

# **A importância da avaliação reológica de pastas com e sem sílica ativa para produção de concretos estruturais com cimento Portland para obras marítimas**

**Alessandra Lorenzetti de Castro<sup>1</sup> & Jefferson Liborio<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Doutoranda em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais – IFSC-IQSC-EESC/USP – São Carlos/SP – [alcastro@sc.usp.br](mailto:alcastro@sc.usp.br)*

<sup>2</sup>*Prof. Dr. Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento, do Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC/USP – São Carlos/SP – [liborioj@sc.usp.br](mailto:liborioj@sc.usp.br)*

**RESUMO:** Como a atmosfera marinha é considerada um ambiente extremamente agressivo às estruturas de concreto armado, é necessária a utilização de concretos compactos a fim de se evitar patologia. A produção e controle de concretos em campo sob essa agressividade se tornam complicadas, sendo a trabalhabilidade uma das propriedades mais difíceis de se avaliar e controlar. Considerando o concreto fresco como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido (pasta de aglomerantes), o estudo da trabalhabilidade da pasta de aglomerantes se torna fundamental para a produção de concretos com fluidez e consistência satisfatórias, de alta compactidade. É sabido que os concretos para fins de utilização em obras marítimas são substancialmente melhorados com adição de sílica ativa, pela qualidade proporcionada aos aglomerantes e certamente com uma alteração significativa da zona de interface. Assim, o presente trabalho apresenta a análise da trabalhabilidade de pastas com e sem adição de sílicas ativas (oriundas da fabricação de ligas Fe-Si e silício metálico e aquela extraída da casca do arroz), através do ensaio de miniabatimento para a produção de concretos estruturais para diversas aplicações, especialmente em ambientes marinhos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto de alto desempenho; Durabilidade; Trabalhabilidade; Reologia; Pasta de cimento.

## **1. INTRODUÇÃO:**

A atmosfera marinha é considerada um dos ambientes mais agressivos às estruturas de concretos. Assim, quando exposto a esse meio, o concreto e o aço pode deteriorar em função de efeitos físicos e químicos, isoladamente ou combinados: ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação do cimento, reação álcali-agregado (quando há a presença de agregados reativos), pressão de cristalização dos sais dentro do concreto – face da estrutura sujeita a condições de molhagem –, condições de secagem, corrosão da armadura e erosão física devida à ação de ondas e objetos flutuantes [9]. Frente a qualquer um desses ataques, a permeabilidade do concreto aumenta, tornando-o mais suscetível a ações adicionais dos mesmos agentes destrutivos e também de outros tipos de ataque.

No intuito de evitar patologia, torna-se necessária a utilização de concretos compactos, com porosidade refinada e desconexão entre os poros presentes no material quando no estado

endurecido. O concreto de alto desempenho (CAD), material de grande compacidade, vem sendo usado nos últimos 20 anos na construção de plataformas marítimas no Mar do Norte e alcançando bons resultados [2].

O conceito de CAD é bastante diversificado, variando de acordo com o país ou centro de pesquisa. Uma definição bastante usada é dada por Zia [8]: "*um concreto que encontra desempenho especial e requisitos de uniformidade que nem sempre podem ser obtidos usando ingredientes convencionais, processos de mistura tradicionais e práticas de cura típicas*". Em uma definição nacional, Liborio [7] considera o CAD "*como um material, cientificamente produzido, que atende as expectativas do cliente do ponto de vista estrutural, da estética, de durabilidade frente ao meio ambiente atual e futuro, para fins pré-determinados. Deve ser econômico (custo/benefício) e propiciar vantagens frente a outras alternativas tecnológicas.*" Essa última observação é feita a fim de se evitar a panacéia.

Geralmente, elementos de concreto pré-moldados são empregados em obras desse porte, uma vez que a produção e controle de concretos em campo sob essa agressividade se tornam complicadas. Dentre as propriedades do concreto mais difíceis de se avaliar e controlar destaca-se a **trabalhabilidade** quando no estado fresco, que interfere na facilidade de lançamento, adensamento, durabilidade e resistência do mesmo.

De uma forma geral, os concretos são considerados materiais compostos, tendo como principais componentes o cimento, os agregados e a água; no caso do CAD, soma-se a essas adições químicas e minerais, o que possibilita uma variedade de propriedades e características melhoradas. Dessa forma, o concreto pode ser considerado como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido (pasta de cimento e/ou aglomerantes), o que torna sua trabalhabilidade uma dependente das características dos agregados e da matriz de pasta. Como a matriz envolve os agregados em um concreto, ao manter constante a dimensão máxima característica e a quantidade dos agregados da mistura, relacionam-se as propriedades reológicas do concreto às propriedades reológicas da pasta [6].

A partir dessa relação direta, considera-se o estudo da trabalhabilidade da pasta de aglomerantes (cimento Portland e sílica ativa) no estado fresco fundamental para a produção de concretos com fluidez e consistência satisfatórias. Para CAD, a influência de adições químicas e minerais deve ser analisada, pois a incorporação desses materiais altera profundamente o comportamento no estado fresco, o que implica em alterações da trabalhabilidade da mistura: geralmente, um endurecimento rápido e significativo – conhecido como "*perda do abatimento do concreto fresco*" – pode ser observado quando adições químicas são usadas em conjunto com o cimento no concreto; no caso das adições minerais, elas diminuem a trabalhabilidade dos concretos, mesmo melhorando o desempenho dos mesmos.

Com o avanço da tecnologia dos concretos, o uso de adições químicas (aditivos) se tornou essencial para a produção de misturas de alto desempenho. Dentre os vários tipos disponíveis no mercado, os mais empregados são os superplastificantes (SP) ou aditivos redutores de água de alta eficiência que, quando adicionados, possibilita a obtenção de altas trabalhabilidades com menores quantidades de água de amassamento. Na presença de SP, a redução da água de amassamento é geralmente necessária para aumentar a trabalhabilidade do concreto, para produzir resistências maiores para uma dada trabalhabilidade e para planejar dosagens de concreto de baixas relações água/cimento por razões de durabilidade (como o CAD).

A maioria dos aditivos SPs utilizados apresenta grande afinidade com a superfície das partículas de cimento ou com os produtos da hidratação do mesmo, o que pode resultar tanto

numa interação física quanto química. A interação física surge a partir da adsorção das moléculas de aditivo nas superfícies das partículas de cimento junto ao efeito estérico existente entre as moléculas poliméricas adsorvidas e as partículas de cimento vizinhas defloculadas e dispersas. O aditivo adsorvido pelas partículas de cimento gera forças de repulsão entre elas (partículas carregadas com carga elétrica negativa) de forma que a floculação seja evitada e que as partículas de cimento sejam homogeneamente dispersas no concreto fresco; o atrito interno existente entre as partículas de cimento é reduzido em função do efeito estérico, resultando em melhores trabalhabilidades [4].

A *compatibilidade de um determinado par cimento-aditivo*, em termos de abatimento da pasta de cimento, pode e deve ser inicialmente estudada a partir de medidas de fluidez da pasta com auxílio de ensaios simples e fáceis de serem executados. Como as propriedades reológicas da pasta e, conseqüentemente, do concreto no estado fresco são influenciadas pela combinação cimento-aditivo, forma de adição do aditivo e relação água/cimento, muitas vezes observa-se problemas na fluidez, como endurecimento e perda de abatimento, que podem ocorrer ocasionalmente sob uma combinação cimento-aditivo em particular. Nesses casos verifica-se o fenômeno denominado *incompatibilidade entre o cimento e o aditivo*.

De acordo com Ferraris, Obla e Hill [5], mantendo-se o volume da concentração de sólidos constante, a incorporação de adições minerais melhora o desempenho do concreto, porém reduz sua trabalhabilidade. A principal razão para essa menor trabalhabilidade deve-se à adição de materiais muito finos que aumentam a demanda de água em função do aumento da área específica.

No caso particular da adição de sílica ativa (SA), a quantidade de água necessária para se manter a trabalhabilidade desejada é bastante aumentada. Assim, para não interferir no propósito da adição da SA – geralmente aumento da resistência mecânica do sistema –, torna-se necessária a incorporação de aditivos SPs adequados para garantir sua dispersão, cuja quantidade depende do tipo e da dosagem de SA.

O efeito benéfico da adição de sílica ativa é observado quando suas minúsculas partículas esféricas estão bem dispersas no sistema água-cimento, o que promove o deslocamento das moléculas de água vizinhas aos grãos de cimento. Com isso, as moléculas de água presas entre as partículas de cimento floculadas podem ser liberadas e contribuir com a fluidificação da mistura [2].

No caso da sílica extraída da casca de arroz, há outros dois parâmetros a serem considerados com relação à sílica advinda da produção de silício metálico ou ligas de Fe-Si: a dimensão da partícula, correspondente a uma área superficial de 90 m<sup>2</sup>/g a 290 m<sup>2</sup>/g (dependendo da forma produtiva para a construção civil); e a forma da partícula, relacionada com a cominuição do carvão da casca, que poderá ter desde a forma de agulhas até a forma esférica.

A incorporação de adições produz uma matriz com fluidez satisfatória no estado fresco e com maior compacidade e resistência no estado endurecido quando comparada às matrizes de concretos convencionais. Como conseqüência, o CAD exibe menor permeabilidade e maior integridade mecânica [1]. Dessa maneira, a otimização da matriz ou pasta do concreto se torna uma etapa importante no cálculo de sua composição.

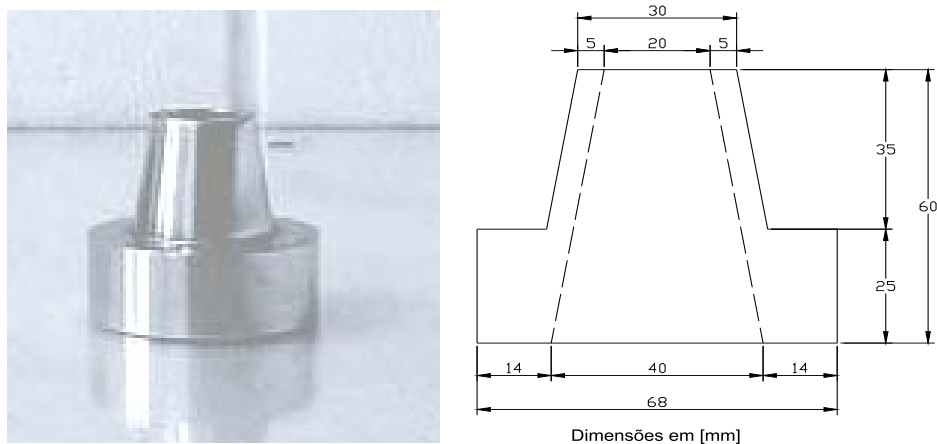
Como a pasta de cimento é responsável pela fluidez e coesão da mistura, pode-se considerar a trabalhabilidade e outras propriedades reológicas do concreto no estado fresco como dependentes de suas características. Para caracterização da fluidez (trabalhabilidade) da pasta, são necessários métodos de ensaios simples, confiáveis e econômicos e, dentre os

existentes, destaca-se o *ensaio de miniabatimento de tronco de cone* empregado nesta pesquisa.

O ensaio de miniabatimento de tronco de cone foi desenvolvido por Kantro [3] e, como o próprio nome sugere, consiste em determinar o abatimento de pequenas quantidades de pasta de cimento usando o minitronco de cone apresentado na figura 1.

O ensaio consiste em determinar dois diâmetros ortogonais de pasta abatida e, a partir do diâmetro médio, calcular a área ocupada pela pasta, considerando-a circular. Este ensaio tem sido utilizado na avaliação da influência de aditivos e/ou outras adições na fluidez da pasta de cimento e da compatibilidade entre o cimento e o SP.

Dentre suas principais vantagens estão a utilização de um equipamento leve, barato, portátil e de fácil manutenção e a adoção de um procedimento de ensaio simples, rápido e que envolve pouca quantidade de material. Uma desvantagem observada é a limitação deste ensaio para pastas que não apresentem alta fluidez.



**Figura 1** – Foto (A) e esquema com as dimensões (B) do minitronco de cone.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

Para a avaliação da trabalhabilidade de pastas de aglomerantes ao longo do tempo foram utilizados materiais comumente empregados na produção de CAD: cimento, aditivo superplastificante, sílica ativa e água. As condições de ensaio foram mantidas constantes: umidade relativa superior a 65% e temperatura ambiente de  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

O CPV ARI RS – cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos – foi escolhido, pois é um dos tipos de cimento mais adequado para a construção de obras em concreto submetidas à atmosfera marinha. Esse cimento possui 30% de escória em substituição ao clínquer.

O superplastificante é um aditivo redutor de água à base de policarboxilato (Glenium 51), tipo novo disponível no mercado. A concentração de sólidos é de 31% e sua massa específica igual a  $1,087 \text{ g/cm}^3$ . Sua quantidade variou entre 0,50% e 0,80% em relação à massa de cimento, com acréscimos de 0,15%.

No caso da sílica ativa (SA), dois tipos foram estudados: a sílica advinda da produção de silício metálico ou ligas de Fe-Si (SFS) e comercialmente disponível; e a sílica extraída da casca de arroz (SCA), obtida a partir da casca de arroz devidamente tratada termicamente e moída e produzida no Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC-SET-EESC-USP). A quantidade de SA foi fixada em 10% (valor usualmente empregado na produção de concretos de alto desempenho) em substituição volumétrica ao cimento.

Para manter a temperatura da pasta no final da mistura entre 20°C e 23°C (valores recomendados por Aitcin [2] para se reproduzir as condições normais de hidratação inicial do cimento), foi utilizada água de amassamento gelada para a produção das pastas a serem analisadas. As relações água/cimento (a/c) ou água/aglomerante (a/agl) consideradas foram de 0,27 – determinação da compatibilidade cimento-aditivo e teor ótimo de SP – e de 0,40 – avaliação da trabalhabilidade das pastas ao longo do tempo.

O valor da relação a/c de 0,27 foi determinado em função do ensaio para determinação do teor de água de consistência normal para pastas considerando a presença de SP, o que permitiu a redução em aproximadamente 15% do valor determinado para pasta sem a adição de SP (relação a/c determinada no ensaio igual a 0,32). O valor da relação a/c de 0,40 para a produção das pastas empregadas na avaliação da trabalhabilidade foi escolhido por ser considerado o valor limite entre um concreto convencional e um de alto desempenho [2].

Para a análise da compatibilidade entre o cimento e o aditivo, pastas incorporadas apenas com SP foram estudadas e avaliadas através do ensaio de miniabatimento. O par cimento-aditivo foi considerado compatível quando o abatimento foi mantido quase que constante por durante todo o ensaio. Também através do mesmo ensaio, o teor de aditivo que proporcionou maior abatimento foi escolhido para ser usado na pesquisa. Em seguida, com o teor de aditivo teoricamente considerado ótimo, as trabalhabilidades das pastas com adição de SA foram analisadas.

Para as análises das trabalhabilidades, o seguinte procedimento de mistura foi adotado:

- 1) depois de pesados os materiais, o cimento, a sílica (quando utilizada) e a água foram misturados por 2 minutos no misturador mecânico – 1 minuto na velocidade baixa e, em seguida, mais 1 minuto na velocidade alta;
- 2) 5 minutos após o cimento ter entrado em contato com a água, o SP foi adicionado à mistura (intervalo de tempo recomendado pelo fabricante). A pasta foi novamente misturada por mais 2 minutos, sendo 1 minuto em cada velocidade.

A primeira leitura foi feita 10 minutos após o contato água-cimento. A cada medida realizada, a pasta era misturada por 2 minutos (1 minuto em cada velocidade) seguida por uma mistura manual durante 15 segundos. Depois o minitronco de cone foi preenchido e o método de ensaio descrito a seguir foi adotado:

- 1) preparar uma base de vidro sem inclinação;
- 2) lubrificar a placa de vidro e o minitronco de cone metálico com óleo mineral de alta pureza;
- 3) preencher o molde com a amostra de pasta;
- 4) aplicar dez golpes no topo do minitronco de cone e nivelá-lo com o auxílio de uma pequena espátula. O material em excesso é coletado pela borda ampliada do molde metálico;
- 5) levantar o minitronco de cone suavemente, mantendo-o na posição vertical;
- 6) finalmente, medir os dois diâmetros perpendiculares de pasta de cimento espalhada.

Após a leitura dos diâmetros da pasta espalhada, a mistura retornava ao recipiente e outra mistura manual com duração de 5 segundos foi realizada. O recipiente foi coberto com um pano molhado para evitar a dessecação da pasta. Tanto o molde metálico quanto a placa de vidro foram limpos com água e enxutos para a leitura seguinte.

As leituras do abatimento do minitronco de cone da pasta de cimento e/ou de aglomerantes no estado fresco foram feitas aos 10, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos após o contato água-cimento para a avaliação da perda de abatimento da pasta com o tempo.

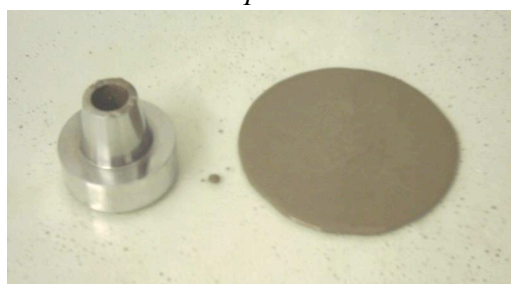
A figura 2 apresenta todas as etapas para a realização do ensaio de miniabatimento de tronco de cone, desde o preenchimento do molde metálico com a amostra de pasta até a leitura dos diâmetros perpendiculares.



**Figura 2a** – Preenchimento do minitronco de cone com a pasta de cimento.



**Figura 2b** – Minitronco de cone preenchido com a pasta de cimento.



**Figura 2c** – Pasta de cimento espalhada sobre a placa de vidro.



**Figura 2d** – Leitura de um dos diâmetros ortogonais da pasta de cimento espalhada.

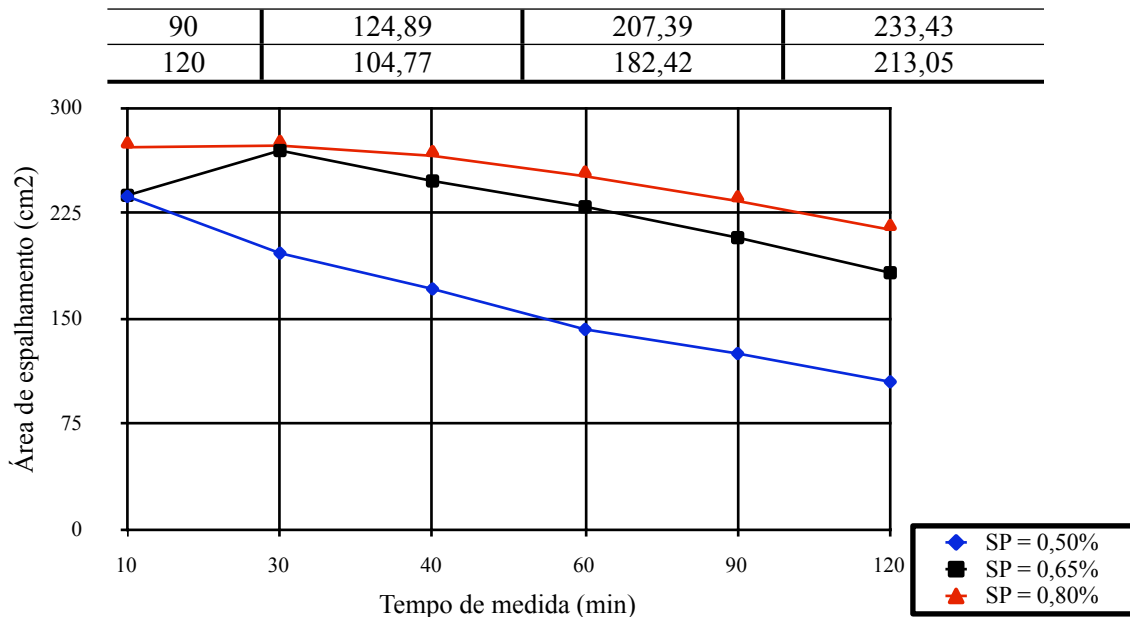
**Figura 2** – Exemplo de execução do ensaio de miniabatimento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Na determinação da quantidade ótima de aditivo superplastificante, as áreas de espalhamento obtidas para pastas produzidas com relação a/c de 0,27 e com a variação de SP entre 0,50% e 0,80% são apresentadas na tabela 1. O gráfico da figura 3 apresenta a curva área de espalhamento *versus* tempo de medida para pastas de cimento incorporadas apenas com SP.

**Tabela 1** - Áreas de espalhamento obtidas a partir do ensaio de miniabatimento para pastas com incorporação de aditivo superplastificante.

Tempo de medida (min)	SP=0,50%	SP=0,65%	SP=0,80%
	Área de espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Área de espalhamento (cm <sup>2</sup> )	Área de espalhamento (cm <sup>2</sup> )
10	236,70	237,51	271,72
30	196,32	269,38	272,89
40	170,87	247,73	265,62
60	142,08	229,39	251,09



**Figura 3** – Curva da área de espalhamento versus tempo de medida para pastas com incorporação de aditivo superplastificante.

Como pode ser observado a partir da figura acima, o teor de aditivo que permitiu maiores áreas de espalhamento e, conseqüentemente, menor perda da trabalhabilidade ao longo do tempo foi o de 0,80% em relação à massa de cimento. Apesar de apresentar uma queda gradual da trabalhabilidade durante o ensaio, o comportamento da curva indica compatibilidade entre o cimento e o aditivo, pois não se verificou nenhuma queda brusca nos valores das áreas de espalhamento medidas durante o ensaio (até 120 minutos após o contato água-cimento).

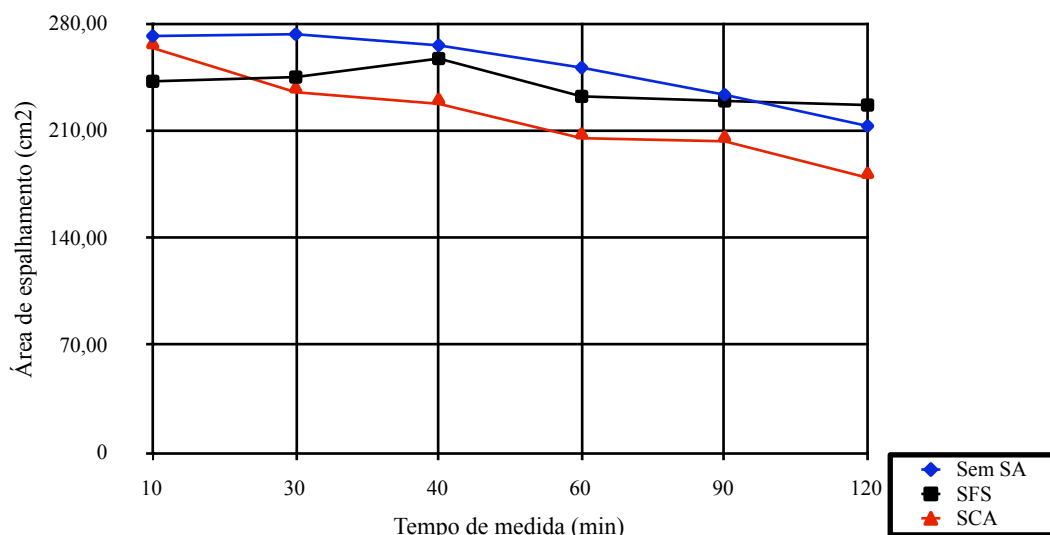
Com a determinação do teor de SP teoricamente considerado ótimo, a avaliação da trabalhabilidade com tempo foi iniciada. A tabela 2 apresenta as áreas de espalhamento determinadas para pastas com incorporação de 10% de SA em substituição volumétrica ao cimento preparadas com relação a/c de 0,40. Na figura 4, as áreas de espalhamento obtidas são plotadas em função do tempo de medida – curvas das áreas de espalhamento *versus* tempo de medida.

**Tabela 2** – Áreas de espalhamento obtidas a partir do ensaio de miniabatimento para pastas com incorporação de sílica ativa e aditivo superplastificante.

Tempo de medida (min)	Área de espalhamento (cm <sup>2</sup> )	
	SFS	SCA
10	242,18	263,88
30	244,95	235,06
40	257,02	227,51
60	232,35	205,10
90	229,39	203,08
120	226,71	179,32

**SFS** – sílica aditiva advinda da produção de ligas de Fe-Si ou silício metálico.

**SCA** – sílica ativa extraída da casca de arroz.



**Figura 4** – Curva da área de espalhamento versus tempo de medida para pastas com incorporação de sílica ativa e aditivo superplastificante.

A figura 4 mostra a influência da SA na trabalhabilidade das pastas de cimento e/ou aglomerantes. Pastas com a incorporação de SA apresentam menores áreas de espalhamento do que a pasta de cimento incorporada apenas com SP.

Analisando a efeito de cada SA empregada na mistura, observa-se comportamentos muito semelhantes para as duas pastas, porém a pasta com incorporação de SFS apresenta trabalhabilidades um pouco superiores que as pastas com SCA. Essa diferença deve-se à área superficial das sílicas analisadas: como a SCA possui área superficial maior que a SFS –  $94\text{m}^2/\text{g}$  contra  $20\text{ m}^2/\text{g}$  (valor médio) – a demanda de água é maior para que todas as partículas sejam envolvidas, ou seja, quanto menor a dimensão das partículas, maior a quantidade de água necessária para envolvê-las.

Também vale ressaltar que as duas pastas praticamente mantém suas trabalhabilidades ao longo do período de ensaio, isto é, por períodos de até 120 minutos após o cimento entrar em contato com a água.

#### 4. CONCLUSÕES:

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco é uma das propriedades que deve ser atendida, uma vez que de nada adianta empreender esforços na otimização da dosagem e redução dos custos de uma mistura se a mesma não puder ser transportada e lançada com facilidade ou adensada em sua totalidade, prejudicando suas características de resistência e durabilidade projetadas. Partindo desse princípio, a sua avaliação assume uma importância significativa, principalmente em se tratando dos concretos especiais, como é o caso do CAD.

A partir dos estudos iniciais desenvolvidos e apresentados neste trabalho, pode-se observar que vários fatores influenciam a trabalhabilidade do concreto fresco, dentre os quais destaca-se o consumo de água, o tipo de cimento, os teores de aditivos e de adições, etc. No caso do CAD, em particular, inserem-se, ainda, o uso de aditivos superplastificantes na intenção de se reduzir a quantidade de água e o uso de adições minerais como a sílica ativa.

Assim, neste primeiro estágio da avaliação de pastas de cimento e/ou de aglomerantes que serão empregadas na produção de CAD, observa-se a necessidade da otimização dos materiais



constituintes a fim de se melhorar a trabalhabilidade da mistura e, conseqüentemente, a durabilidade e resistência do concreto produzido a partir da mesma. Essas características são fundamentais para qualquer construção em concreto, especialmente às submetidas a meios com alta agressividade como a atmosfera marinha.

Estudos complementares estão sendo desenvolvidos para se avaliar as características de concretos produzidos a partir dessas pastas. Essa caracterização será feita a partir da determinação das propriedades reológicas do concreto por meio de ensaios específicos, como ensaio de abatimento de tronco de cone tradicional e modificado, consistômetro de Ve-Be e reômetro.

## **5. AGRADECIMENTOS:**

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela bolsa de estudo e apoio concedidos e às empresas Holcim S/A, MBT Brasil e Elkem Microssílica pela doação dos materiais empregados na pesquisa.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. AGULLÓ, L. *et al.* Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer – a study based on the Marsh con test. *Materials and Structures*, v. 32, n. 221, p. 479-485, Aug.-Sep. 1999.
2. AITCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. Tradução Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667p.
3. BUCHER, H. R. E. Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos. In: REIBRAC, 30., Rio de Janeiro, 1988. p. 609-625.
4. ERDOGDU, S. Compatibility of superplasticizers with cements different in composition. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 5, p. 767-773, May. 2000.
5. FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 2, p. 245-255, Feb. 2001.
6. GHIO, V. A. *The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process*. 1993. Tese (Doutorado) em Engenharia Civil pela Divisão de Graduação da Universidade da Califórnia em Berkeley.
7. LIBORIO, J. B. L. Conferência sobre concreto de alto desempenho. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS. Sobral/CE, Março, 2002.
8. LOBO, C. L.; FERRARIS, C. F. Processing of HPC. *Concrete International*, p. 61-64, Apr. 1998.
9. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994. 573p.