

# RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL: INFLUÊNCIA DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO CALCÁRIO E DO BASALTO

COMPRESSIVE STRENGTH OF THE SELF-COMPACTING CONCRETE: INFLUENCE OF THE POZZOLANIC ACTIVITY OF THE CALCAREOUS AND BASALT

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

Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB  
Universidade Estadual Paulista – UNESP  
CEP 17033-360 – Bauru, SP – Brasil  
\*Email: igorpiovezam@gmail.com

## RESUMO

Esta pesquisa estuda a influência da atividade pozolânica do calcário e do basalto no comportamento da resistência à compressão do concreto autoadensável de alto desempenho (CAAD). As adições selecionadas são o *filler* calcário e o *filler* basalto, por se tratarem de subprodutos industriais contribuindo desta forma para o desenvolvimento sustentável. A pasta dos CAADs em estudo é constituída de cimento, sílica ativa, *filler* calcário ou *filler* basalto, água e aditivo superplastificante. São fixadas as relações água/cimento em 0,40 kg/kg, sílica ativa/cimento em 0,10 kg/kg e as relações superplastificante/cimento e *filler*/cimento são determinadas através de ensaios de cone de Marsh e de “mini-slump” respectivamente. O esqueleto granular é obtido a partir de uma composição entre areia quartzosa e brita de basalto que apresenta o menor índice de vazios. Os resultados mostram que o CAAD com adição de *filler* calcário tem maior resistência à compressão do que o CAAD com adição de *filler* basalto nas idades de 7, 28 e 63 dias. Isto justifica-se já que o *filler* calcário apresenta maior índice de atividade pozolânica do que o *filler* basalto. Além disso a relação água/finos para o CAAD com *filler* calcário é de 0,27 kg/kg enquanto que o CAAD com *filler* basalto é de 0,29 kg/kg.

**Palavras-chave:** concreto autoadensável, resistência à compressão, atividade pozolânica e desenvolvimento sustentável

## ABSTRACT

This research studies the influence of the pozzolanic activity of the calcareous and basalt in the resistance behavior of the compressive strength of high performance self-compacting concrete (HPSCC). The selected additives are the calcareous *filler* and basalt *filler*, for they are industrial residues helping that way the sustainable development. The paste of this concrete type is constituted of cement, silica fume, calcareous *filler* or basalt *filler*, water and superplasticizer additive. In this research the relationships water/cement are fixed in 0,40 kg/kg, silica fume/cement of 0,10 kg/kg and the relationships *filler*/cement and superplasticizer/cement are determined through of Marsh's cone and mini-slump tests. The granular skeleton is gotten from a composition between quartzous sand and brita of basalt that presents the lesser index of emptinesses. The results show that the HPSCC with the addition of calcareous *filler* has greater compressive strength than what the HPSCC with addition of basalt *filler* in the ages of 7, 28 and 63 days. It is explained by the fact that the calcareous *filler* presents greater index of pozzolanic activity than the basalt *filler*. Besides that the relation water/fine for the HPSCC with calcareous *filler* is 0,27 l/kg whereas the HPSCC with basalt *filler* is of 0,29 l/kg.

**Keywords:** self-compacting concrete, compressive strength, pozzolanic activity and sustainable development

## 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 (2005); GETTU et al. (2001); CHAN e CHERN (2001) e GOMES et al. (2001), 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. (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, *filler* calcário e *filler* 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 pozolânica 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 *filler* calcário e o *filler* 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 - PARTE 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.

A superfície específica das adições é obtida através do método de Blaine constante na NBR NM 76/98.

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 *filler* calcário e *filler* basalto.

O *filler* calcário desta Pesquisa é do tipo dolomítico, apresenta uma superfície específica de 7904 cm<sup>2</sup>/g e é comercialmente disponível para ser utilizado na correção da acidez do solo de propriedades agrícolas da região de Bauru.

O *filler* basalto é um subproduto da britagem da rocha basáltica não possuindo valor comercial e acumulando-se em enormes quantidades nos pátios das pedreiras provocando vários impactos ambientais. Este *filler* apresenta uma superfície específica de 2221 cm<sup>2</sup>/g.

Pretende-se com a utilização destes materiais, contribuir para o desenvolvimento sustentável e agregar valor e destinação mais nobre a estes.

Para composição da pasta a relação água/cimento (a/c) é fixada em seu limite superior 0,40 kg/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 *filler*/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 obtém-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 *filler* em relação ao consumo de cimento.

A dosagem ótima de *filler* 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, 1980; AÍTICIN, 2000; GOMES et al., 2001; COSTENARO, 2003; NUNES, 2004 e 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.

O diâmetro do espalhamento final é a média de dois diâmetros perpendiculares medidos junto com o tempo de espalhamento para alcançar um diâmetro de 115mm (T<sub>115</sub>). A pasta com a adição de finos que alcançar um diâmetro de espalhamento de (180±10)mm e um intervalo de tempo T<sub>115</sub> de (3±1) segundos 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 “ver Figura 1 – (a)”, e de funil V “ver Figura 1 – (b)” proposto por OZAWA et al. (1994). Os requisitos para que o concreto seja classificado como autoadensável são que apresente um diâmetro final de 600 a 750mm e um tempo de  $(5 \pm 2)$  segundos para alcançar o diâmetro de 500mm no ensaio de extensão de fluxo. No ensaio de funil-V o tempo de fluxo recomendado é de  $(10 \pm 3)$  s.

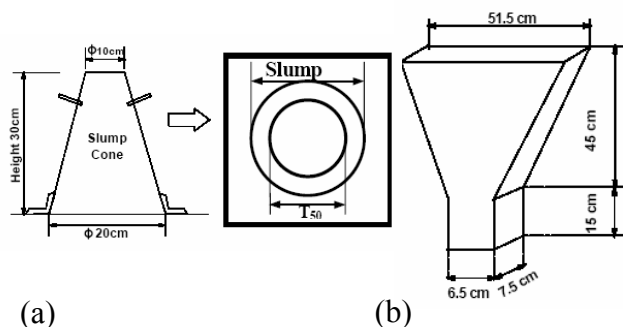


Figura 1. Equipamentos para ensaios do concreto fresco: (a) Extensão de Fluxo; (b) Funil em V

A habilidade ou facilidade de passar entre as armaduras é determinada pelo ensaio de caixa em L “ver Figura 2 – (a)”, 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.

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 “ver Figura 2 – (b)”, 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 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 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.

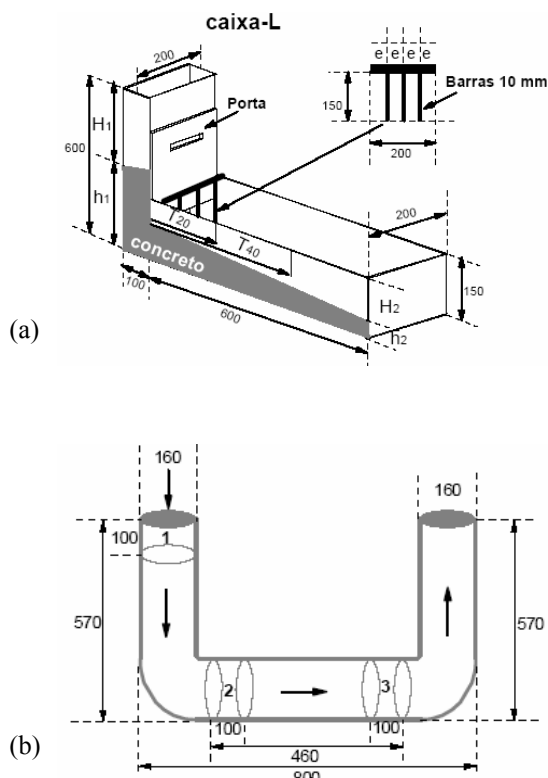


Figura 2. Equipamentos para ensaios do concreto fresco: (a) Caixa em L; (b) Tubo em U

#### 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

##### 4.1. Dosagem das pastas

A dosagem ótima de superplastificante é determinada pelos ensaios de cone de Marsh para as relações *filler* calcário/cimento ( $f_c/c$ ) de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 kg/kg. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

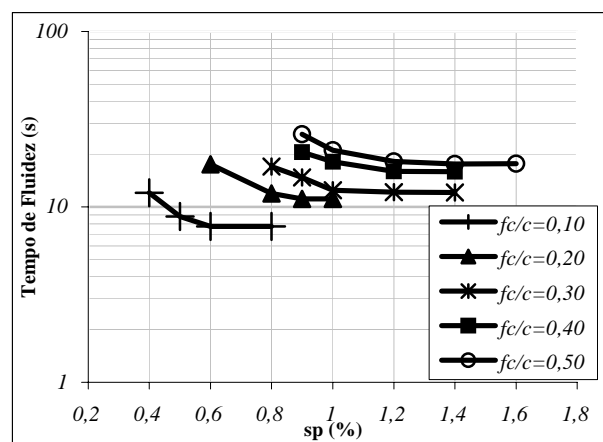


Figura 3. Dosagem de superplastificante: pasta com *filler* calcário

Os ensaios de cone de Marsh são realizados para as relações *filler* basalto/cimento (fb/c) de 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 kg/kg, cujos resultados são apresentados na Figura 4.

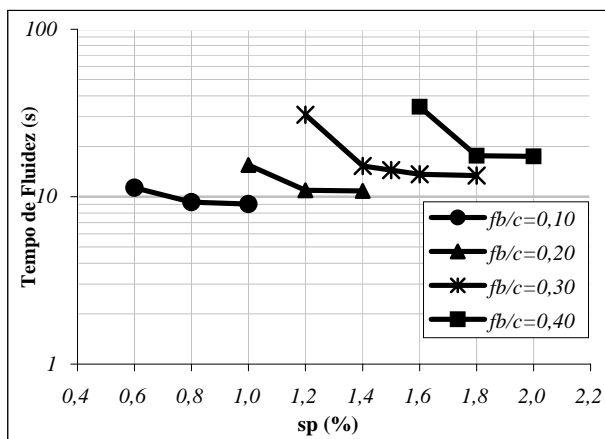


Figura 4. Dosagem de superplastificante para a pasta com *filler* basalto

Nas Tabelas 1 e 2 apresentam-se os valores de sp/c (%) correspondentes aos pontos de saturação para cada relação fc/c e fb/c (kg/kg) respectivamente. Apresentam-se também os resultados dos ensaios de “mini-slump” para ambas as adições.

Tabela 1 - Resultados para a pasta com *filler* calcário

Pasta	A	B	C	D	E
fc/c (kg/kg)	0,10	0,20	0,30	<b>0,40</b>	0,50
Sp/c (%)	0,6	0,8	1,0	<b>1,2</b>	1,4
Diâmetro final (mm)	150	162	173	<b>185</b>	172
T <sub>115</sub> (s)	0,7	0,83	0,94	<b>1,36</b>	1,34

Tabela 2 - Resultados para a pasta com *filler* basalto

Pasta	F	G	H	I
fb/c (kg/kg)	0,10	0,20	<b>0,30</b>	0,40
sp/c (%)	0,8	1,4	<b>1,6</b>	2,0
Diâmetro final (mm)	155	181	<b>178</b>	180
T <sub>115</sub> (s)	0,90	0,98	<b>2,06</b>	1,45

Os parâmetros que caracterizam a pasta de um CAAD são diâmetro final de (180 ± 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 *filler* calcário que apresenta as características de uma pasta autoadensável de alto desempenho (PAAD) é a pasta D, que tem relação fc/c de 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, a/c de 0,40 kg/kg e sa/c de 0,10 kg/kg.

A pasta com adição de *filler* basalto que apresenta as características exigidas é a pasta H “ver Tabela 2” que tem relação fb/c de 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 em 0,40 kg/kg e sa/c em 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	Filler calcário	Filler basalto
Extensão de fluxo	T <sub>500</sub> (s)	2,1	3,0
	Diâmetro final (cm)	74	72
Funil V	Tempo de fluidez (s)	8,0	7,5
Caixa L	T <sub>20</sub> (s)	1,2	1,0
	T <sub>40</sub> (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 *filler* calcário é de 68,1% e do *filler* basalto é de 54,5%.

#### 4.5. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão são realizados de acordo com a NBR 5739/2003 às idades de 7, 28 e 63 dias. As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos para os CAADs com adição de *filler* calcário e *filler* basalto respectivamente.

Tabela 4 – Resistência à compressão do CAAD com adição de *filler* calcário

Idade (dias)	CP	$f_{c,i}$ (MPa)	$f_{c,i}$ Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	1	62,0	62,5	0,90	1,44
	2	63,5			
	3	61,9			
28	1	67,3	68,7	1,45	2,11
	2	69,3			
	3	69,6			
63	1	74,7	73,5	1,20	1,63
	2	73,5			
	3	72,3			

Tabela 5 – Resistência à compressão do CAAD com adição de *filler* basalto

Idade (dias)	CP	$f_{c,i}$ (MPa)	$f_{c,i}$ Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	1	52,9	52,2	2,04	3,91
	2	49,9			
	3	53,8			
28	1	65,5	66,2	1,25	1,89
	2	66,3			
	3	66,8			
63	1	69,4	69,4	0,65	0,94
	2	68,7			
	3	70,0			

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

Com os valores das Tabelas 4 e 5 constrói-se o gráfico da Figura 5 que mostra o comportamento desta importante propriedade com o tempo.

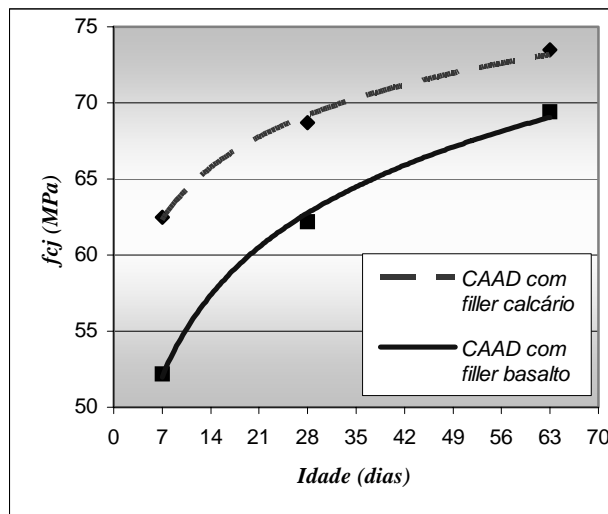


Figura 5. Resistência à compressão em função da idade

Analisando o gráfico da Figura 5 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:

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

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

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

Como ambos os CAADs em estudo apresentam em suas composições a mesma quantidade de pasta e o mesmo esqueleto granular, de 40% e 60% respectivamente, conclui-se que o comportamento da resistência à compressão está diretamente associada as características do *filler* calcário e do *filler* basalto.

A atividade pozolânica com o cimento Portland do *filler* calcário de 68,1% é significativamente superior a do *filler* basalto de 54,5%, o que justifica o comportamento da resistência à compressão às idades em estudo, apresentadas nas Tabelas 4 e 5. Além disso a relação água/finos para o CAAD com *filler* calcário é de 0,27 kg/kg enquanto que o CAAD com *filler* basalto é de 0,29 kg/kg. Nesta Pesquisa, considera-se como finos o cimento e as adições minerais.

Outra característica estudada que pode ter contribuído para o comportamento desta propriedade é a superfície

específica. Já que a do *filler* calcário é de 7904 cm<sup>2</sup>/g quase quatro vezes superior a do *filler* basalto que é de 2221 cm<sup>2</sup>/g.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a FAPESP pela concessão da bolsa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÏTICIN, P.C. *Concreto de alto desempenho* / Pierre-Claude Aïticin; tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo: Pini, 2000; 667p.
- CHAN, Y.W. and 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.
- COSTENARO, F.L. *Desenvolvimento de concreto de alto desempenho com adições de cinza e sílica da casca do arroz*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2003.
- GETTU, R.; GOMES, P.C.C.; AGULLÓ, L. y BERNARD, C. *Hormigones autocompactables: desarrollo y caracterización*. IV Symposium ANFAH: aditivos, adiciones y tratamientos especiales para hormigón y mortero. Madrid, 2001, p.1-6.
- GOBBI, T. L.; AMARAL, C. K. *Concreto auto adensável de alto desempenho – Benefícios proporcionados pela adição de microsíllica*. In: 47º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON. CD-ROM, Olinda, 2005.
- 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.
- 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.
- 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 filler calcário*. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005, 180p.
- NUNES, R. L. *Composição da pasta do concreto autoadensável de alto desempenho*. Relatório final de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq. Bauru, 2004, 84p.
- OZAWA, K., SAKATA, N. e OKAMURA, H. *Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete – Using the Funnel Test*. J. Japan Soc. of Civil Engineers, Vol. 23, nº. 490, 1994, p. 71-80.