe-se que todos os resultados estão de acordo com as recomendações. Além disso, ultrapassou o limite, em um valor muito pequeno, praticamente desprezível.

No tocante à fluidez, esse concreto teve desempenho além do esperado. Isso foi influenciado pela argamassa formada pela cinza volante. Esse aumento de fluidez, pode vir a prejudicar, eventualmente, peças que tenham fôrmas não muito estanques. Na verdade, ele proporcionaria o vazamento de pasta de cimento pelas fôrmas, porém, para concreto bombeado e lugares onde há extensos panos de concretagem, como, por exemplo, em pisos industriais, mostra-se satisfatório, devido à grande fluidez, será mais fácil e rápida a sua aplicação.

Apesar de, o concreto ter alta fluidez, mostrou-se suficientemente coeso e viscoso, de modo que não houvesse exsudação e segregação. Em relação à segregação, em momento algum, houve indícios deste fenômeno.

Quanto à capacidade de bloqueio, observa-se na caixa em L, que, o concreto com cinza volante foi muito mais capaz de vencer os obstáculos, tendo uma maior homogeneização. Essa propriedade é analisada, frente ao coeficiente de bloqueio. Quanto mais próximo do 1 está o coeficiente de bloqueio, maior será a capacidade de vencer obstáculos. Isto significa que, com o coeficiente 1, as alturas, tanto internas como externas são iguais, e há homogeneização. Desse modo, se o H1 (altura interna), for muito maior que o H2 (altura externa) significa que ficou muito material retido nos obstáculos.

Verifica-se uma desconformidade no ensaio do anel japonês, visto que ele mede a capacidade de bloqueio, mediante ao fluxo. A tendência esperada era que a extensão do fluxo fosse menor que a extensão obtida no slump flow. Verificou-se porém que ela foi 5 mm maior e cabe ressaltar que esse resultado pode ter tido essa alteração, na hora da retirada do cone.

Ao analisar o traço – BOSA, o qual utiliza sílica ativa, conclui-se que o concreto também é auto adensável. Esse concreto por ter seu peso unitário um pouco maior, passou mais rapidamente pelo funil em V, pois no momento em que foi aberta a portinhola inferior, ele ficou sob ação de seu peso próprio.

Ao analisar os demais ensaios verifica-se que o concreto BOSA é mais coeso que o BOCV. Na caixa em L, o concreto BOSA passou mais vagarosamente, devido ao fato deste ser mais coeso que o outro. Se ele tivesse uma coesão menor, provavelmente teria atingido as marcas de 20 e 40 antes do outro, pois tem peso maior, e também, o coeficiente de bloqueio teria se aproximado de 1. Quando o concreto é mais coeso, há forças que o mantém unido, como se fosse uma força de atração. Então, fica mais difícil a movimentação relativa entre os materiais. Essa dificuldade de deslocamento relativo decorre da formação da argamassa que envolve os agregados do concreto, impedindo que um se desloque muito mais que o outro. Ao mesmo tempo, aumenta-se a fluidez, devido ao envoltório formado pela argamassa sobre os grãos o atrito entre eles é diminuído, e isso torna o material mais fluido. Verifica-se que a argamassa que contém sílica ativa, neste caso, confere ao concreto uma maior coesão. Embora o concreto BOSA seja mais coeso que o outro, não significa, que ele não é auto adensável, e sim, que ele possui maior coesão, o que em certos casos pode ser uma vantagem.

A resistência à compressão, resultou em 15% maior para o concreto com sílica ativa, comparado ao concreto com adição de cinza volante, sendo esta o ganho de resistência já esperado considerando a maior efetividade da sílica ativa. É possível que, aos 28 dias, esses concretos estariam com resistência em torno de 80 MPa.

Conclusão

Após a análise dos resultados obtidos, verifica-se que os concretos provenientes desses dois traços são

de alta resistência e auto adensáveis. Conclui-se que a argamassa formada com cinza volante é mais fluida que a formada por sílica ativa, e há, pois, a possibilidade de a primeira ter a quantidade de superplastificante diminuída. Porém, não se sabe o quanto e para isso deve ser realizado ensaios. Ambos, os concretos, possuem coesão e viscosidade suficiente, para não segregar e exsudar, possuindo então, as características de um concreto auto adensável de alta resistência.

Agradecimentos

Agradeço à PBIC/CNPq/UEL pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa, à MBT/Degussa pela doação do aditivo superplastificante, à Camargo Correa pela doação de Cimento ARI e, também à aos docentes envolvidos, os quais me deram grande apoio,

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto- ensaio de compressão de corpos cilíndricos*. Rio de Janeiro, jul. 1994. p 1-4.
- BARRÁGAN, B.; GETTU, R.; ZERBINO, R.; LA CRUZ, C.; BRAVO, M. *Desarrollo y aplicación de hormignones autocompactables reforzados com fibras de acero*. Barcelona: Tecnología de Estructuras de Hormigón, 2004. p.107-114.
- GETTU, R.; AGULLÓ, L. *Estado del arte del hormignón autocompactable y su caracterización*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluna, 2003.
- GETTU, R.; ZERBINO, R.; BARRAGÁN, B.; AGULLÓ, L. *Propuesta de procedimientos experimentales para evaluación de la autocompactabilidad del hormignón fresco*. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluna, 2004.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Tokyo, v.1, n.1, p.5-15, 2003.