

Influência da adição no comportamento reológico da pasta autoadensável de alto desempenho

Igor André Rodrigues Piovezam, Leandro Parras Meleiro* e Mario Morio Isa

Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 1401, 17033-360, Bauru, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: leandropm@feb.unesp.br

RESUMO. Esta pesquisa propõe o estudo da influência da área específica, forma e textura superficial das adições no comportamento reológico da pasta autoadensável de alto desempenho (PAAD). As adições selecionadas são o filer calcário e o filer basalto, por se tratarem de subprodutos industriais a fim de contribuir, desta forma, para o desenvolvimento sustentável. A pasta em estudo é constituída de cimento, sílica ativa, filer calcário ou filer basalto, água e aditivo superplastificante de última geração. São fixadas as relações água/cimento = 0,40 L kg⁻¹, sílica ativa/cimento = 0,10 kg kg⁻¹, e as relações filer/cimento e superplastificante/cimento são determinadas por meio de ensaios de cone de Marsh e de "mini-slump". Os resultados mostram que, para as mesmas relações de filer/cimento, os teores de superplastificante para pasta com filer calcário são significativamente inferiores ao da pasta com filer basalto. A análise dos resultados permite concluir que a área específica, forma e textura superficial das adições influenciam significativamente o comportamento reológico das PAADs.

Palavras-chave: concreto autoadensável, composição da pasta, área específica, fluidez, coesão e desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT. Influence of admixture on the rheological behavior of high performance self-compacting paste. This research proposes to study the influence of the specific area, mould and surface texture of admixtures on the rheological behavior of high performance self-compacting paste (HPSCP). The selected admixtures are calcareous filler and basalt filler, which are industrial residues, thus contributing to sustainable development. The paste is made up of cement, silica fume, calcareous filler or basalt filler, water and superplasticizer additive. For this study, the water/cement ratios are fixed = 0.40 L kg⁻¹; silica fume/cement = 0.10 kg kg⁻¹; the filler/cement and superplasticizer/cement ratios are determined through Marsh cone and mini-slump tests. The results show that for same filler/cement ratios, the ratios of superplasticizer to paste with calcareous filler are significantly lower than those of paste with basalt filler. The results show that the specific area, mould and surface texture of these admixtures significantly influence the rheological behavior of HPSCP.

Key words: self-compacting concrete, paste composition, specific area, fluidity, cohesion and sustainable development.

Introdução

Estudos iniciais realizados por Okamura (1986), no Japão, portanto há mais de 20 anos, levaram ao desenvolvimento do concreto autoadensável (CA). Este novo produto representa um marco revolucionário na tecnologia deste centenário material estrutural. A evolução é significativa já que se passou do concreto convencional com quatro componentes básicos, cimento, agregados miúdo e graúdo e água para o autoadensável com seis componentes. Somam-se a estes materiais os aditivos superplastificantes e as adições pozolânicas ou não, tais como sílica ativa, filer basalto e filer

calcário utilizados nesta pesquisa.

Segundo Aitcin (2000), diversos fatores são alcançados com sua aplicação, entre os quais se destacam vantagens técnicas e econômicas. Podem-se citar eliminação da necessidade de espalhamento e vibração, redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto, além de garantia de excelente acabamento, otimização de mão-de-obra, maior rapidez na execução e redução do custo final para concretos com fck acima de 20 MPa, em comparação ao sistema de concretagem convencional.

Utilizado recentemente e de forma restrita, o concreto autoadensável de alto desempenho

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

Apesar de sua fabricação ser feita com materiais tradicionais, tais como cimento, água, agregados, aditivo superplastificante e adições minerais, na sua dosagem, utilizam-se técnicas que diferem dos métodos tradicionais para outros tipos de concreto. O resultado é um produto fluido com resistência mecânica duplicada por uma série de modificações que ocorrem em todas as propriedades do material.

Gomes et al. (2003) afirmam que o estudo de concretos especiais, especificamente o autoadensável, que utilizam alta dosagem de resíduos sólidos industriais na forma de finos, é uma contribuição positiva para o desenvolvimento sustentável. Ao utilizar-se sílica ativa, filer calcário e filer basalto em substituição ao cimento, obtém-se ganho ecológico significativo, já que estes são resíduos ou subprodutos industriais.

O surgimento do CAAD só é possível graças à evolução do conhecimento da microestrutura das fases deste material, do aparecimento de novos constituintes específicos, sílica ativa, filer e dos aditivos superplastificantes de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado. Além disso, há o esforço de muitos pesquisadores em todo o mundo a fim de desenvolver uma metodologia de dosagem com ensaios específicos.

As vantagens e as novas técnicas utilizadas na confecção dos CAADs fazem dele um grande desafio a todos pesquisadores que buscam desenvolver materiais adequados para atender às necessidades quanto à resistência, durabilidade e aplicação.

Esta pesquisa tem por objetivo básico verificar a influência da área específica, forma e textura superficial da adição reciclada na Pasta Autoadensável de Auto Desempenho (PAAD), adequando a metodologia consagrada por reconhecidos pesquisadores no estudo dos CAADs, que propõem a dosagem da pasta e do esqueleto granular separados.

As adições recicladas escolhidas, nesta pesquisa, são o filer calcário e o filer basalto. Para atingir o objetivo proposto, são confeccionadas PAADs com as respectivas adições para que, posteriormente, seja possível uma comparação do seu comportamento no estado fresco.

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e pelas relações água/cimento (a/c) de 0,40 L kg⁻¹ (limite superior), sílica ativa/cimento

(sa/c) de 0,10 kg kg⁻¹ (10% do consumo de cimento), que serão tomadas como referência inicial. Logo, os parâmetros a determinar são superplastificante/cimento (sp/c) e filer/cimento (f/c).

A dosagem do superplastificante é determinada pelos ensaios de cone de Marsh de acordo com as recomendações da EN445 (Norma Européia, 1996).

Os ensaios de “mini-slump” são utilizados para determinar a dosagem ótima de filer e garantir uma pasta com boa fluidez e coesão moderada.

Material e métodos

O cimento empregado é o CPV ARI RS que, além de propiciar maior resistência mecânica e durabilidade a este tipo de concreto, possibilita a sua utilização em meios agressivos sulfatados, como redes de esgoto e águas servidas ou industriais, água do mar e alguns tipos de solos.

O aditivo superplastificante é a base de copolímeros que atende aos requisitos de desempenho da EB-1763 (tipo SP) e ASTM C494 (tipo F).

O filer calcário utilizado é proveniente do calcário dolomítico, comercializado e utilizado para correção da acidez de solos em propriedades agrícolas. O filer basalto é subproduto sem valor comercial constituído de um pó fino que se acumula nas proximidades dos britadores. É considerado um material marginal estocado nos pátios das pedreiras e provoca vários impactos ambientais.

O filer calcário e o filer basalto são previamente secos em estufa a uma temperatura de 100 ± 5°C, pois se encontravam expostos ao ambiente. Utilizam-se apenas as frações passantes na peneira #200 (abertura de 0,075 mm).

A área específica do filer calcário e do filer basalto determinada experimentalmente de acordo com a NBR NM 76/98 é de 7.904 e de 2.221 cm² g⁻¹, respectivamente.

Para composição da pasta, a relação a/c é fixada em seu limite superior 0,40 L kg⁻¹, para se alcançar resistência e durabilidade. O consumo ótimo de sílica ativa está em torno de 10% do consumo de cimento, a relação sa/c é de 0,10 kg kg⁻¹. As relações sp/c e f/c são determinadas pelos ensaios de cone de Marsh (Norma Européia, 1996) e ensaios de “mini-slump”, respectivamente.

Segundo Carbonari e Carbonari (1998), a fluidez da pasta depende da velocidade, do tempo da mistura e da sequência de incorporação dos materiais.

São realizados ensaios preliminares para avaliar a ordem da mistura e determinar a metodologia ótima da confecção da pasta. Fixado o tempo de mistura

dos materiais em 10 min. para garantir homogeneização, confeccionam-se pastas variando apenas as sequências dos materiais e as velocidades das misturas na argamassadeira. Estas pastas são ensaiadas no cone de Marsh.

A metodologia selecionada para a confecção da pasta consiste na introdução de cimento mais água com 2 min. em rotação baixa (140 ± 5 rpm), a sílica ativa mais 1/3 de superplastificante diluído em 1/9 de água com 2 min. em rotação alta (285 ± 10 rpm), o filer mais 1/3 de superplastificante diluído em 1/9 de água com 1 min. em rotação baixa e 3 min. em rotação alta, por fim, 1/3 de superplastificante diluído em 1/9 de água.

Com o ensaio de cone de Marsh, é possível determinar de forma rápida e econômica a fluidez da pasta e a porcentagem ideal de aditivo superplastificante. A partir deste ensaio, obtém-se o ponto de saturação do superplastificante, o qual é definido como sendo a porcentagem de superplastificante, relativa à massa de cimento, suficiente para envolver todos os seus grãos. Deste ponto em diante, qualquer aumento da dosagem do superplastificante não produzirá efeito significativo na reologia da pasta.

O cone de Marsh possui abertura de saída de 8 mm e dimensões de acordo com a Figura 1. O ensaio é realizado de acordo com as recomendações da EN445 (Norma Européia, 1996).

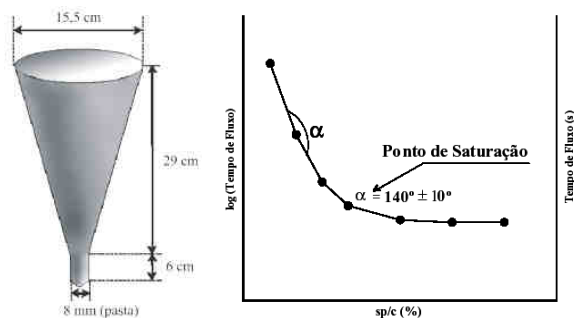


Figura 1. Determinação da dosagem ótima de superplastificante.

O gráfico da Figura 1 é utilizado para definir o ponto de saturação do superplastificante, que constitui a porcentagem ótima de aditivo para a pasta em estudo. Subentende-se este ponto como a relação sp/c, para a qual um incremento na sua dosagem não provoca aumento significativo na fluidez da mistura, como indicam as pesquisas de Aitcin *et al.* (1994), Agulló *et al.* (1999), Gomes *et al.* (2001), Nunes (2004) e Melo (2005).

Como a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação depende da relação f/c, os ensaios são realizados variando os

consumos de filer em relação ao consumo de cimento.

Este ensaio consiste em introduzir 1 L de pasta no cone de Marsh e medir o tempo T que uma quantidade de 500 mL demora a fluir pela abertura de 8 mm.

Este tempo é adotado como uma medida inversa da fluidez da pasta. Esses tempos de fluxo T são plotados em logarítmico versus relação sp/c. A relação sp/c ótima é definida como o ponto de saturação.

A dosagem ótima de filer é determinada por meio de 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; Aitcin *et al.*, 1994; Gomes *et al.*, 2001; Costenaro, 2003; Nunes, 2004; Melo, 2005).

Sobre uma mesa nivelada, faz-se um círculo de diâmetro 115 mm numa folha de papel milimetrado, uma placa de vidro completamente lisa é colocada em cima da folha. O molde de tronco de cone é colocado sobre a placa de vidro (Figura 2) e deve ser preenchido com pasta em uma única camada e sem compactação, retirando-se o excesso no topo do molde com o auxílio da espátula.

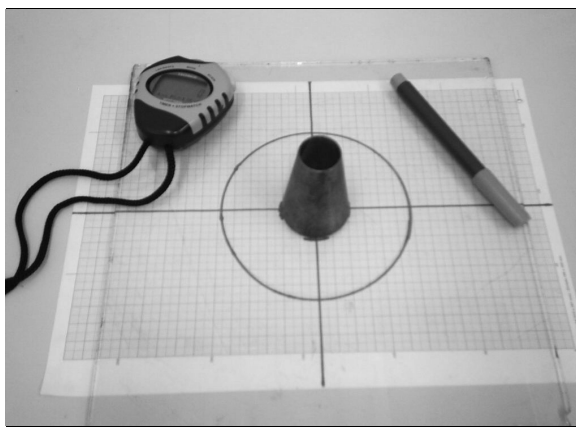


Figura 2. Equipamentos utilizados no ensaio de “mini-slump”.

O molde é, então, retirado verticalmente para cima, permitindo que a pasta flua sobre a placa de vidro. A medida do espalhamento final é a média de dois diâmetros perpendiculares medidos junto com o tempo de espalhamento para alcançar um diâmetro de 115 mm (T_{115}). O teste é realizado em pastas com diferentes relações f/c, todas com as correspondentes dosagens de saturação de superplastificante determinadas nos ensaios do cone de Marsh.

A pasta com a adição de finos que exibir um diâmetro de espalhamento de 180 ± 10 mm e um valor de T_{115} de 3 ± 1 s é escolhida como a ótima. Estes limites para as propriedades “mini-slump” são

propostos para assegurar uma pasta com boa fluidez e coesão moderada.

Resultados e discussão

Pasta com adição de filer calcário

A dosagem ótima de superplastificante é determinada pelos ensaios de cone de Marsh para as relações filer calcário/cimento (f_c/c) de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 kg kg^{-1} .

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3.

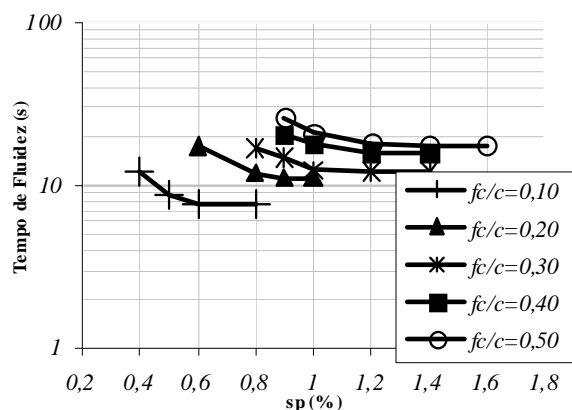


Figura 3. Dosagem de superplastificante: pasta com filer calcário.

Na Tabela 1, apresentam-se os valores de sp/c (%) correspondentes aos pontos de saturação para cada relação f_c/c (kg kg^{-1}). Apresentam-se também os resultados dos ensaios de “mini-slump”.

Tabela 1. Resultados para a pasta com filer calcário.

Pasta	A	B	C	D	E
f_c/c (kg kg^{-1})	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
sp/c (%)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Diâmetro final (mm)	150	162	173	185	172
T_{115} (s)	0,7	0,83	0,94	1,36	1,34

Os parâmetros que caracterizam a pasta de um CAAD são diâmetro final de 180 ± 10 mm e um T_{115} de 2 a 3,5s.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 1, conclui-se que a pasta que apresenta as características de uma PAAD é a Pasta D, que tem relação $f_c/c = 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$, com ponto de saturação de superplastificante sp/c de 1,2% em relação ao consumo de cimento, além dos parâmetros anteriormente fixados $a/c = 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$ e $sa/c = 0,10 \text{ kg kg}^{-1}$.

Verifica-se que, no decorrer dos ensaios, ao aumentar a dosagem de filer calcário consequentemente aumenta-se o diâmetro final do ensaio de “mini-slump” e

o T_{115} , até a relação f_c/c de $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$. Para dosagens superiores de f_c/c , não se observa o mesmo comportamento.

Pasta com adição de filer basalto

Os ensaios de cone de Marsh são realizados para as relações filer de basalto/cimento fb/c de 0,10; 0,20; 0,30 e $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.

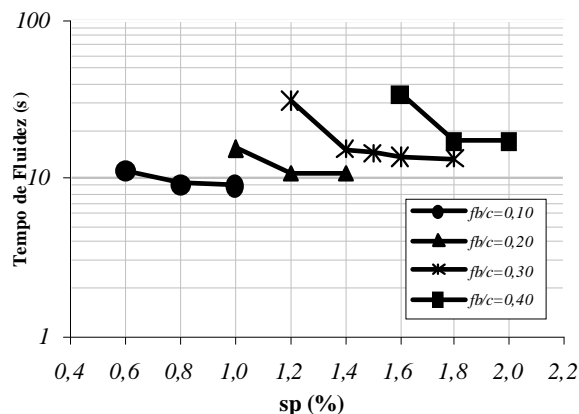


Figura 4. Dosagem de superplastificante: pasta com filer basalto.

Na Tabela 2, apresentam-se os valores de sp/c (%) correspondentes aos pontos de saturação para cada relação fb/c (kg kg^{-1}). Apresentam-se, também, os resultados dos ensaios de “mini-slump”.

Tabela 2. Resultados para a pasta com filer basalto.

Pasta	A	B	C	D
fb/c (kg kg^{-1})	0,10	0,20	0,30	0,40
sp/c (%)	0,8	1,4	1,6	2,0
Diâmetro final (mm)	155	181	178	180
T_{115} (s)	0,90	0,98	2,06	1,45

A análise dos resultados da Tabela 2 indica que a pasta que apresenta as características de uma PAAD é a Pasta C, que tem relação $fb/c = 0,30 \text{ kg kg}^{-1}$ com ponto de saturação do superplastificante sp/c de 1,6% em relação ao consumo de cimento, além dos parâmetros anteriormente fixados $a/c = 0,40 \text{ kg kg}^{-1}$ e $sa/c = 0,10 \text{ kg kg}^{-1}$.

Conclusão

Para analisar a influência do filer no comportamento das pastas, compararam-se os resultados obtidos para a pasta dosada com filer calcário e com filer basalto apresentados na Tabelas 1 e 2. Estes resultados são analisados verificando a influência exercida pela superfície específica, forma e textura superficial do filer no comportamento das duas pastas em estudo.

A superfície específica do filer calcário determinada de acordo com a NBR NM 76/98 pelo método de Blaine é de $7.904 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ e a do filer basalto é de $2.221 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$.

Thom e Brown (1989) *apud* Indraratna e Salim (2005) afirmam que o calcário dolomítico tem forma cúbica (estrutura cristalina decorrente do CaCO_3 e do MgCO_3) enquanto que o basalto tem forma lamelar. Em relação à textura superficial, os citados pesquisadores afirmam que o basalto é mais áspero do que o calcário pela existência de compostos metálicos em sua composição.

Apesar de o basalto apresentar forma lamelar e textura superficial mais rugosa do que o calcário, na dosagem da PAAD, a quantidade de filer basalto em relação ao consumo de cimento é menor do que a do filer calcário. Em números, a relação fb/c é de $0,30 \text{ kg kg}^{-1}$, conforme Tabela 2, e a relação fc/c é de $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$, como consta na Tabela 1. Para compensar estas características adversas, a pasta com filer basalto necessita de maiores teores de aditivo superplastificante do que o filer calcário, como mostra a análise das referidas Tabelas. De fato, para os mesmos teores de filer/cimento, as relações de superplastificante/cimento são significativamente superiores para a pasta com filer basalto do que para a pasta com filer calcário. Verifica-se ainda que, para as pastas selecionadas, apesar de fb/c = $0,30 \text{ kg kg}^{-1}$ ser menor que fc/c = $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$, os teores de superplastificante para a pasta com adição de filer basalto é de 1,6%, significativamente maior do que 1,2% para a pasta com adição de filer calcário. Isto pode ser reforçado quando se verifica que o intervalo de tempo para a pasta com filer basalto atingir o diâmetro de 115 mm (T_{115}) no ensaio de “mini-slump” é significativamente maior do que a pasta com filer calcário para todas as pastas em estudo, inclusive para as selecionadas.

Em relação à superfície específica, a do filer basalto é menor do que a do filer calcário, o que implica a necessidade de maior quantidade de filer basalto e contraria os resultados obtidos nas Tabelas em análise. Logo, estas considerações justificam a necessidade de uma maior quantidade de superplastificante para que a pasta com adição de filer basalto atinja os parâmetros característicos de uma PAAD.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fapesp, pela concessão da bolsa.

Os autores agradecem a Eldorado Bauru

Materiais para Construção Ltda. e a Degussa Construction Chemicals Brasil, pela doação dos materiais utilizados nesta Pesquisa.

Referências

- AGULLÓ, L. *et al.* Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer: a study based on the marsh cone test. *Mat. Struct.*, Barcelona, v. 32, n. 7, p. 479-485, 1999.
- AITICIN, P.C. *Concreto de alto desempenho*. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.
- AITICIN, P.C. *et al.* Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. *Concr. Int.*, Detroit, v. 16, n. 5, p. 45-52, 1994.
- CARBONARI, B.M.T.; CARBONARI, G. Concreto de alto desempenho: do laboratório à obra. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 7., 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: UFSC/ANTAC, 1998. p. 25-29.
- COSTENARO, F.L. *Desenvolvimento de concreto de alto desempenho com adições de cinza e sílica da casca do arroz*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- GOMES, P.C.C. *et al.* Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2., 2001, Tokyo. *Proceedings...* Tokyo: Coms Engineering Corporation, 2001. p. 377-386.
- GOMES, P.C.C. *et al.* Uma nova metodologia para obtenção de concreto auto-adensável de alta resistência com aditivos minerais. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURA DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Epusp, 2003. p. 12-13.
- INDRARATNA, B.; SALIM, W. *Mechanics of ballasted rail tracks: a geotechnical perspective*. London: Taylor and Francis Group/Balkema, 2005.
- KANTRO, D.L. Influence of water reducing admixtures on properties of cement pastes: a miniature slump test. *Cement Concrete Aggregates*, Winter, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.
- MELO, K.A. *Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- NORMA EUROPÉIA – EN 445, “Lechadas para tendões de pretensado. Métodos de Ensayo” 1996. p. 12.
- NUNES, R.L. *Composição da pasta do concreto autoadensável de alto desempenho*. Bauru, 2004. Relatório final de iniciação científica – PIBIC/CNPq.
- OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. *Concr. Int.*, Detroit, v. 19, n. 7, p. 50-54, 1997.

Received on July 31, 2006.

Accepted on April 07, 2008.