

## Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico

SENFF<sup>I</sup>, L.; HOTZA<sup>II</sup>, D.; REPETTE<sup>III</sup>, W.L.

<sup>I</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PGMAT), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 88040-900 Florianópolis, SC, Brasil

e-mail: [lsefff@gmail.com](mailto:lsefff@gmail.com)

<sup>II</sup> Departamento de Engenharia Química (EQA), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 88040-900 Florianópolis, SC, Brasil

e-mail: [dhotza@gmail.com](mailto:dhotza@gmail.com)

<sup>III</sup> Departamento de Engenharia Civil (ECV), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 88040-900 Florianópolis, SC, Brasil

e-mail: [wellington.repetto@gmail.com](mailto:wellington.repetto@gmail.com)

---

### RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o efeito da adição da sílica ativa (SA), nanossílica (NS) e aditivo dispersante policarboxílico (SP) sobre o comportamento reológico de pastas de cimento (CP V ARI RS). Para fins comparativos com a pasta de referência (REF), foram produzidas pastas com SA, em diferentes teores em massa (0 a 10%) e pastas com 1,0% de NS. Em todas as pastas estudadas (REF, SA e NS) variou-se SP entre 0 a 0,5%, relativos à massa de cimento. Os ensaios foram realizados em um reômetro com geometria de cilindros concêntricos e taxa máxima de cisalhamento aplicada de 100 s<sup>-1</sup>. Os aumentos de SP causaram a redução na área de histerese, na viscosidade plástica e na tensão de escoamento, sendo esta última mais influenciada que a viscosidade plástica. Nas pastas cujos resultados foram ajustados por Bingham, as misturas contendo um mesmo teor SP, a tensão de escoamento de Bingham não variou substancialmente, exceto nas pastas com 10% de SA e 0.1 a 0.3% de SP. Para a viscosidade plástica não foi observada tal tendência. Entretanto, NS influenciou significativamente o valor da viscosidade plástica em relação à REF e à SA. Nas pastas cujos resultados apresentaram aproximação satisfatória quando ajustados ao modelo de Bingham e Herschel-Bulkley, para uma mesma dosagem de SA, os aumentos nos teores de SP causaram redução na tensão de escoamento e na viscosidade plástica. O modelo de Bingham descreve adequadamente o comportamento reológico das misturas com a tensão de cisalhamento com valores intermediários, enquanto que o modelo de Herschel-Bulkley é mais adequado para as tensões máxima de cisalhamento elevadas ou reduzidas.

**Palavras-chaves:** sílica ativa, nanossílica, pasta de cimento.

---

## Rheological behaviour of cement pastes with addition of silica fume, nanosilica and polycarboxylic dispersant

### ABSTRACT

This article shows the results of an investigation about the effect of silica fume (SF), nanosilica (NS) and superplasticizer (SP) addition on the rheological behavior of CP V ARI RS cement pastes. Cement pastes with different content of SF (0 to 10 wt%) and 1.0 wt% NS were compared to REF (without mineral addition). For all samples studied (REF, NS and SF), SP ranged 0 to 0.5 wt% relative to cement. A rheometer with concentric cylinders geometry was used and the maximum shear rate of 100 s<sup>-1</sup> was applied. When SP is added into the mixtures, the hysteresis area, plastic viscosity and yield stress decreased. The latest was more affected than plastic viscosity. When SF was added, the yield stress did not change significantly, except in samples with 10 % SF and SP between 0.1 to 0.3 wt%. In relation to plastic viscosity, the difference was not visualized. However, NS influences more the plastic viscosity than REF and SF. The Bingham model describes properly the rheological behavior of mixtures at intermediate values of shear stress, while the Herschel-Bulkley model are more adequate at high and low values of shear stress.

**Keywords:** silica fume, nanosilica, cement paste.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais estratégias no desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil é aumentar a durabilidade dos materiais. Normalmente, nos materiais a base cimento Portland isso pode ser conseguido com a substituição parcial do clínquer Portland por adições minerais. A presença de tais adições modifica as características microestruturais e as propriedades dos materiais no estado fresco e endurecido. No entanto, o desempenho de um material cimentício depende da interação das adições com o cimento, sendo relevante a seleção criteriosa dos muitos materiais disponíveis e das proporções dos constituintes para sua composição.

Os materiais adicionados na forma de particulados finos apresentam forte tendência a formar aglomerações quando em contato com a água. Essas aglomerações são indesejáveis no caso do cimento Portland, uma vez que afetam o comportamento reológico no estado fresco [1] e as propriedades mecânicas e de durabilidade no estado endurecido. Desse modo, para produzir suspensões mais estáveis procura-se elevar as forças repulsivas entre partículas, favorecendo sua dispersão no meio aquoso. Aditivos químicos podem atuar através de fenômenos físico-químicos distintos e reações superficiais podem acontecer em pontos localizados das partículas de cimento que apresentam maior reatividade. Os compostos adsorvidos modificam as propriedades da superfície do cimento e suas interações com a fase líquida e com outras partículas sólidas, como agregados e adições [2].

Nos últimos anos, o uso de nanopartículas tem recebido atenção especial em muitos campos de aplicação com o propósito de fabricar materiais com novas funcionalidades. No caso dos materiais a base de cimento, as partículas de sílica de tamanho nanométrico, chamadas de nanossílica (NS), podem através das reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio, principalmente favorecer a maior formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Como resultado, uma maior densificação da matriz de cimento será obtida e, por conseguinte, uma maior resistência e durabilidade de pastas, argamassas ou concretos. Vários autores [3-13] estudaram a influência da nano-SiO<sub>2</sub> em propriedades como resistência a compressão ou flexão, índice de consistência, calor de hidratação, tempo de pega, além da microestrutura. Entretanto, não houve indicação do uso da reologia nos trabalhos consultados.

O controle dos parâmetros reológicos é importante na produção e qualidade dos concretos, pois no estado fresco o concreto é um material fluido e seu comportamento reológico influencia o seu processamento [14]. Nos últimos anos, os reômetros passaram a ser mais utilizados na caracterização dos materiais cimentícios com a vantagem de se realizar medições da viscosidade e tensão de escoamento simultaneamente para uma ampla faixa de taxas de deformação. O comportamento reológico de pastas, argamassa ou concreto pode ser representado pelo modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

onde  $\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa),  $\tau_0$  = tensão de escoamento (Pa),  $\mu$  = viscosidade plástica (Pa·s),  $\dot{\gamma}$  = taxa de cisalhamento (s<sup>-1</sup>).

Tal comportamento é um caso particular da equação de Herschel-Bulkley (HB):

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

onde  $k$  = índice de consistência,  $n$  = índice de comportamento do fluido. Para  $n < 1$ , o fluido é pseudoplástico;  $n = 1$ , newtoniano; e  $n > 1$ , dilatante.

De Larrard [15] demonstrou a possibilidade de reduzir o número de parâmetros para dois ( $\tau_0$ ,  $\mu'$ ) mantendo o modelo de HB. Nesse caso, a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) é definida pela equação HB, enquanto a viscosidade plástica ( $\mu'$ ) é calculada por:

$$\mu' = \frac{3k}{n+2} \dot{\gamma}_{\max}^{n-1} \quad (3)$$

onde  $\dot{\gamma}_{\max}$  é a taxa máxima de cisalhamento alcançada no ensaio.

O comportamento reológico das pastas de cimento no estado fresco depende de vários fatores de natureza distinta [16], como fatores físicos (relação água/cimento, forma e tamanho de partículas de cimento), fatores químicos e mineralógicos (composição do cimento e suas modificações estruturais devido a processos de hidratação), condições de mistura (taxa, tipo de misturador), condições de medição (instrumentos, procedimentos experimentais) e presença de aditivos. Alguns trabalhos [17-21] compararam o efeito das adições minerais (escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa) com as pastas de cimento padrão (sem adições). Foram usados reômetros com cilindros concêntricos e foram aplicados modelos distintos, tais

como Bingham, Herchel–Bulkley e Casson para a determinação da tensão de escoamento e viscosidade. Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar os resultados de um estudo sobre o comportamento reológico, no estado fresco, de pastas de cimento com adições de SA, NS e SP a base de ácido policarboxílico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados cimento CP V ARI – RS [22], aditivo dispersante ou superplastificante (SP) a base de ácido policarboxílico (Glenium 51, Basf), sílica ativa (SA) Microsilica 920 D, fornecida pela Elkem do Brasil e com dimensões de partículas entre 0,04 e 1,26  $\mu\text{m}$  área superficial entre 15 e 30  $\text{m}^2/\text{g}$  e nanossílica (NS) Gaia Nanosilice, fornecida por Ulmen, com partículas com dimensões de 3 a 150 nm e área superficial entre 20 e 1000  $\text{m}^2/\text{g}$  [23].

O programa experimental teve seu início com a produção de pastas de cimento sem a incorporação de SA e NS, denominadas de misturas de referência (REF). Em seguida, foram produzidas outras pastas com adições de SA, com teores em massa de 0, 2,5, 5,0 ou 10%. Além disso, 1,0% NS foi utilizada na forma de suspensão, sendo a quantidade de água incorporada com a NS descontada do teor nominal de água adicionada para o preparo da pasta. SP foi adicionado em teores de 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5%, correspondente à massa de cimento, sendo o teor de sólidos compreendido entre 28,5 a 31,5%. A relação água/aglomerante (cimento e SA ou NS) foi de 0,4. As matérias-primas foram colocadas no local onde foram executados os ensaios de reologia com um dia de antecedência a temperatura constante de 25°C. A homogeneização foi feita em um misturador mecânico, aplicando velocidade de 140 rpm durante todo o processo. O volume total misturado foi de aproximadamente 400 ml, sendo utilizados 70 ml para o ensaio de reologia.

O ensaio de reologia teve seu início 2 min após a produção das amostras em um viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos Thermo Haake DC 10, modelo VT 500. O controle da temperatura dos ensaios (25,0 $\pm$ 0,5 °C) foi feito através de um banho termostático acoplado ao equipamento. As análises reológicas foram obtidas com variação da taxa de deformação de 0 a 100  $\text{s}^{-1}$  (curva ascendente) e de 100 a 0  $\text{s}^{-1}$  (curva descendente), com um tempo de 3 minutos para cada curva. O aparelho forneceu diretamente os dados de tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento reológico das pastas de cimento com adição de SA, NS e SP são apresentados nas Figuras 1 a 5. O comportamento tixotrópico representado pela área de histerese é modificado significativamente com a variação de SP e SA. Essa área representa a energia necessária a ser aplicada para a quebra das estruturas formadas [14,24]. Quando SA é mantida constante e aumenta-se gradativamente o teor de SP na mistura, observa-se uma redução da área de histerese. Neste caso, as partículas de cimento e SA, tornam-se mais dispersas na mistura e conseqüentemente há uma redução na formação de aglomerados e a quantidade de energia a ser aplicada para destruir os aglomerados remanescentes é menor. Entretanto, quando o teor de SP é mantido constante e aumenta-se o teor de SA na mistura, um efeito contrário é observado, isto é, o aumento da histerese. Nesse caso, ocorre uma formação mais intensa de aglomerados na mistura devido à presença crescente de partículas finas de SA na mistura. Conseqüentemente, maior energia será necessária para romper essas estruturas formadas.

Para as amostras com NS, não foi possível identificar diferenças significativas nas áreas de histerese para SP = 0 a 0,2% ou SP = 0,3 a 0,5%. Esse efeito pode ser atribuído ao baixo teor de NS adicionado ou à dificuldade de dispersão da NS na mistura. O tamanho ultrafino da NS, associado à grande área de superfície implicam em grande reatividade superficial [25], a qual é responsável pela intensa interação química de interface [26] quando comparado às outras adições minerais. Na Figura 5, as áreas de histerese para SP = 0 a 0,2% são apresentadas em menor escala em função da limitação da tensão máxima de cisalhamento do equipamento que não permitiu a execução de taxas acima de 50  $\text{s}^{-1}$ .

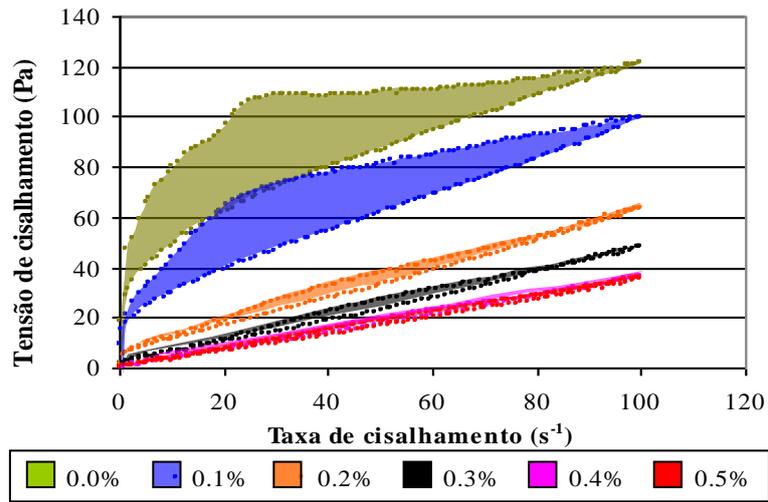


Figura 1: Comportamento reológico das pastas com 0% SA e 0 a 0,5% SP.

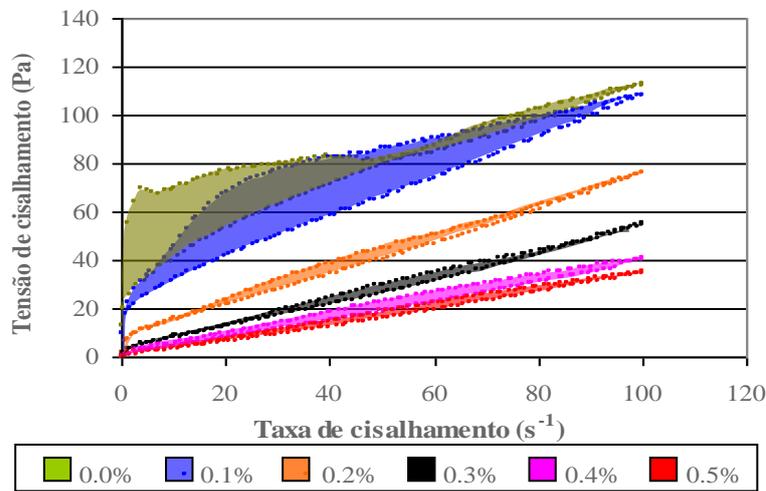


Figura 2: Comportamento reológico das pastas com 2,5% SA e 0 a 0,5% SP.

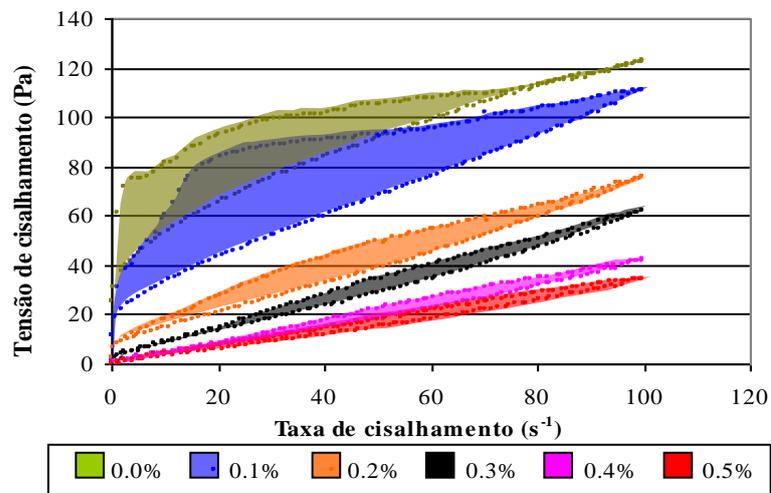


Figura 3: Comportamento reológico das pastas com 5,0% SA e 0 a 0,5% SP.

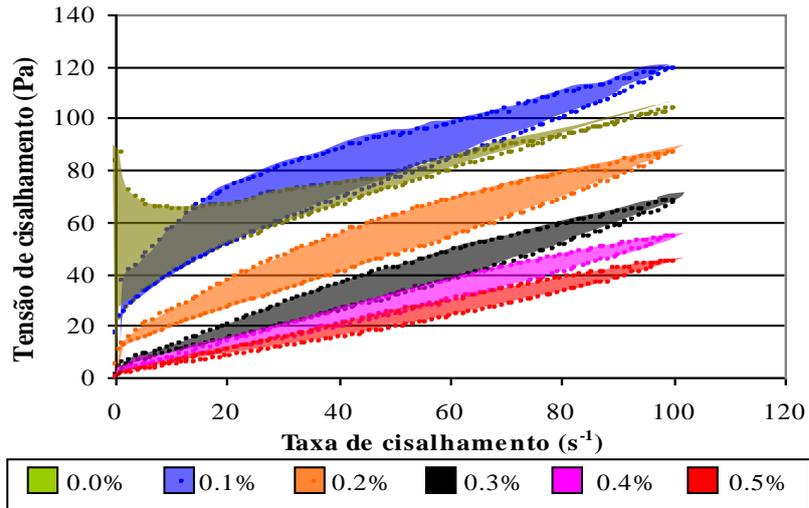


Figura 4: Comportamento reológico das pastas com 10,0% SA e 0 a 0,5% SP.

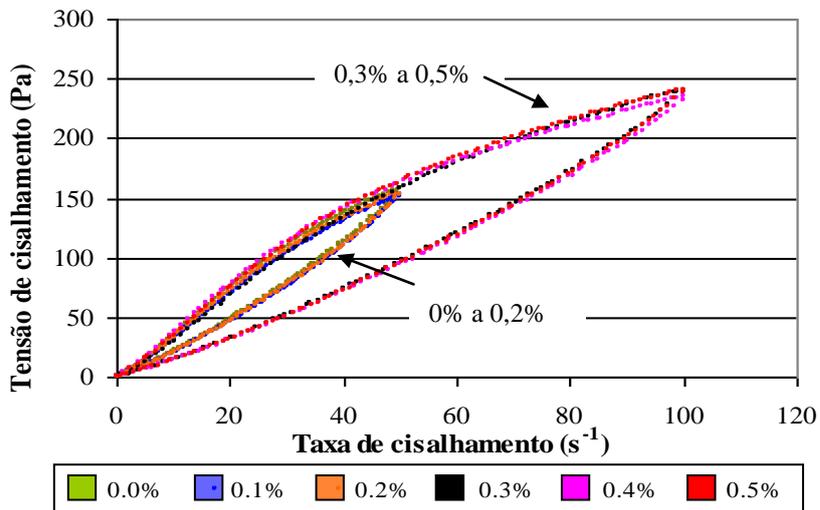


Figura 5: Comportamento reológico das pastas com 1,0% NS e 0 a 0,5% SP.

As amostras NS (Figura 5) com SP (0 a 0,2%), alcançaram uma tensão máxima de cisalhamento de aproximadamente 50% superior ao valor de SA (Figura 2). Para as misturas com NS (Figura 5) com SP (0,3 a 0,5%), a tensão máxima de cisalhamento foi praticamente o dobro do máximo valor alcançado por SA (Figura 3). Portanto, no caso de NS, o elevado valor alcançado pela tensão de cisalhamento implicou em uma elevada inclinação das curvas descendentes, o que dificultou o ajuste por Bingham, já que os valores de tensão de escoamento, obtidos por regressão linear, resultaram negativos (Tabela 1). Para as misturas (REF e SA) e com teores mais elevados de SP, observou-se também uma dificuldade no ajuste por Bingham. Neste caso, a baixa tensão de cisalhamento alcançada durante todo o ensaio associado aos valores iniciais da tensão de cisalhamento muito próximos a zero, devido à ação de dispersão de SP, e também resultou em valores negativos da tensão de escoamento inicial. Portanto, para tensões máximas de cisalhamento muito elevadas ou muito reduzidas, o modelo de Bingham não se mostra o mais apropriado. A Tabela 1 apresenta, respectivamente, os modelos de Bingham e Herschel Bulkley obtidos a partir das Figuras 1 a 5.

Em geral, a adição de SA, NS e SP influenciou os resultados da tensão de escoamento e viscosidade plástica. Para Banfill [27,28] o aumento gradual desses parâmetros reológicos pode estar associado à formação de estruturas tridimensionais, à redução da água no sistema devido à formação dos produtos hidratados e, também, à presença de partículas ultrafinas. Os resultados obtidos apresentam alguma

similaridade com trabalhos da literatura [17-21] que investigaram pastas de cimento e pastas com adições de sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante. Para Banfill [21], os valores típicos da tensão de escoamento e viscosidade plástica para pastas de cimento estão na ordem de 10-100 Pa e 0,01-1 Pa.s, respectivamente. Além disso, confirma-se que as pastas de cimento analisadas apresentaram um comportamento não-newtoniano. As pastas com SA e 0-0.1% SP apresentaram um comportamento pseudoplástico ( $n < 1$ ), enquanto as demais amostras apresentaram um comportamento dilatante ( $n > 1$ ), tipicamente observado em suspensões altamente concentradas.

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 1), o modelo de HB se mostrou mais apropriado para descrever o comportamento reológico das misturas. Quando o ajuste seguiu o modelo de Bingham, foram obtidos valores negativos de  $\tau_0$ , que não têm significado físico. Além disso, o ajuste das curvas por HB apresentou maiores valores para o  $R^2$ .

**Tabela 1:** Parâmetros reológicos segundo modelos de Bingham e Herschel-Bulckey das pastas de cimento estudadas.

Adição mineral (%)	SP (%)	Bingham			Herschel-Bulckey				
		$\tau_0$	$\mu$	$R^{2*}$	$\tau_0$	$\mu^{**}$	k	n	$R^{2*}$
SA (0)	0	45,3	0,79	0,9873	27,4	1,04	5,02	0,63	0,9989
	0.1	23,4	0,75	0,9984	20,5	0,80	1,18	0,91	0,999
	0.2	5,11	0,56	0,9988	7,2	0,54	0,34	1,11	0,9996
	0.3	0,29	0,47	0,9966	3,34	0,42	0,18	1,2	0,9995
	0.4	-0,43	0,36	0,9985	1	0,34	0,21	1,11	0,9995
	0.5	-0,63	0,35	0,9987	0,73	0,32	0,2	1,11	0,9996
SA (2.5)	0	36,5	0,82	0,9872	18,7	1,07	4,94	0,64	0,9989
	0.1	24,3	0,83	0,999	22,8	0,87	1,03	0,96	0,9992
	0.2	7,61	0,66	0,9986	10,3	0,63	0,38	1,12	0,9996
	0.3	1,80	0,51	0,996	5,27	0,44	0,18	1,21	0,9993
	0.4	-0,22	0,39	0,9967	2,13	0,36	0,16	1,19	0,9991
	0.5	-1,10	0,35	0,9967	1,18	0,31	0,13	1,2	0,9997
SA (5)	0	49,8	0,78	0,983	28,7	1,11	6,6	0,58	0,9996
	0.1	25,4	0,84	0,999	23,6	0,86	1,07	0,95	0,9991
	0.2	6,81	0,66	0,996	11,2	0,59	0,24	1,21	0,9991
	0.3	1,01	0,58	0,9945	5,58	0,52	0,17	1,26	0,9991
	0.4	-1,04	0,40	0,9931	2,56	0,36	0,1	1,3	0,9992
	0.5	-1,22	0,34	0,9933	1,68	0,28	0,08	1,29	0,9989
SA (10)	0	36,2	0,70	0,9908	23,4	0,88	3,43	0,68	0,9995
	0.1	33,3	0,84	0,9966	28,4	0,91	1,59	0,87	0,9979
	0.2	11,5	0,72	0,998	14,4	0,69	0,41	1,12	0,9989
	0.3	1,51	0,62	0,9936	6,89	0,55	0,16	1,29	0,9992
	0.4	-0,60	0,52	0,9929	4,02	0,43	0,12	1,3	0,9989
	0.5	-1,23	0,43	0,9909	3,04	0,36	0,08	1,35	0,9987
NS (1)	0	-14,5	3,21	0,9931	3,86	3,32	0,74	1,35	0,9995
	0.1	-14,6	3,11	0,9924	4,03	3,23	0,66	1,37	0,9994
	0.2	-14,4	3,13	0,9928	3,86	3,28	0,7	1,36	0,9994
	0.3	-18,7	2,40	0,9923	4,1	1,67	0,51	1,33	0,9995
	0.4	-18,7	2,35	0,9927	3,87	1,58	0,5	1,32	0,9995
	0.5	-19,6	2,39	0,9917	4,65	1,56	0,46	1,34	0,9993

\*  $R^2$ : coeficiente de determinação

\*\*  $\mu'$ : viscosidade plástica calculada através da Eq. (3)

Para ambos os modelos estudados, a adição de SP resultou na redução sucessiva da tensão de escoamento. Entretanto, as amostras com 0% SP não apresentaram uma tendência definida para a tensão de escoamento, quando SA foi adicionado na mistura. Neste caso, o efeito de aglomeração ou dispersão das

partículas pode ter influenciado nos resultados. Todas as misturas com NS e SA (para SP maior que 0,4%) apresentaram valores negativos para tensão de escoamento segundo o modelo de Bingham. Para as amostras com SA e SP entre 0,1 e 0,3% e ajustadas por Bingham, observa-se um efeito mais definido da SA sobre a elevação da tensão de escoamento, uma vez que SA são partículas cuja área superficial a ser molhada é maior que o cimento Portland substituído. Além disso, as misturas com SA e ajustadas por HB apresentaram valores inferiores da tensão de escoamento em relação a NS acima de 0,3% SP.

Para a viscosidade plástica, os sucessivos aumentos de SP na mistura causaram a diminuição gradativa dos seus valores em ambos os modelos. Quando os aditivos a base de ácido policarboxílico são adsorvidos pelas partículas, estes provocaram a defloculação e dispersão do sistema através do efeito eletroestérico, o que favorece a liberação da água antes aprisionada e confere maior fluidez à mistura [16,29]. Os resultados mostraram que a adição de SP atuou mais intensamente sobre a tensão de escoamento do que sobre a viscosidade plástica. Para Repette [30], a ação dos aditivos policarboxílicos, devido à maior massa molecular e tamanho das cadeias poliméricas, é mais intensa sobre a tensão de escoamento do que sobre a viscosidade plástica. A redução menos expressiva da viscosidade contribui para a estabilidade da mistura, diminuindo a ocorrência de segregação. No caso de SA, o efeito da sua adição não é tão significativo quanto aquele que ocorre para SP. Para a maioria das pastas, a adição sucessiva de SA favorece a elevação da viscosidade. A viscosidade plástica das amostras com NS apresentaram maiores resultados que as amostras com REF e SA, confirmando o efeito da maior reatividade de NS. O aumento na viscosidade plástica pode ser atribuído ao fato do dispersante não ter conseguido dispersar as partículas floculadas e, conseqüentemente, não ter ocorrido a liberação de água livre para atuar como lubrificante da movimentação de partículas.

As pastas de 2,5%SA com 0,1%SP e 5%SA com 0,1%SP, ajustadas por HB, apresentaram o valor de  $n \sim 1$ . Como conseqüência, os valores da tensão de escoamento e viscosidade plástica foram semelhantes aos valores obtidos pelo modelo de Bingham. A manutenção das mesmas condições de misturas para adições com características física e química distintas (NS e SA) dificulta em muitas vezes a análise dos parâmetros reológicos. No presente caso, por exemplo, foi necessário o uso de elevada quantidade de água na mistura com NS para que houvesse a possibilidade de ensaiar as amostras. Como conseqüência, os parâmetros reológicos sofreram reduções significativas para teores mais elevados de SP. Os resultados obtidos neste trabalho indicaram um comportamento similar ao que os autores encontraram em estudos realizados com argamassas [31,32]. Em todos os casos, o efeito da elevada área superficial associada a grande reatividade da SA e NS implicaram na elevação significativa da tensão de escoamento inicial quando comparada a viscosidade plástica. Além disso, causaram um aumento considerável dos parâmetros reológicos em relação às misturas sem adição (SA ou NS). Conseqüentemente foram responsáveis pela definição da quantidade de água adicionada e limitações quanto ao ensaio de reologia.

#### 4 CONCLUSÕES

Foi confirmado que SP e SA modificam significativamente o comportamento tixotrópico das pastas de cimento. Entretanto, para as pastas com NS e SP entre 0 a 0,2% ou 0,3 a 0,5% não foi possível identificar tal diferença. Além disso, as pastas com NS e SP (0 e 0,2%) apresentaram maiores dificuldades em relação à execução dos ensaios, devido ao valor máximo da tensão de cisalhamento alcançada. Para as amostras com SP de 0 a 0,2%, as pastas com NS apresentaram uma tensão máxima de cisalhamento 50% superior às pastas com SA, enquanto nas misturas com SP de 0,3 a 0,5%, a tensão máxima de cisalhamento para pastas com NS foi praticamente o dobro quando comparada a pastas com SA.

Quando o modelo de Bingham foi aplicado na modelagem do comportamento das pastas REF e SA, das pastas com teores elevados de SP e de todas as formulações com NS, a tensão de escoamento apresentou resultados negativos. Por outro lado, por ajustes segundo o modelo de Herschel-Bulkley, as pastas de cimento SA = 2,5% e SP = 0,1%, ou SA = 5% e SP = 0,1%, apresentaram o valor de  $n \sim 1$ , que corresponde a um fluido plástico ideal.

O aumento do teor de SP na pasta de cimento, mantidos SA ou NS constantes, causa a diminuição da viscosidade plástica e da tensão de escoamento, sendo essa última a que mais sofre influência da adição de SP. Para SP entre 0,1% e 0,3%, o efeito da adição de SA sobre a tensão de escoamento pode ser observado, enquanto que para a viscosidade, a diferença é menos intensa. Para 1% NS e SP acima de 0,2% é possível observar um aumento da viscosidade plástica em relação a REF e SA, quando o modelo de Herschel-Bulkley é utilizado.

## 5 AGRADECIMENTOS

L. Senff agradece ao suporte financeiro da CAPES através da concessão de uma bolsa. Os autores expressam sua gratidão a Ulmen, Votorantin, Elkem e Basf pelo fornecimento dos materiais utilizados neste trabalho.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] PARK, C.K., NOHB, M.H., PARKB, T.H., “Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, pp. 842-849, 2005.
- [2] JOLICOEUR, C., SIMARD, M.A., “Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physical-chemical concepts”, *Cement and Concrete Composites*, v. 20, n. 2-3, pp. 87-101, 1998.
- [3] COLLEPARDI, M., OLAGOT, O., SKARP, J.J., TROLI, R., “Influence of amorphous colloidal silica on the properties of self-compacting concretes”, In: *Proceedings of the International Conference in Concrete Constructions*, Dundee, Scotland, UK, pp. 473-483, 2002.
- [4] BJÖRNSTRÖM, J., MARTINELLI, A., MATIC, A., BÖRJESSON, L., PANAS, I., “Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement”, *Chemical Physics Letters*, v. 392, n. 1-3, pp. 242-248, 2004.
- [5] LI, G., “Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 6, pp. 1043-1049, 2004.
- [6] LI, H., HUI-GANG, X., YUAN, J., OU, J., “Microstructure of cement mortar with nano-particles”, *Composites Part B: Engineering*, v. 35, n. 2, pp. 185-189, 2004.
- [7] COLLEPARDI, M., “Admixtures-enhancing concrete performance”. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress of Global Construction*, Dundee, UK, pp. 55-66, 2005.
- [8] TAO, J., “Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 10, pp. 1943-1947, 2005.
- [9] LI, H., ZHANG, M., OU, J., “Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement”, *Wear*, v. 260, n. 11-12, pp. 1262-1266, 2006.
- [10] SHIH, J.Y., CHANG, T.P., HSIAO, T.C., “Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite”, *Materials Science and Engineering: A*, v. 424, n. 1-2, pp. 266-274, 2006.
- [11] JO, B.W., KIM, C.H., TAE, G., PARK, J.B., “Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles”, *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 6, pp. 1351-1355, 2007.
- [12] QING, Y., ZENAN, Z., DEYU, K., RONGSHEN, C., “Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume”, *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 3, pp. 539-545, 2007.
- [13] LIN, K.L., CHANG, W.C., LIN, D.F., LUO, H.L., TSAI, M.C., “Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar”, *Journal of Environmental Management*, v. 88, n. 4, pp. 708-714, 2008.
- [14] RAMACHANDRAN, V.S., BEAUDOIN, J.J., *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*, New York, Noyes / William Andrew, 2001.
- [15] FERRARIS, C.F., DE LARRARD, F., “Testing and modelling of fresh concrete rheology”, NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [16] PAPO, A., PIANI, L., “Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 11, pp. 2097-2101, 2004.

- [17] PARK, C.K., NOHB, M.H., PARKB, T.H., “Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, pp. 842– 849, 2005.
- [18] NEHDI, M., RAHMAN, M.A., “Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 11, pp. 1993–2007, 2004.
- [19] ROSQUO, F., ALEXIS, A., KHELIDJ, A., PHELIPOT, A., “Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 5, pp. 713-722, 2003.
- [20] SHIA, Y., MATSUIB, I., FENG, N., “Effect of compound mineral powders on workability and rheological property of HPC”, *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 1, pp. 71–78, 2002.
- [21] BANFILL, P.F.G., “Feasibility of a coaxial cylinders viscometer for mortar”, *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 2, pp. 329–339, 1987.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial*, Rio de Janeiro, ABNT, 1991.
- [23] SOBOLEV, K., FERRADA-GUTIÉRREZ, M., “How nanotechnology can change the concrete world: Part 2”, *American Ceramic Society Bulletin*, v. 84, n. 11, pp. 16-19. 2005.
- [24] ROUSSEL, N., “A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications”, *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 10, pp. 1797-1806, 2006.
- [25] BERGNA, H.E., ROBERTS W.O., *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*, New York / Taylor & Francis Group, 2006.
- [26] ILLER, R.K., *The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry*, New York / John Wiley, 1979.
- [27] BANFILL, P.F.G., “Influence of fine materials in sand on the rheology of fresh mortar”, In: *Proceedings of the British Mansory Society*, pp. 119-124, 1988.
- [28] BANFILL, P.F.G., “The rheology of fresh cement and concrete - a review”, In: *Proceedings of the 11th International Cement Chemistry Congress*, pp. 50-62, 2003.
- [29] RAMACHANDRAM, V.S., *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology*, New Jersey, Noyes, 1984.
- [30] REPETTE, W.L., “Concretos de última geração: presente e futuro”, In: ISAIA, G.C. (ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, v. 2, cap. 49, pp. 1509-1550, São Paulo, IBRACON, 2005.
- [31] SENFF, L., LABRINCHA, J.A., FERREIRA, V.M., HOTZA, D., REPETTE, W.L., “Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars”, *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 7, pp. 2487–2491, 2009.
- [32] SENFF L., BARBETTA, P.A., REPETTE, W.L., HOTZA, D., PAIVA, H., FERREIRA, V.M., LABRINCHA, J.A., “Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments”, *Construction & Building Materials*, v. 23, n. 10, pp. 3107–3111, 2009.