

Influência da pozolânicidade da adição no comportamento da resistência à compressão do concreto autoadensável

Influence of the pozzolanic of the addition in the behavior of the compressive strength of the self compacting concrete

Leandro Parras Meleiro, Igor André R. Piovezam & Mário Morio Isa

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Bauru, SP

RESUMO: Esta pesquisa propõe estudar a influência exercida pela pozolânicidade de adições recicladas no comportamento da resistência à compressão do concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD) às idades de 7, 28 e 63 dias. Os resultados obtidos mostram que esta característica influi decisivamente neste comportamento.

ABSTRACT: This research study the influence the pozzolanic of recycled addictions in the behavior of compression strength determined in the ages of 7, 28 and 63 days. The result shows that this characteristic influence decisively in this behavior.

1. INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD) é aquele que além de associar alta resistência mecânica e fluidez é capaz de adensar a custo de seu peso próprio, sendo por isto recomendado para a concretagem de peças densamente armadas para reforço/reparo de estruturas de concreto. Sua autoadensabilidade associada a altas resistências, além de representar um marco revolucionário na tecnologia deste centenário material estrutural conferem os requisitos de resistência e durabilidade atualmente exigidos.

Apesar de sua fabricação ser feita com os 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.

A metodologia de dosagem empregada neste trabalho é a utilizada por reconhecidos pesquisadores da área como Gobbi [5]; Gettu et al. [4]; Chan e Chern [2] e Gomes et al. [6], e assumem que o CAAD pode ser obtido otimizando a composição da pasta e o esqueleto granular separadamente. Isto sugere que a viscosidade e fluidez da pasta governem o comportamento de fluxo do concreto. Por outro lado, uma composição otimizada de pasta e um

volume de pasta mínimo associado com o esqueleto granular são necessários para garantir as propriedades do concreto endurecido.

Gomes et al. [7] 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 um ganho ecológico significativo, já que estes são resíduos ou subprodutos industriais.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo verificar a influência do índice de atividade pozzolânica com o cimento Portland de adições recicladas no comportamento da resistência à compressão dos CAADs determinadas às idades de 7, 28 e 63 dias.

As adições recicladas escolhidas são o filer calcário e o filer basalto, subprodutos de materiais comumente utilizados em concretos convencionais. Para atingir tal objetivo são confeccionados CAADs com as respectivas adições para que posteriormente seja possível comparar os seus comportamentos em relação à resistência à compressão.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O método de dosagem empregado nesta pesquisa é executado em três etapas: obtenção da composição da pasta, determinação do esqueleto granular e otimização do conteúdo de pasta.

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland para as adições em estudo é determinado experimentalmente de acordo com a NBR 5752/92.

O comportamento da resistência à compressão dos CAADs é determinada conforme a NBR 5739/94.

3.1 Composição da pasta

A pasta deste promissor tipo de concreto é composta de cimento CP V ARI RS, aditivo superplastificante a base de copolímeros, sílica ativa densificada e como adições os subprodutos industriais denominados de filer calcário e filer basalto, contribuindo desta forma para o desenvolvimento sustentável.

Para composição da pasta a relação água/cimento (a/c) é fixada em seu limite superior 0,40 l/kg, para se alcançar resistência e durabilidade. O consumo ótimo de sílica ativa é fixado em 10% do consumo de cimento, a relação sílica ativa/cimento (sa/c) é de 0,10 kg/kg. A relação superplastificante/cimento (sp/c) e filer/cimento (f/c) são determinadas através dos ensaios de cone de Marsh e ensaios de “mini-slump”, respectivamente.

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 obtêm-se o ponto de saturação do superplastificante o qual é definido como sendo a porcentagem de superplastificante, relativa a massa de cimento, que é 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 ensaio é realizado de acordo com as recomendações da EN445 (1996).

Como a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação depende da relação f/c , os ensaios de cone de Marsh são realizados variando os consumos de filer em relação ao consumo de cimento.

A dosagem ótima de filer é determinada através 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 [8]; Aiticin et al. [1]; Gomes et al. [6]; Costenaro et al. [3] e Melo [9]). O teste é realizado em pastas com diferentes relações f/c , todas com as correspondentes dosagens de saturação de superplastificante determinadas em ensaios de cone de Marsh.

A pasta com a adição de finos que alcançar um diâmetro de espalhamento de 115mm no intervalo de tempo de $(3\pm 1)s$, denominado T_{115} e apresentar diâmetro final de espalhamento de $(180\pm 10)mm$ é escolhida como ótima. Estes limites para as propriedades “mini-slump” são propostos para assegurar uma pasta com boa fluidez e coesão adequada.

3.2 Determinação do esqueleto granular

O esqueleto granular é obtido a partir de uma composição entre areia quartzosa e brita de basalto que apresenta o menor índice de vazios. Para tanto são realizados ensaios de “misturas secas” sem compactação, proposto por POWERS e descrito na norma ASTM C29/29M (1986). Tal procedimento permite considerar a influência da forma, textura e granulometria dos agregados na sua composição.

3.3 Otimização do conteúdo de pasta

Obtidas as composições das pastas e do esqueleto granular, determina-se o conteúdo ótimo de pasta, em volume. Este corresponde ao conteúdo mínimo de pasta que deve preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando autoadensabilidade no estado fresco e resistência à compressão no estado endurecido dos CAADs em estudo.

A fluidez é avaliada através do ensaio de extensão de fluxo, método ISCE-F 503 (1990), também conhecido como “slump-flow” (Figura 1a), e de funil V (Figura 1b) proposto por OZAWA et al. [11]. Os requisitos para que o concreto seja classificado como autoadensável são que apresente um diâmetro final de 600 a 750mm e um tempo de (5 ± 2) segundos para alcançar o diâmetro de 500mm (T_{500}) no ensaio

de extensão de fluxo. No ensaio de funil-V o tempo de fluxo recomendado é de (10 ± 3) s.

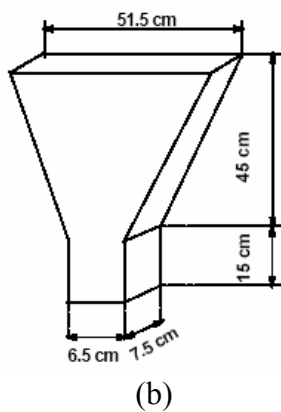
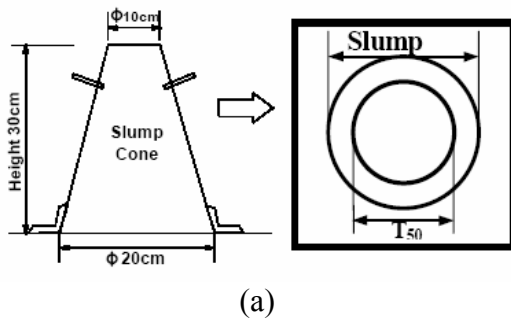


Figura 1: Equipamentos utilizado para os ensaios de fluidez: a) Cone de Abrams - Extensão de Fluxo; b) Funil em V (GOMES et al [7])

A habilidade ou facilidade de passar entre as armaduras é determinada pelo ensaio de caixa em L (Figura 2), pois este permite determinar os valores que quantificam o bloqueio e o fluxo do concreto, depois de passar pelos obstáculos. Após o material escoar pelas barras verticais medem-se os tempos que o concreto demora a chegar a uma distância horizontal de 200mm (T_{200}), 400mm (T_{400}) 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). Os requisitos recomendados para esse tipo de concreto são: T_{200} de $(1 \pm 0,5)$ segundos e T_{400} de $(2,0 \pm 0,5)$ segundos, com FB igual ou maior do que 0,80.

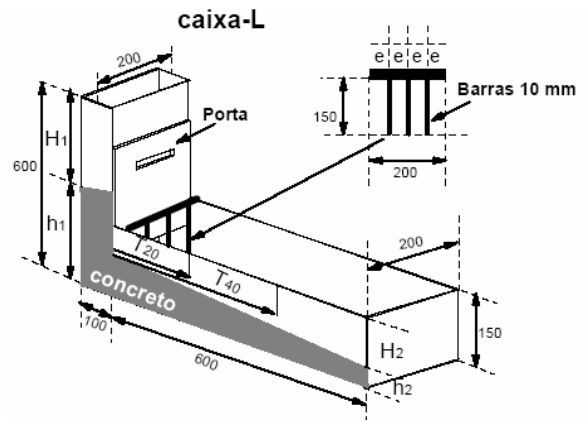


Figura 2: Caixa em L (GOMES et al, 2003)

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 (Figura 3), pelo qual o concreto flui até o equilíbrio sem compactação. 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 determinam-se os conteúdos de agregado graúdo presente em cada seção, 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 como a relação entre a brita da amostra de entrada nº1 com as da base nº 2 e 3. Considera-se um $RS \geq 0,90$ como satisfatório.

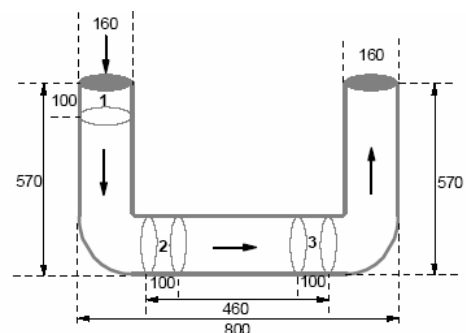


Figura 3: Tubo em U (GOMES et al. [7])

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Dosagem das pastas

A dosagem ótima de superplastificante é determinada pelos ensaios de cone de Marsh para as relações filer calcário/cimento (fc/c) de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 kg/kg. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.

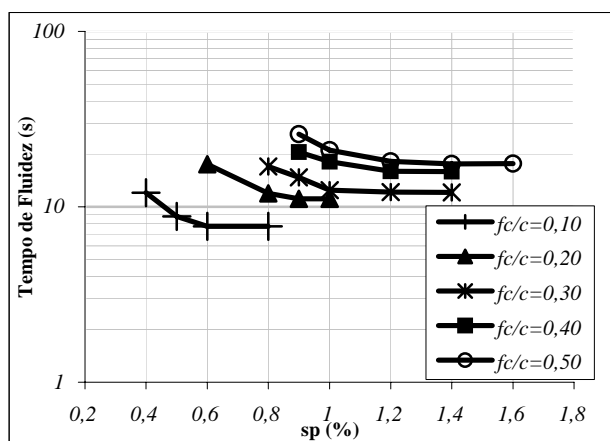


Figura 4: Dosagem de superplastificante: pasta com filer calcário

Os ensaios de cone de Marsh são realizados para as relações filer basalto/cimento (fb/c) de 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 kg/kg, cujos resultados são apresentados na Figura 5.

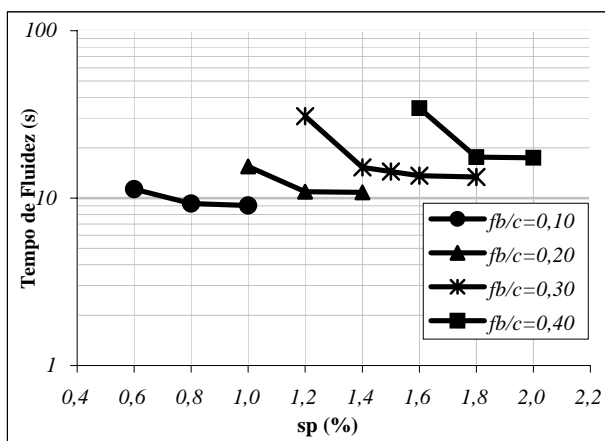


Figura 5: Dosagem de superplastificante para a pasta com filer basalto

Na Tabela 1 apresentam-se os valores de sp/c (%) correspondentes aos pontos de saturação para cada relação f/c (kg/kg). Apresentam-se também os resultados dos ensaios de “mini-slump” para ambas as adições.

Tabela 1 – Dosagens das pastas

Pasta	Filer calcário				
	A	B	C	D	E
fc/c (kg/kg)	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	2,0	1,34

Tabela 2 – Dosagens das pastas

Pasta	Filer basalto			
	F	G	H	I
fb/c (kg/kg)	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	2,1	1,45

Os parâmetros que caracterizam a pasta de um CAAD são diâmetro final de (180 ± 10)mm e um T₁₁₅ de 2 a 3,5 segundos.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2, conclui-se que a pasta com adição de filer calcário que apresenta as características de uma pasta autoadensável de alto desempenho (PAAD) é a pasta D, que tem relação fc/c = 0,40 kg/kg, com ponto de saturação de superplastificante sp/c de 1,2% em relação ao consumo de cimento, além dos valores anteriormente fixados de a/c = 0,40 kg/kg e sa/c = 0,10 kg/kg.

A pasta com adição de filer basalto que apresenta as características exigidas é a pasta H que tem relação fb/c = 0,30 kg/kg com ponto de saturação do superplastificante sp/c de 1,6% em relação ao consumo de cimento, além dos parâmetros já fixados a/c = 0,40 kg/kg e sa/c = 0,10 kg/kg.

4.2 Composição do esqueleto granular

Neste trabalho o esqueleto granular determinado para a confecção dos CAADs, conforme metodologia descrita no item 3.2, apresenta uma relação de 48% de areia e 52% de brita em massa e possui índice de vazios de 24,05%.

4.3 Otimização do conteúdo de pasta

Obtidas as composições das pastas e do esqueleto granular determinam-se os conteúdos ótimos de pastas, em volume, para cada CAAD em estudo. Estes, correspondem aos conteúdos mínimos de pastas que devem preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando autoadensabilidade no estado fresco conforme comentado no item 3.3. Esta autoadensabilidade é verificada através da fluidez determinada pelo ensaio de extensão de fluxo e funil V, pela capacidade de passar entre as armaduras através do ensaio de caixa L e pela coesão através do ensaio de tubo U.

Após várias tentativas com diferentes porcentagens de pasta e esqueleto granular, conclui-se que a composição que apresenta os parâmetros reológicos que caracterizam um CAAD, é aquela que tem 40% de pasta e 60% de esqueleto granular em volume para ambos os concretos em estudo. Estes parâmetros reológicos que garantem a autoadensabilidade estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Características reológicas dos CAADs

Ensaio	Parâmetros	Calcário	Basalto
Extensão de fluxo	T_{500} (s)	2,1	3,0
	Diâmetro final (cm)	74	72
Funil V	Tempo de fluidez (s)	8,0	7,5
Caixa L	T_{20} (s)	1,2	1,0
	T_{40} (s)	1,7	1,5
	FB	0,81	0,80
Tubo U	RS	0,91	0,93

4.4 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Apesar deste ensaio não ser especificado para a dosagem dos CAADs e como esta propriedade influi decisivamente no comportamento da pasta principalmente no estado endurecido, ele é determinado de acordo com a NBR 5752/92.

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland do filer calcário é de 68,1% e do filer basalto é de 54,5%.

4.5 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão são realizados de acordo com a NBR 5739/94, às

idades de 7, 28 e 63 dias. As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos para os CAADs com adição de filer calcário e filer basalto respectivamente.

Tabela 4 – Resistência à compressão do CAAD com adição de filer calcário.

Idade (dias)	CP	Frup (Kgf)	$f_{t,i}$ (MPa)	$f_{t,i}$ Médio (MPa)
7	1	48679	62,0	62,5
	2	49899	63,5	
	3	48616	61,9	
28	1	52855	67,3	68,7
	2	54441	69,3	
	3	54696	69,6	
63	1	58637	74,7	73,5
	2	57691	73,5	
	3	56753	72,3	

Tabela 5 – Resistência à compressão do CAAD com adição de filer basalto.

Idade (dias)	CP	Frup (Kgf)	$f_{t,i}$ (MPa)	$f_{t,i}$ Médio (MPa)
7	1	41509	52,9	52,2
	2	39207	49,9	
	3	42235	53,8	
28	1	51408	65,5	66,2
	2	52101	66,3	
	3	52503	66,8	
63	1	54526	69,4	69,4
	2	53987	68,7	
	3	55002	70,0	

Analisando os valores das Tabelas 4 e 5 conclui-se que o CAAD com adição de filer calcário apresenta maiores valores de resistência à compressão às idades de 7, 28 e 63 dias do que o CAAD com adição de filer basalto. Como ambos os CAADs estudados apresentam a mesma relação água/cimento igual a 0,40 l/kg, justificam-se estes valores já que o filer calcário apresenta índice de atividade pozolânica com o cimento Portland superior ao do filer basalto, além disso a relação água/finos para o CAAD com filer calcário é de 0,27 l/kg enquanto que o CAAD com filer basalto é de 0,29 l/kg. Nesta Pesquisa, considera-se como finos o cimento e as adições minerais.

Com os valores das Tabelas 3 e 4 constrói-se o gráfico da Figura 6 que mostra o comportamento desta importante propriedade com o tempo.

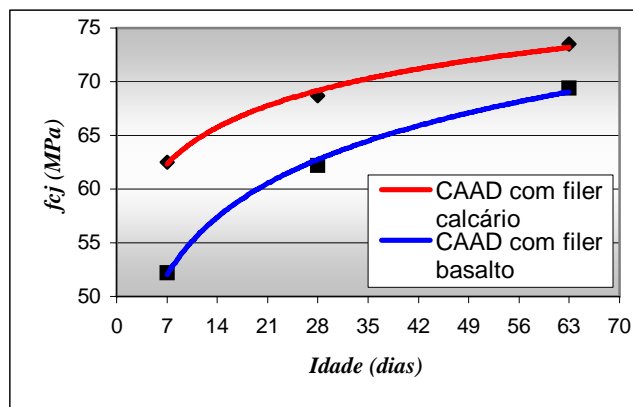


Figura 6 – Resistência à compressão em função da idade

Analisando o gráfico da Figura 6 é possível estabelecer uma equação entre a resistência à compressão com a idade para cada CAAD em estudo. Através de uma linha de tendência de regressão logarítmica obtêm-se as seguintes expressões:

$$f_{c,j} = 4,95 \cdot \ln(j) + 52,69 \rightarrow \text{CAAD com filer calcário}$$

$$f_{c,j} = 7,76 \cdot \ln(j) + 36,89 \rightarrow \text{CAAD com filer basalto}$$

onde:

$f_{c,j}$ = resistência à compressão (MPa);

j = idade do concreto (dias).

A importância destas expressões é o de prever os valores desta propriedade com a idade sem a necessidade dos ensaios.

5. CONCLUSÕES

Apesar da resistência à compressão dos CAADs depender da pasta e do esqueleto granular e como ambos os CAADs em estudo apresentam em sua dosagem 40% de pasta e 60% de esqueleto granular com a mesma composição, o comportamento da resistência à compressão está diretamente associado as características da pasta e o índice de atividade pozolânica com cimento Portland das adições recicladas.

Como as pastas estudadas apresentam inicialmente a mesma relação água/cimento igual a 0,40 l/kg, justificam-se os resultados obtidos já que o filer calcário apresenta índice de atividade pozolânica superior ao do filer basalto, além disso a relação água/finos para o CAAD com filer

calcário é de 0,27 l/kg enquanto que o CAAD com filer basalto é de 0,29 l/kg. Nesta Pesquisa, considera-se como finos o cimento e as adições minerais.

REFERÊNCIAS

- [1] Aitcin, P.C.; Jolicouer, C and Macgregor, J.G. *Superplasticizers: how they work and why occasionally don't*. Concrete International, v.16, n.5, 1994, p.45-52.
- [2] Chan, Y.W.; Chern, J. C., "The applications of self-compacting concrete in Taiwan", Proceedings of The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokio, Japan 2001, p.25-32.
- [3] Costenaro, F.L. *Desenvolvimento de concreto de alto desempenho com adições de cinza e sílica da casca do arroz*. São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- [4] Gettu, R. et al, "Hormigones autocompactables: desarrollo y caracterización", IV Symposium ANFAH: aditivos, adiciones y tratamientos especiales para hormigón y mortero. Madrid, 2001, p.1-6.
- [5] Gobbi, T. L.; Amaral, C. K., "Concreto auto-adensável de alto desempenho – Benefícios proporcionados pela adição de microsilica", In: 47º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON. CD-ROM, Olinda, 2005.
- [6] Gomes, P.C.C.; Gettu, R.; Agulló, L. y Bernard, C. *Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete*. Proceedings of The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokio, Japan, 2001, p.377–386.
- [7] Gomes, P.C.C.; Gettu, R.; Agulló. *Uma nova metodologia para obtenção de concreto auto-adensável de alta resistência com aditivos minerais*. V Simpósio EPUSP sobre estrutura de concreto. São Paulo, 2003.
- [8] KANTRO, D.L. *Influence of water reducing admixtures on properties of cement pastes. A miniature slump test*. Cement Concrete Aggregates, v.2, 1980, p.95-102.
- [9] MELO, K. A. *Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário*. 2005. 180 p. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [10] Okamura, H. *Self-Compacting High-Performance Concrete*. Concrete International, vol.19, n.7, 1997, p.50-54.
- [11] Ozawa, K. et al, "Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete – Using the Funnel Test", Japan Soc. of Civil Engineers, Vol. 23, nº. 490, 1994, pp. 71-80.