

CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA PASTA.

THE HIGH PERFORMANCE SELF-COMPACTING CONCRETE: DETERMINATION OF PASTE COMPOSITION

Rodrigo Lourenção Nunes, Mario Morio Isa

FEB-Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista-Departamento de Engenharia Civil
Av Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube s/n CEP: 17033-360, Bauru, São Paulo, rodrigoln@gmail.com, marioisa@feb.unesp.br

Resumo - O concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD) é aquele que além de associar alta resistência mecânica e fluidez é capaz de adensar a custa do seu peso próprio; sendo por isto recomendado para concretagem de peças densamente armadas e reparo em estruturas de concreto. Como a dosagem dos CAADs difere dos concretos tradicionais, neste trabalho utiliza-se uma metodologia com o emprego de equipamentos simples. A pasta deste tipo de concreto é constituída de cimento, sílica ativa, metacaulim, água e aditivo superplastificante de última geração. A sua composição é definida em relação ao consumo de cimento pelas relações: água/cimento (a/c), sílica ativa/cimento (sa/c), metacaulim/cimento (m/c) e superplastificante/cimento (sp/c). Nesta pesquisa são fixadas as relações, $a/c = 0,40$ l/kg e $sa/c = 0,10$ kg/kg e as relações m/c e sp/c são determinadas através do Cone de Marsh e ensaio de mini-slump. Os resultados obtidos mostram que a relação ótima de metacaulim é de 6% correspondente ao tempo de fluidez de 7 segundos e o consumo de superplastificante é de 0,6% com um diâmetro final de 177mm e tempo para atingir 115mm inferior a 1 segundo. O concreto dosado, em volume, com 50% desta pasta e 50% do esqueleto granular, atende as exigências de fluidez e coesão de um CAAD.

Palavras chave: Concreto autoadensável, Composição da pasta, Fluidez, Coesão.

Abstract - The high performance self-compacting concrete (HPSCC) presents high performance and fluidity. The ability to compact only under its self-weight is recommended for concrete in congested members and repair in concrete structures. The design of HPSCC is very different the normal concretes, in this work presents design with simple equipments. The paste composition is defined with relationships: water/cement $a/c=0,40$ l/kg, active silica/cement $sa/c=0,10$ kg/kg, metacaulim/cement (m/c) and superplasticizer/cement (sp/c) are determined with Marsh's cone and slump test. Its show relationship $m/c=0,06$ with fluidity time of 7 seconds and $sp/c=0,06$ presents final diameter of 177mm and time to reach 115mm lower 1 second. The concrete designed with 50% of this paste and 50% aggregates composition presents fluidity and cohesion of HPSCC.

Key Words: self-compacting concrete, paste composition, composition of aggregates, Power's method, fluidity, cohesion.

1. Introdução

Nos últimos 50 anos a indústria do concreto vem sofrendo transformações importantes em todo o mundo, alterando sua atividade, anteriormente quase rotineira. Na década 70 surgem os aditivos superplastificantes que possibilitam a redução significativa da relação água/cimento. Isto, associado à introdução de materiais ultrafinos (adições minerais ativas ou inertes), que densificam a matriz e a zona de transição pasta/agregado, produziram modificações significativas na estrutura do concreto.

Uma outra consequência dos avanços tecnológicos é a obtenção de concretos com características diferenciadas tanto no estado fresco como no endurecido. Dentre estes destaca-se o concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD).

O CAAD é aquele que além de associar alta resistência mecânica a baixas relações água/cimento, é capaz de fluir no interior da forma, preenchendo de forma natural o seu volume, passando entre as armaduras e consolidando-se unicamente sobre a ação de seu peso próprio, sem compactação interna ou externa (Okamura, 1997).

A sua fabricação é feita com os materiais tradicionais tais como, cimento, água, agregados e aditivo de última geração, sílica ativa e filler, produzidos com uma nova técnica que diferem dos métodos tradicionais empregados para o concreto normal, resultando um produto fluído com resistência mecânica duplicada, características de durabilidade das quais muitas são governadas pela permeabilidade, devido a uma série de modificações que ocorrem em todas as propriedades deste material.

Utilizado na concretagem de estruturas congestionadas de armaduras, em áreas restringidas (Okamura, 1997; Walraven, 2001; Chan e Chern, 2001), na pré-fabricação de estruturas (Walraven, 2001), em estruturas de concreto protendido (Walraven, 2001; Skarendahl, 2001) e em reparo estrutural (Ozawa, 1994); (Chan e Chern, 2001), este novo tipo de concreto devido a sua

contemporaneidade e potencialidade deve ser melhor estudado.

2. Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo básico produzir a pasta e otimizar seu conteúdo para confecção do CAAD, adequando a metodologia proposta por Gomes et al (2001) aos materiais e as técnicas disponíveis no Brasil.

A pasta é constituída de cimento, sílica ativa, metacaulim de alta reatividade, água e aditivo superplastificante. A composição é definida pela quantidade de cimento e pelas relações, água/cimento (a/c) é de 0,40 l/kg (limite superior), sílica ativa/cimento (sa/c) é de 0,10 kg/kg (10% do consumo de cimento), serão tomados como referência inicial, podendo sofrer alterações com base nos resultados obtidos. Logo os parâmetros a determinar são superfluidificante/cimento (sp/c) e metacaulim/cimento (m/c).

A dosagem do superplastificante é determinada pelo ensaio de cone de Marsh de acordo com as recomendações da norma EN445 (1996).

A dosagem ótima de metacaulim é determinada através do ensaio de mini-slump, que tem sido utilizado por vários pesquisadores em estudos sobre a fluidez da pasta e a compatibilidade cimento-superplastificante (Kantro, 1980; Aïtcin et al, 1994; Costenaro et al, 1999).

Os equipamentos utilizados na otimização do conteúdo de pasta, funil-V, caixa-L, tubo-U, são projetados com base em estudos realizados por diferentes pesquisadores destacando-se entre eles, Gomes et al (2001) e Okamura et al (1997), na confecção deste tipo de concreto.

As propriedades no estado fresco ensaiadas nos concretos analisados são fluidez, viscosidade e coesão.

A fluidez é avaliada através do ensaio de extensão de fluxo (slump-test) e de funil-V proposto por Ozawa et al (1994).

A habilidade ou facilidade de passar entre as armaduras é determinada pelo ensaio de caixa em L, pois

este permite determinar os valores que quantificam o bloqueio e o fluxo do concreto, depois de passar pelos obstáculos.

A coesão do concreto fresco ou resistência à segregação é determinada mediante ensaio de fluxo em tubo em forma de U de 16cm de diâmetro, pelo qual o concreto flui até o equilíbrio sem compactação.

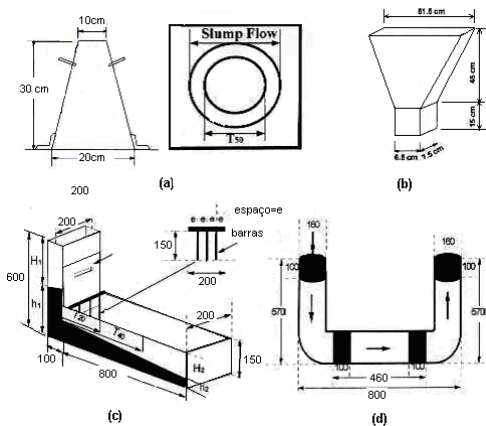


Figura 1. Equipamentos para ensaios do concreto no estado fresco: a) Extensão de fluxo, b) Funil em V, c) Caixa em L e d) Tubo em U (GOMES et al, 2001).

3. Programa Experimental

Para composição da pasta a relação a/c é fixada em seu limite superior $0,40l/kg$ diminuindo conforme o nível de resistência requerido. Como a sílica ativa é fixada em 10% do consumo de cimento, a relação sa/c é de $0,10$.

Em ensaios preliminares para a confecção de pasta, observou-se que os fatores que influenciam a sua fluidez são: a seqüência de introdução dos materiais constituintes, a velocidade com a qual a mistura é realizada e o tempo de mistura.

Inicialmente, fixou-se as relações: $a/c = 0,40$ kg/kg, $sa/c = 0,10$ kg/kg, $m/c = 0,20$ kg/kg e $sp/c = 0,10$ kg/kg, pois com valores inferiores a pasta não flui, devido à alta dosagem de metacaulim.

O tempo de mistura dos materiais é fixado em 10 minutos em virtude do efeito do aditivo superplastificante utilizado.

Definidos estes parâmetros, variam-se apenas a seqüência de lançamento dos materiais e a velocidade da mistura na argamassadeira, depois de confeccionadas, as pastas são ensaiadas no Cone de Marsh.

A metodologia ótima para a confecção da pasta na argamassadeira consiste na introdução de cimento mais água com 2 minutos em rotação baixa (140 ± 5) rpm, a sílica ativa mais 1/3 de superplastificante diluído em 1/9 de água com 2 minutos em rotação alta (285 ± 10) rpm. O metacaulim mais 1/3 superplastificante diluído em 1/9 de água com 1 minuto em rotação baixa e 3 minutos em rotação alta, por fim 1/3 de plastificante diluído em 1/9 de água.

A dosagem de superplastificante é determinada através de ensaios de cone de Marsh, conforme as recomendações da norma EN 445(1996). O ponto de saturação do superplastificante corresponde a porcentagem ótima deste aditivo, para a qual um incremento na sua dosagem não provoca aumento significativo na fluidez da mistura, com mostram Larrard (1990), Aïtcin et al (1994) e Gomes et al (2001). A determinação deste ponto é feita para os consumos de 6, 8, 10 e 15% de metacaulim em relação ao consumo de cimento. Recomenda-se que a relação sp/c seja sempre o conteúdo sólido do superplastificante e que a água seja considerada na relação água/cimento, para o aditivo superplastificante utilizado considera-se 30% como sendo sólido e os 70% restantes como água.

Definidos os pontos de saturação das dosagens de metacaulim, são realizados os ensaios de mini-slump proposto por Kantro (1980) e utilizado em pesquisas de Aïtcin et al (1994); Costenaro et al (1999) e Gomes et al (2000). Estes utilizam o molde de forma tronco cônica com diâmetros de 20mm e 40mm respectivamente e altura de 60mm. O ensaio é realizado em ambiente climatizado, com temperatura de $(22 \pm 2)^\circ C$ e umidade relativa de 60%. O molde é colocado sobre uma mesa nivelada horizontalmente, onde se faz um círculo de diâmetro 115mm numa folha de papel milimetrado sobre uma placa de vidro e é preenchido em uma única camada e sem

compactação. Após a retirada do tronco de cone mede-se o diâmetro final e o tempo necessário para alcançar um diâmetro de 115mm (denominado T115). A relação ótima de metacaulim/cimento para a dosagem do superplastificante correspondente ao ponto de saturação é aquela que apresenta um diâmetro final de (180 ± 10) mm e um tempo T 115 de 2 a 3,5 segundos.

O conteúdo de pasta otimizado é definido como a quantidade mínima de pasta para preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando as características exigidas para o concreto nos estados fresco (autoadensabilidade) e endurecido (resistência à compressão). A fluidez é determinada através dos ensaios de extensão de fluxo (slump-test), método ISCE-F 503 (1990), e do funil-V proposto por Ozawa et al (1994).

O ensaio de extensão de fluxo apesar de prescrito na norma ISCE-F 503 (1990), utiliza-se o molde com as mesmas dimensões e forma do molde utilizado no tradicional ensaio slump-test. É de chapa metálica com superfície bem lisa e livre de irregularidades, com altura de 300mm, base e topo abertos com diâmetros de 200mm e 100mm respectivamente. A fluidez é determinada vertendo o concreto no cone de Abrams sem compactar, que após o vazamento é levantado verticalmente sobre uma chapa de aço para que o concreto se abata, sendo igual ao valor do diâmetro a medida representativa. Os requisitos são que apresentem um diâmetro final de 60mm a 75mm e um tempo de (5 ± 2) segundos para alcançar o diâmetro de 50 cm (denominado T50).

O ensaio de funil-V (Fig. 2) consiste em medir o tempo que o volume de 10 l de concreto demora a fluir. O funil é conectado através de um canal de descarga, que pretende simular a passagem do concreto entre as armaduras paralelas. Recomenda-se que as dimensões mínimas da seção do canal de descarga seja 3 vezes a dimensão máxima característica do agregado; o tempo de fluxo recomendado é de (10 ± 3) segundos.



Figura 2. Execução do ensaio Funil-V.

O ensaio de Caixa-L consta de um depósito vertical, com capacidade de 12 litros, que se conecta com um canal horizontal através de uma abertura que tem as mesmas dimensões da seção transversal do canal (Fig. 3). Após da porta colocam-se as barras de armadura com determinada separação. Os espaçamentos e a quantidade de barras são definidas pela dimensão máxima característica do agregado e das condições reais de aplicação.

Uma vez preenchido o depósito vertical, a porta se abre e medem-se os tempos que o concreto demora para chegar a uma distância horizontal de 20cm (T_{20}) e as alturas h_1 e h_2 da mistura em repouso. Com as alturas se determina a razão h_2/h_1 , denominada coeficiente de bloqueio (FB).

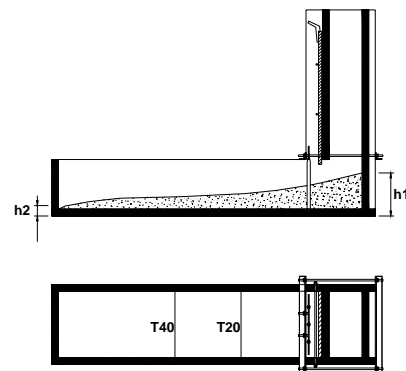


Figura 3. Parâmetros avaliados na Caixa-L.

Os requisitos recomendados para esse tipo de concreto são: T_{20} de $(1 \pm 0,5)$ segundos e T_{40} de $(2 \pm 0,5)$ segundos, com FB igual ou maior do que 0,80.

Lança-se o concreto no tubo sem interrupção até que este esteja quase completo, é necessário aguardar um

tempo para que ocorra o endurecimento do concreto para evitar sua desagregação, separam-se então quatro discos de 10cm de espessura e determina-se o conteúdo de agregado graúdo presente em cada secção, por lavagem e peneiramento da argamassa (até as frações de 5mm).

No ensaio de Tubo-U o concreto é lançado no tubo (Fig.4) sem interrupção até que este esteja quase completo, é necessário aguardar um tempo para que ocorra o endurecimento do concreto para evitar sua desagregação. Separam-se então quatro discos de 10cm de espessura e determina-se o conteúdo de agregado graúdo presente em cada secção, por lavagem e peneiramento da argamassa (até as frações de 5mm). O parâmetro a ser analisado é a relação de segregação (RS) que é definida pela equação:

$$RS = \frac{M_{TEOR}}{\bar{M}}$$

onde:

RS = relação de segregação;

M_{TEOR} = massa de agregado graúdo teórica no volume de um disco;

\bar{M} = média aritmética da massa de agregado graúdo real dos discos.

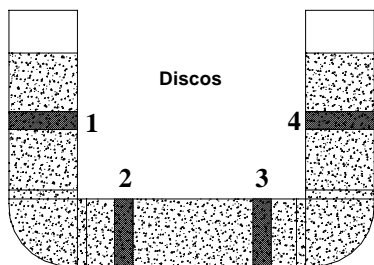


Figura 4. Discos a serem avaliados quanto a RS no Tubo-U

Recomenda-se que esta relação seja igual ou superior a 0,90.

4. Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados da composição da pasta e da otimização do volume de pasta.

4.1. Composição da pasta

A dosagem do superplastificante é determinada pelo ensaio do cone de Marsh para as relações metacaulim/cimento de 0,06; 0,08; 0,10 e 0,15.

Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 5.

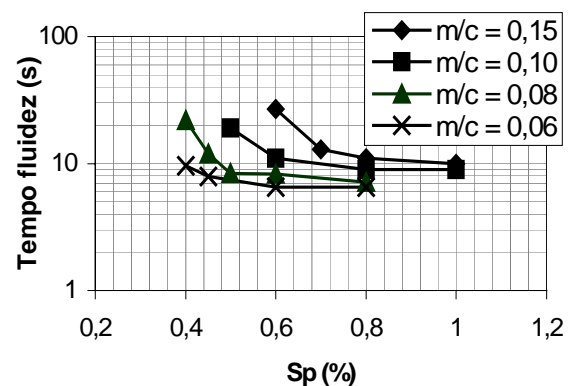


Figura 5. Determinação da porcentagem ótima de superplastificante.

Analisando os valores da Fig.5 verificam-se que os pontos de saturação para as dosagens de metacaulim em estudo são apresentados na Tab.1.

Definidos os pontos de saturação são realizados os ensaios de mini-slump com o objetivo de se determinar a dosagem ótima de metacaulim em relação ao consumo de cimento.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de mini-slump.

m/c (kg/kg)	0,06	0,08	0,10	0,15
Sp/c (%)	0,6	0,5	0,6	0,7
Diâmetro final (mm)	177	118	122	75
T ₁₁₅ (s)	0,6	0,8	0,8	-
Temperatura (°C)	21	20	20	22

Os parâmetros que caracterizam a pasta de um CAAD é que esta apresente um diâmetro final de (180 ± 10) mm e um T_{115} de 2 a 3,5 segundos .

Os resultados apresentados na Tab.1. mostram que a pasta com a relação $m/c = 0,06$ (kg/kg), apresenta um diâmetro de 177 mm, porém um tempo de 0,6 segundos inferior ao recomendado para CAADs com adição de filer carbonático inerte Gomes et al (2001).

Conclui-se com base nos resultados apresentados que a pasta a ser utilizada na confecção do CAAD é a que tem as relações $a/c = 0,40$ (kg/kg), $sa/c = 0,10$ (kg/kg), $sp/c = 0,006$ (kg/kg), $m/c = 0,06$ (kg/kg).

4.2. Otimização do volume de pasta

Inicialmente tentou-se compor um concreto com 40% de pasta e 60% de esqueleto granular em volume. O concreto com esta composição não apresentou características no estado fresco de um CAAD.

Numa segunda tentativa foram empregados 50% de pasta e 50% de esqueleto granular cujos resultados são apresentados:

- **Extensão de fluxo** – O ensaio realizado através do cone de Abrams resultou num T_{50} igual a 2,5 segundos e um diâmetro final de 62cm. Verifica-se que os valores obtidos atende os parâmetros recomendados no Capítulo3.
- **Funil V** – O tempo de fluidez recomendado para um volume de 10 litros de concreto é de (10 ± 3) segundos, o valor obtido nesta pesquisa é de 4 segundos. A utilização do metacaulim, embora atue na coesão apresenta também efeito pozolânico, o que diminui o tempo de fluidez.
- **Caixa-L** – Neste ensaio avalia-se a habilidade do concreto de fluir entre as armaduras, os resultados obtidos são $T_{20} = 0,8$ segundos, $T_{40} = 2,0$ segundos e $FB = 0,85$, que atendem os resultados fixados na metodologia apresentada no Capítulo 3, que são T_{20} de $(1 \pm 0,5)$ segundos e T_{40} de $(2 \pm 0,5)$ segundos, com FB igual ou maior do que 0,80.

- **Tubo-U** – O equipamento utilizado tem por finalidade determinar a resistência a segregação. Durante a realização do ensaio surgiram alguns inconvenientes, como a grande dificuldade na desmoldagem da forma para a retirada dos discos de concreto. Outra é que lançamento do concreto deve ser contínuo, pois a interrupção do fluxo falseia os resultados, além disso, o volume de concreto empregado é muito grande (aproximadamente 30 litros). Apesar destas considerações o resultado obtido é de $RS = 0,90$ que indica que o concreto apresenta coesão suficiente para manter uma distribuição homogênea do agregado graúdo.

5. Conclusões

Numa avaliação global dos resultados obtidos, pode-se afirmar que as considerações feitas por Gomes et al (2001), fundamentado na obtenção separada de um esqueleto granular com máxima compacidade e de uma pasta com máxima fluidez, realmente são válidas para os materiais e as técnicas aqui empregadas.

Definiu-se para a pasta o consumo de 6% de metacaulim e a dosagem de 0,6% de aditivo superplastificante correspondente ao ponto de saturação. A utilização de metacaulim de alta reatividade em substituição ao filer, proporcionou menores valores de fluidez (T_{115}) no ensaio mini-slump que a pasta de referência estudada por Gomes et al, (2001). Os valores de T_{115} estabelecidos para pastas com a adição de sílica ativa ou sílica ativa mais filer são de 2 a 3,5 segundos, já os resultados obtidos foram menores que um segundo e apresentaram pequena variação, podendo não ser um parâmetro representativo de fluidez. Essa mudança de comportamento concorda com as afirmações de Walraven (2001) sobre a variação das quantidades e características dos materiais.

A otimização do conteúdo de pasta foi realizada em duas etapas:

- Inicialmente tentou-se compor um concreto com 40% de pasta e 60% de esqueleto granular (Besson, 2004) em volume mas o concreto com esta composição não apresentou resultados satisfatórios com relação aos parâmetros exigíveis para a caracterização de um CAAD.
- Numa segunda tentativa foram empregados 50% de pasta e 50% de esqueleto granular que forneceu os resultados conforme apresentados na Tab 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios realizados no estado fresco.

Extensão de fluxo		Funil - V	Caixa - L			Tubo -U
T_{50} (s)	ϕ_{final} (cm)	Tempo (s)	T_{20} (s)	T_{40} (s)	FB	RS
2,5	62	4	0,80	2	0,85	0,90

Conclui-se a partir dos resultados apresentados que o CAAD obtido nesta pesquisa atende os parâmetros de caracterização deste tipo de concreto com exceção do tempo obtido no ensaio de Funil-V devido à substituição do filer pelo metacaulim de alta reatividade. Pois este por ser constituído por compostos à base de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) na fase amorfa (vítrea) proporciona alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto devido a sua elevada pozolanicidade, proporcionando assim maior coesão à mistura.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a CAPES pela bolsa de iniciação científica.

O segundo autor agradece a FUNDUNESP pelo auxílio à pesquisa concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aitcin P.C. et al (1994) Superplasticizers: how day work and why occasionally don't. *Conc. International*, 1994,45-52.

Besson, L.C.A. Concreto autoadensável de alto desempenho: Determinação do Esqueleto Granular e Volume ótimo de Pasta. Bauru, 2004. 52p. Iniciação Científica – Universidade Estadual Paulista.

Chan Y.W. et al (2001) The Application of self compacting concrete in Taiwan. *The Sec.Int.Symp. on Self-Comp. Concrete*, 25-32.

Costenaro F.L. et al (1999) Compatibilidade de aditivos: influência do aditivo retardador na fluidez do concreto de alto desempenho. *V Cong. Iber. de Pat. de las Construcciones (CDRoom)*.

Gomes P.C.C. et al (2000) Estudo dos fatores que divergem a dosagem de saturação do superplastificante da argamassa e do concreto a do sistema pasta. *Eng. Ciê. & Tecnologia*, 16, 3-5.

Gomes P.C.C. et al (2001) Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete. *The Sec. Inte. Symp. On Self-Comp. Concrete*, 377-386.

Kantro D.L. Influence of water reducing admistures on properties of cement pastes. A miniature slump test. *Cem. Conc. Aggregates*, 2,95-102.

Okamura H. (1997) Self-compacting high performance concrete. *Conc.Int.*, 7,50-54.

Ozawa K. et al (1994) Evolution of self compactability of fresh concrete – using the funnel test. *J.Jap. Soc. of Civ. Engineers*, 490,71-80.

Skarendahl A. Market acceptance of self-compacting concrete, the Swedish experience. The Sec. Int. Symp. on Self-Comp Concrete, 1-12.

Walraven J.C. State of the art on self-compacting concrete in the Netherlands. The Sec. Int. Symp. On Self-Comp. Concrete, 13-24.