

# **INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES RECICLADAS NA REOLOGIA DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO.**

Igor André Rodrigues Piovezam, Mário Morio Isa, Leandro Parras Meleiro – Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia de Bauru – Campus de Bauru.

O concreto autoadensável de alto desempenho (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 próprio peso, sem compactação externa ou interna (Okamura, 1997).

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 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.

Este trabalho tem por objetivo verificar a influência de adições recicladas na reologia do concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD). As adições selecionadas são filer basalto e filer calcário, subprodutos industriais.

O filer basalto é o rejeito da exploração de pedreiras que não possui valor comercial de mercado, sendo considerado um “material marginal”, não tendo uma destinação definida, permanecendo estocado nos pátios das pedreiras, formando enormes pilhas que provocam vários impactos ambientais.

O filer calcário utilizado neste trabalho caracteriza-se como um pó fino, muito utilizado em propriedades agrícolas para a correção da acidez do solo. Ambos materiais são secos em estufa a temperatura de 105°C e posteriormente peneirados, utilizando-se apenas o material passante na peneira #200 (abertura 0,075mm).

A dosagem é executada em três etapas: obtenção da composição da pasta, determinação do esqueleto granular e otimização do conteúdo de pasta. Uma das principais vantagens desta metodologia é a possibilidade de dosar as mencionadas etapas de forma independente levando em consideração as particularidades de cada uma delas.

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.

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.

A metodologia selecionada para a confecção da pasta consiste na introdução de cimento mais água com 2 minutos em rotação baixa ( $140 \pm 5$ ) rpm, a sílica ativa mais 1/3 de superplastificante diluído em 1/9 de água com 2 minutos em rotação alta ( $285 \pm 10$ ) rpm. O filer mais 1/3 de superplastificante diluído em 1/9 de água com 1 minuto em rotação baixa e 3 minutos 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 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. O ensaio consiste em colocar um litro de pasta no cone e determinar o tempo que meio litro demora em fluir. Esse tempo é tomado como medida da fluidez. Fazendo várias pastas com diferentes dosagens de superplastificante analisam-se em um gráfico os tempos de fluidez em função da dosagem de superplastificante. Haverá uma dosagem a partir da qual não há aumento significativo da fluidez,

definido como ponto de saturação e corresponde a dosagem a ser empregada. 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 (Gomes, 2001; Kantro, 1980; Aitcin, 2000; Melo, 2005). 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  $(180 \pm 10)$  mm e um intervalo de tempo de  $(3 \pm 1)$  segundos para alcançar o diâmetro de 115 mm denominado  $T_{115}$ , é escolhida como ótima. Estes limites para as propriedades “mini-slump” são propostos para assegurar uma pasta com boa fluidez e coesão adequada.

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.

Obtidas as composições das pastas e do esqueleto granular determinam-se os conteúdos ótimos de pasta, em volume. Estes correspondem aos conteúdos mínimos de pasta que devem 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, também conhecido como “slump-flow”, método ISCE-F 503 (1990), e de funil V proposto por Ozawa (1994). Os requisitos para que o concreto seja classificado como autoadensável são que apresente um diâmetro final de 600 a 750 mm e um tempo de  $(5 \pm 2)$  segundos para alcançar o diâmetro de 500 mm ( $T_{500}$ ) no ensaio de extensão de fluxo. No ensaio de funil-V o tempo de fluxo recomendado é de  $(10 \pm 3)$  s.

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. Após o material escoar pelas barras verticais medem-se os tempos que o concreto demora a chegar a uma distância horizontal de 200 mm ( $T_{200}$ ), 400 mm ( $T_{400}$ ) 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.

A coesão do concreto fresco ou resistência à segregação é determinada mediante ensaio de fluxo em tubo em forma de U de 16 cm de diâmetro, 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 10 cm de espessura e determinam-se os conteúdos de agregado gráudo presente em cada secção, por lavagem e peneiramento da argamassa (até as frações de 5 mm). O parâmetro a ser analisado é a relação de segregação (RS), que é definida como a relação entre a brita da amostra de entrada nº 1 com as da base nº 2 e 3, conforme Figura 2b. Considera-se um  $RS \geq 0,90$  como satisfatório.

A dosagem ótima de superplastificante é determinada pelos ensaios de cone de Marsh. Para pasta com adição de filer calcário variou-se a relação filer calcário/cimento (fc/c) de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 kg/kg. Para 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 kg/kg.

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.

	<i>Filer calcário</i>					<i>Filer basalto</i>			
<i>Pasta</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>
<i>fc/c (kg/kg)</i>	0,10	0,20	0,30	<b>0,40</b>	0,50	0,10	0,20	<b>0,30</b>	0,40
<i>sp/c (%)</i>	0,6	0,8	1,0	<b>1,2</b>	1,4	0,8	1,4	<b>1,6</b>	2,0
<i>Diâmetro final (mm)</i>	150	162	173	<b>185</b>	172	155	181	<b>178</b>	180
<i>T<sub>115</sub> (s)</i>	0,7	0,83	0,94	<b>2,0</b>	1,34	0,90	0,98	<b>2,1</b>	1,45

Os parâmetros que caracterizam a pasta de um CAAD são diâmetro final de  $(180 \pm 10)$ mm e um T<sub>115</sub> de 2 a 3,5 segundos.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 1, conclui-se que a pasta com adição de filer calcário que apresenta as características de uma pasta autoadensável de alta 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 de  $sa/c = 0,10$  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 de  $a/c = 0,40$  kg/kg e de  $sa/c = 0,10$  kg/kg.

Para analisar a influência das características do filer no comportamento das pastas comparam-se os resultados obtidos para as pastas dosadas com filer calcário e com filer basalto apresentados na Tabela 1. Estes resultados são analisados verificando a influência exercida pela área 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 7904 cm<sup>2</sup>/g e a do filer basalto é de 2221 cm<sup>2</sup>/g.

Indraratna e Salim (2005) afirmam que o calcário dolomítico tem forma cúbica (estrutura cristalina decorrente do CaCO<sub>3</sub> e do MgCO<sub>3</sub>) enquanto que o basalto tem forma lamelar. Em relação à textura superficial, os citados pesquisadores afirmam ainda que o basalto devido à existência de compostos metálicos em sua composição é mais áspero do que o calcário.

Apesar do 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 kg/kg e a relação  $fc/c$  é de 0,40 kg/kg, como consta na Tabela 1. Para compensar estas características adversas, a pasta com filer basalto necessita de maiores teores de aditivo superplastificante do que a pasta com filer calcário, como mostra a análise da referida Tabela. 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  $fb/c = 0,30$  kg/kg ser menor que  $fc/c = 0,40$  kg/kg, 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<sub>115</sub>) 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 a superfície específica, a do filer basalto é menor do que a do filer calcário, o que implica na necessidade de maior quantidade de filer basalto, o que contraria os resultados obtidos na Tabela 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.

Neste trabalho o esqueleto granular determinado para a confecção dos CAADs apresenta uma relação de 48% de areia e 52% de brita em massa e possui índice de vazios de 24,05%.

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.

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.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos CAADs no estado fresco, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – - Características reológicas dos CAADs.

<i>Ensaios</i>		<i>Parâmetros recomendados</i>	<i>CAAD com filer calcário</i>	<i>CAAD com filer Basalto</i>
<i>Extensão de Fluxo</i>	<i>T<sub>500</sub> (s)</i>	(5±2)	2,1	3
	<i>Diâmetro Final (cm)</i>	60 a 75	74	72
<i>Funil V</i>	<i>Tempo de Fluidiez (s)</i>	(10±3)	8	7,5
<i>Caixa L</i>	<i>T<sub>20</sub> (s)</i>	(1±0,5)	1,2	1
	<i>T<sub>40</sub> (s)</i>	(2±0,5)	1,7	1,5
	<i>FB</i>	0,8	0,81	0,8
<i>Tubo U</i>	<i>RS</i>	0,9	0,91	0,93

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2, conclui-se que ambos os CAADs em estudo apresentam os parâmetros recomendados na literatura, o que viabiliza a utilização das adições recicladas de filer calcário e filer basalto na obtenção de concretos com características autoadensáveis, contribuindo ainda para o desenvolvimento sustentado.

## Referências Bibliográficas

- Aïticin, P.C.; Concreto de alto desempenho / Pierre-Claude Aïticin; tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo: Pini, 2000; 667pag.
- Gomes, P. C. C. *et al*, “Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete”, *Proceedings of The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Tokio, Japan, 2001, p.377–386.
- Indraratna, B.; Salim, W., “Mechanics of ballasted rail tracks: A geotechnical perspective”, Taylor & Francis Group/Balkema, London. England. 2005. 226p. ISBN 0-415-38329-3.
- 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.
- Melo, K. A., “Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário”. 180 p. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- Okamura, H., “Self-Compacting High-Performance Concrete”. *Concrete International*, vol.19, n.7, 1997, p.50-54.
- Ozawa, K. *et al*, “Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete – Using the Funnel Test”, *Japan Soc. of Civil Engineers*, Vol. 23, n°. 490, 1994, pp. 71-80.

**Bolsa:** FAPESP