

Autorização concedida ao Repositório Institucional da Universidade de Brasília (RIUnB) pelo Professor João Henrique da Silva Rêgo, em 08 de outubro de 2018, para disponibilizar o trabalho, gratuitamente, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da obra.

REFERÊNCIA

FRAGA, Yuri Sotero Bomfim et al. Estado da arte dos métodos e efeitos da dispersão da sílica ativa e da nanossílica em pastas e argamassas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz Iguaçu. Anais... Foz Iguaçu: IBRACON, set. 2018.



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS E EFEITOS DA DISPERSÃO DA SÍLICA ATIVA E DA NANOSSÍLICA EM PASTAS E ARGAMASSAS

*STATE OF THE ART OF THE METHODS AND EFFECTS OF THE DISPERSION OF
SILICA FUME AND NANOSILICA IN PASTES AND MORTARS*

Yuri Sotero Bomfim Fraga (1); Lucas de Paula Vasques (2); João Henrique da Silva Rêgo (3);
Valdirene Maria Silva Capuzzo (4)

(1) Mestrando em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília

(2) Graduando em Engenharia Civil, Universidade de Brasília

(3) Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília

*(4) Professora Doutora, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília
yurisotero.engcivil@gmail.com*

Resumo

Os materiais cimentícios são muito utilizados na indústria da construção civil. Diversas pesquisas são realizadas em pastas, argamassas e concretos para melhorar o desempenho desses materiais. Atualmente, o desenvolvimento dos materiais cimentícios de alto desempenho é associado à utilização de adições minerais altamente reativas como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz. Diversos estudos mostram o efeito benéfico da utilização da sílica ativa e da nanossílica na produção de materiais cimentícios de alto desempenho. Apesar disso, devido ao pequeno tamanho das partículas, a sílica ativa e a nanossílica tendem a se aglomerar, como mostram figuras de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET) em diversos artigos. Para melhorar as propriedades dos materiais cimentícios com sílica ativa e nanossílica, alguns pesquisadores tem avaliado o efeito da dispersão dessas partículas através de alguns métodos. O presente artigo tem como objetivo realizar um estado da arte sobre os métodos de dispersão e o efeito da dispersão da sílica ativa e da nanossílica em pastas e argamassas no estado fresco e no estado endurecido. Foram avaliados os ensaios de calorimetria por condução, granulometria a laser, porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), MEV e resistência à compressão. Os resultados mostraram que a dispersão da sílica ativa e da nanossílica influencia nas propriedades dos materiais cimentícios.

Palavra-Chave: Sílica ativa. Nanossílica. Alto desempenho. Dispersão. Propriedades.

Abstract

Cementitious materials are widely used in the construction industry. Several researches are carried out on pastes, mortars and concretes to improve the performance of these materials. Currently, the development of the high-performance cementitious materials is associated with the use of highly reactive mineral additions such as silica fume, metakaolin and rice husk ash. Several studies show the beneficial effect of the use of silica fume and nanosilica in the production of high performance cementitious materials. However, because of the small particle size, silica fume and nanosilica tend to agglomerate, as shown by scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) images in several articles. To improve the properties of cementitious materials with silica fume and nanosilica, some researchers have evaluated the effect of the dispersion of these particles through some methods. The objective of this article is to carry out a state of the art of dispersion methods and dispersion effect of silica fume and nanosilica on fresh and hardened pastes and mortars. The conduction calorimetry, laser granulometry, mercury intrusion porosimetry (MIP), SEM and strength were evaluated. The results showed that the dispersion of silica fume and nanosilica influences the properties of cementitious materials.

Keywords: Silica fume. Nanosilica. High performance. Dispersion. Properties.

1 Introdução

Os materiais cimentícios são muito utilizados na indústria da construção civil. A partir de pesquisas com o objetivo de melhorar as suas propriedades, surgiram os materiais cimentícios de alto desempenho, que são materiais com aplicações específicas em estruturas especiais. O desempenho desses materiais complexos exige mais pesquisas para conhecer e melhorar as suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. As propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho (CAD), por exemplo, permitem modificações das regras de projeto que são aplicáveis em concretos convencionais, possibilitando a execução de estruturas mais complexas (CITEK et al., 2016).

As principais propriedades dos materiais cimentícios de alto desempenho no estado endurecido são elevada resistência mecânica e durabilidade, que normalmente são alcançados com mudanças nas suas características como redução da relação a/agl e utilização de adições minerais altamente reativas e nanomateriais.

As principais adições minerais altamente reativas utilizadas em materiais cimentícios são sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz com queima e moagem controladas. A sílica ativa é oriunda da indústria de ferro silício ou silício metálico. As partículas de sílica ativa são esféricas, apresentam elevada superfície específica e massa específica aparente baixa quando comparada com o cimento Portland.

A sílica ativa é a adição mineral altamente reativa que apresenta melhores resultados de ganho de resistência mecânica quando utilizada em materiais cimentícios. A alta reatividade pozolânica da sílica ativa é atribuída pelo seu elevado grau de amorfismo e pelo pequeno tamanho de suas partículas. A sílica ativa influencia na melhora do desempenho dos materiais cimentícios com a redução da sua porosidade, o refinamento da distribuição do tamanho dos poros e a criação de uma microestrutura densa. Por outro lado, devido ao seu pequeno tamanho, as partículas de sílica tendem a se aglomerar, o que minimiza o seu efeito nos materiais cimentícios (ZHANG et al., 2016a).

Devido à necessidade de melhorar cada vez mais as propriedades dos materiais cimentícios, é crescente o número de pesquisas com partículas cada vez menores. Nos últimos anos, a utilização de nanossílica nos materiais cimentícios tem ganhado destaque, pois apresenta grande potencial de aceleração da hidratação do cimento, melhorando a durabilidade, a resistência à flexão e a resistência à compressão devido à sua alta reatividade e ao efeito *filler* (CAI et al., 2017). Porém, assim como a sílica ativa, as partículas de nanossílica tendem a se aglomerar, diminuindo o seu potencial reativo.

Diante do exposto, o presente artigo possui como objetivo realizar um estudo do estado da arte dos principais métodos encontrados da literatura sobre a dispersão da sílica ativa e da nanossílica e verificar a influência da dispersão na microestrutura e no desempenho mecânico das pastas e argamassas.

2 Sílica Ativa

A sílica ativa é um resíduo da indústria de silício metálico e ligas de ferro-silício obtida através da redução do quartzo pelo carbono. Ela é produzida em grandes fornos elétricos de fusão, que operam em temperaturas acima de 2.000°C. A adição de sílica ativa aumenta a coesão, a resistência e a durabilidade dos concretos, melhorando também a

fluidez e a zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008). O processo de obtenção da sílica ativa é mostrado na figura 1.

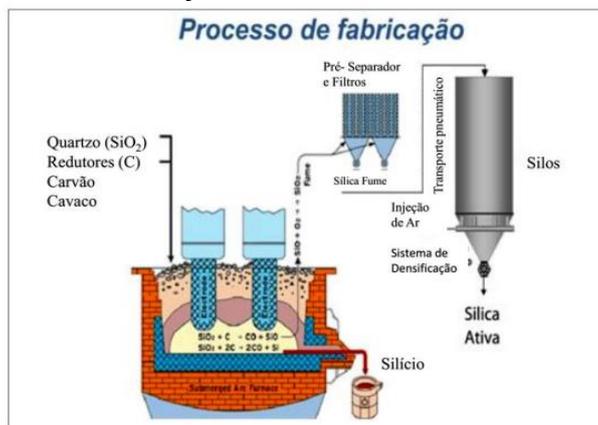


Figura 1 – Processo de obtenção da sílica ativa (GUIMARÃES (2014)).

2.1 Requisitos para Utilização da Sílica Ativa em Materiais Cimentícios

No Brasil, a norma que estabelece os critérios para utilização da sílica ativa em materiais cimentícios é a ABNT NBR 13956 (2012). Segundo essa norma, a sílica ativa pode ter duas classificações:

- Sílica ativa não densificada: quando não é submetida ao processo de beneficiamento por aglomeração das partículas, apresentando densidade aparente no estado solto entre 150 Kg/m^3 e 350 Kg/m^3 ;
- Sílica ativa densificada: quando é submetida ao processo de beneficiamento por aglomeração das partículas, apresentando densidade entre 350 Kg/m^3 e 700 Kg/m^3 .

Na tabela 1, são mostrados os requisitos químicos e físicos da sílica ativa para ser utilizada em materiais cimentícios.

Tabela 1 – Requisitos químicos e físicos da sílica ativa (ABNT NBR 13956 (2012)).

Determinação	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO_2^a	%	$\geq 85,0$	ABNT NBR 13956-2
Umidade ^b	%	$\leq 3,0$	
Perda ao fogo ^a	%	$\leq 6,0$	
Equivalente alcalino em Na_2O^a	%	Informar	
Teor de sólidos na dispersão aquosa ^c	%	Não pode variar mais do que $\pm 2\%$ do valor declarado pelo fabricante	
Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 13956-3
Finura por meio da peneira $45 \mu\text{m}$	%	$\leq 10,0$	ABNT NBR 13956-4
Área específica B.E.T. (opcional) ^d	m^2g^{-1}	$15 \leq \text{B.E.T.} \leq 30$	ASTM C 1069

^a A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após a determinação do teor de umidade a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.

^b Não se aplica à sílica ativa na forma de dispersão aquosa.

^c Não se aplica à sílica ativa nas formas densificada e não densificada.

^d O ensaio para a determinação da área específica, pelo método da ASTM C 1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), substituindo-se alumina e quartzo por sílica ativa, deve ser realizado pelo produtor quando solicitado pelo consumidor.

2.2 Efeito da Sílica Ativa nos Materiais Cimentícios

A reação pozolânica da sílica ativa consome o CH e aumenta o grau de hidratação do cimento. Além disso, o pequeno tamanho das partículas de sílica pode atuar como ponto de nucleação que acelera a hidratação do cimento, como mostrado na figura 2. Pode-se perceber que com a substituição de 10% do cimento Portland pela sílica ativa houve um aumento no pico do fluxo de calor e um deslocamento do pico para a esquerda, mostrando que a sílica ativa acelerou o processo de hidratação. A reação entre a sílica ativa e o CH produz mais C-S-H, que implica na melhoria do desempenho dos materiais cimentícios (LOTHENBACH, 2011).

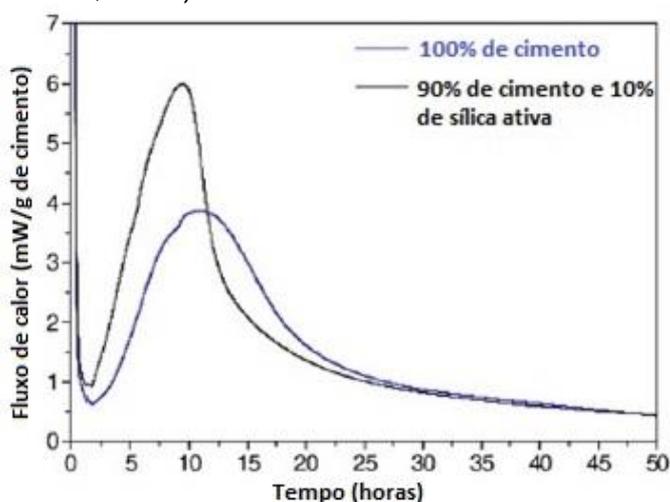


Figura 2 – Calor de hidratação de pastas cimento referência e com sílica ativa (LOTHENBACK et al. (2011)).

A sílica ativa é um material pozolânico muito reativo devido às suas características como alto teor de SiO_2 (> 90%), seu grau de amorfismo e a sua granulometria muito fina. A sílica ativa age de duas maneiras na microestrutura dos materiais cimentícios: o efeito pozolânico (químico) no qual a sílica ativa reage com o CH liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos resistentes de C-S-H, que tendem a preencher os vazios capilares e o efeito filler (físico) que densifica a microestrutura, pois as pequenas partículas preenchem os espaços entre os grãos de cimento Portland, diminuindo a sua porosidade (AITCIN, 2000). A figura 3 ilustra o efeito filler da sílica ativa.

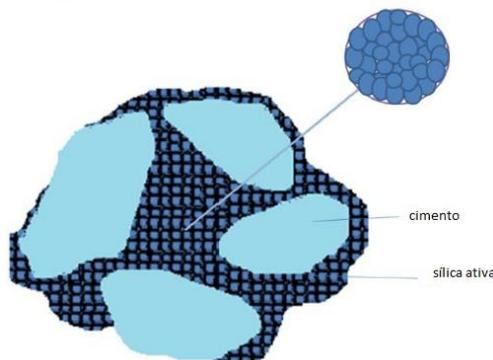


Figura 3 – Efeito filler da sílica ativa (SOUSA (2017)).

ABO-EL-ENEIN et al. (2015) pesquisaram sobre as propriedades físico-mecânicas de pastas de cimento contendo sílica ativa e cinzas volantes. Através das técnicas de DRX e DTA, foram estudadas as fases dos produtos de hidratação. Foi possível observar que a substituição do cimento Portland por 5% de sílica ativa e 30% de cinzas volantes resultou em uma menor porosidade quando comparada com a pasta referência aos 180 dias. Apesar disso, foi possível observar maior porosidade durante a hidratação até 28 dias. Isso demonstra que as reações de hidratação nas primeiras idades da pasta sem adição são mais rápidas quando comparadas com as pastas com essas adições, como mostrado na figura 4.

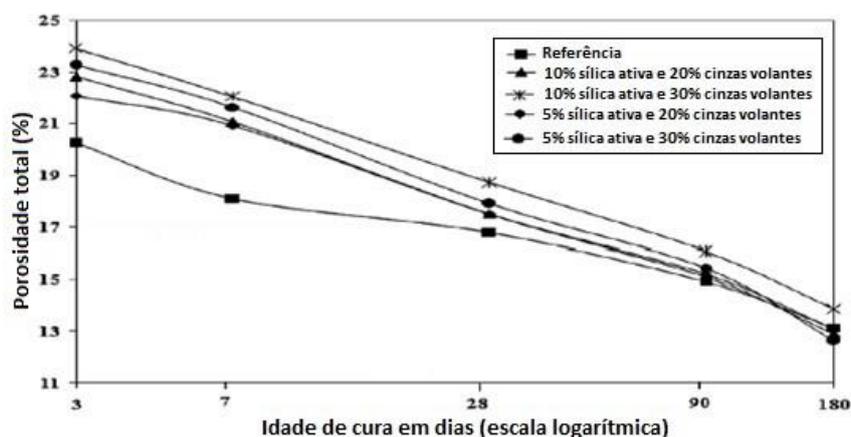


Figura 4 – Porosidade total das pastas de cimento contendo diferentes teores de sílica ativa e cinzas volantes em função da idade de hidratação (ABO-EL-ENEIN et al. (2015)).

No concreto, o principal efeito da sílica ativa é o refinamento da região de interface entre agregado e aglomerante. A sílica ativa tende a se concentrar nessa interface, evitando a formação de grandes cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Desse modo, o C-S-H gerado durante as reações pozolânicas e de hidratação aumenta a aderência da matriz com os agregados (KANNING, 2013).

De acordo com KHAYAT e AITCIN (1993), a adição de sílica ativa nos materiais cimentícios demanda o aumento da quantidade de água para manter a fluidez. Para produzir materiais cimentícios de alto desempenho, pode ser adicionada sílica ativa até o teor de 10%, porém deve ser feito o uso de aditivo superplastificante para manter a fluidez da pasta (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

3 Nanossílica

A nanossílica é um material altamente reativo que, em substituição ao cimento Portland, resulta na melhoria da resistência dos materiais cimentícios e no aumento da resistência à penetração de água, melhorando a durabilidade de pastas, argamassas e concretos.

A nanossílica possui as mesmas propriedades químicas que a sílica ativa, porém possui maior reatividade devido ao menor tamanho das suas partículas quando comparadas com o cimento Portland e com a sílica ativa. O resultado de granulometria a laser do cimento Portland, da sílica ativa e da nanossílica é apresentado na figura 5, sendo possível observar a diferença do tamanho dos grãos desses materiais (FLORES et al., 2017).

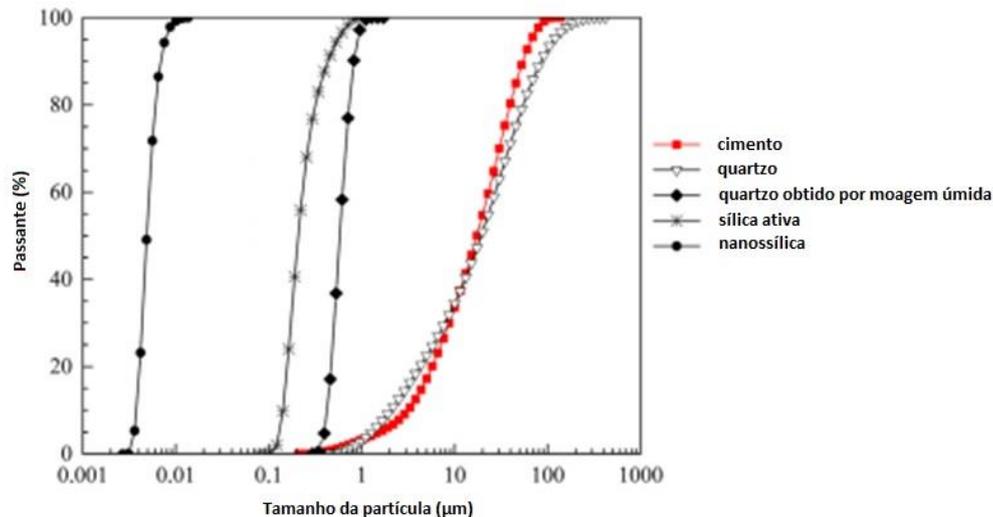


Figura 5 – Granulometria dos materiais cimentícios (FLORES et al. (2017)).

Quando o tamanho das partículas é reduzido, aumenta-se a área da sua superfície, aumentando também a sua reatividade. Dessa forma, espera-se que materiais muito finos e no estado amorfo contribuam para a melhoria de algumas propriedades dos materiais cimentícios.

3.1 Efeito da Nanossílica nos Materiais Cimentícios

A nanossílica demonstra ser mais eficiente no ganho de resistência nas idades iniciais do que a sílica ativa, pois além de proporcionar o efeito filler para melhorar a microestrutura de materiais cimentícios, também funciona como um ativador para a reação pozolânica. Esse comportamento altera a microestrutura com o refinamento dos poros que melhora as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios (GLEIZE, 2011). Esse refinamento dos poros pode ser observado através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) das pastas, como mostrado na figura 6.

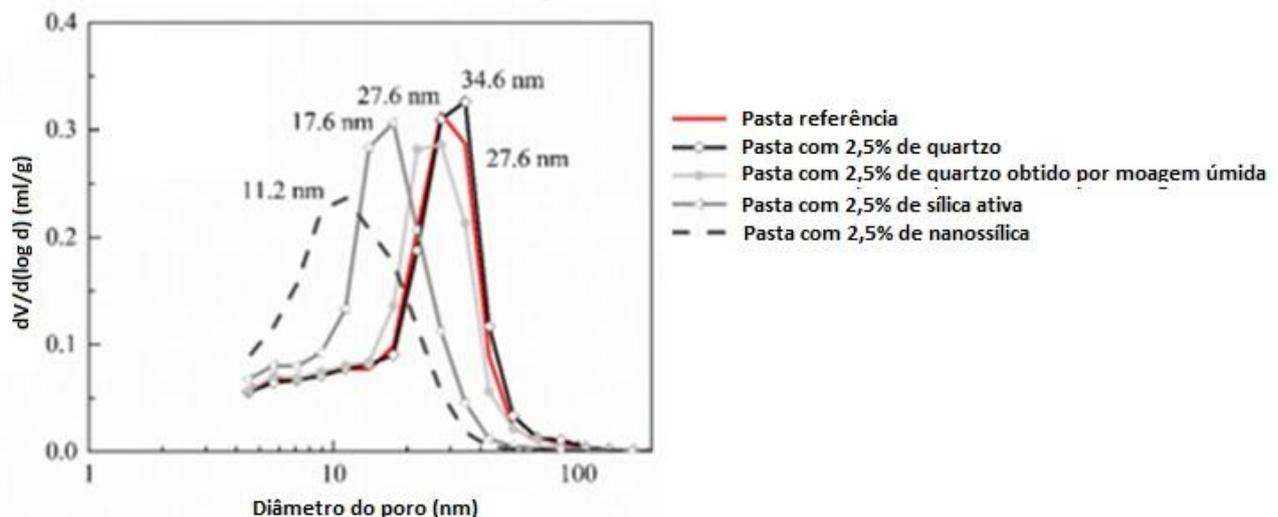


Figura 6 – Distribuição dos poros em pastas de cimento através do ensaio de PIM (FLORES et al. (2017)).
ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

CHOO LAEI et al. (2012) estudaram o efeito da adição de nanossílica em argamassas e perceberam uma redução na água livre, na permeabilidade e na porosidade devido à formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que possui uma estrutura mais densa, além do efeito fíller das nanopartículas que tendem a preencher os espaços vazios entre as fases presentes. Observou-se que com o passar do tempo a nanossílica preencheu os espaços entre as partículas de cimento, produzindo poros menores e aumentando a resistência da argamassa estudada.

SINGH et al. (2012) avaliaram a adição da nanossílica no teor de até 5% em pastas de cimento. Com um dia de idade, houve um aumento de 64% da resistência à compressão e aos 28 dias houve um aumento de 35% em comparação com a pasta referência. Foi possível observar maior reação pozolânica da nanossílica em comparação com a sílica ativa devido à alta área superficial de suas partículas.

FLORES et al. (2017) estudaram a performance de pastas de cimento com sílica ativa ou com nanossílica. Os resultados de calorimetria mostraram que a inclusão da sílica ativa e da nanossílica resultaram em uma aceleração da hidratação das pastas. A utilização da sílica ativa e da nanossílica foi responsável pelo refinamento da estrutura porosa e por um aumento na resistência à compressão da pasta de cimento, como observa-se na figura 7.

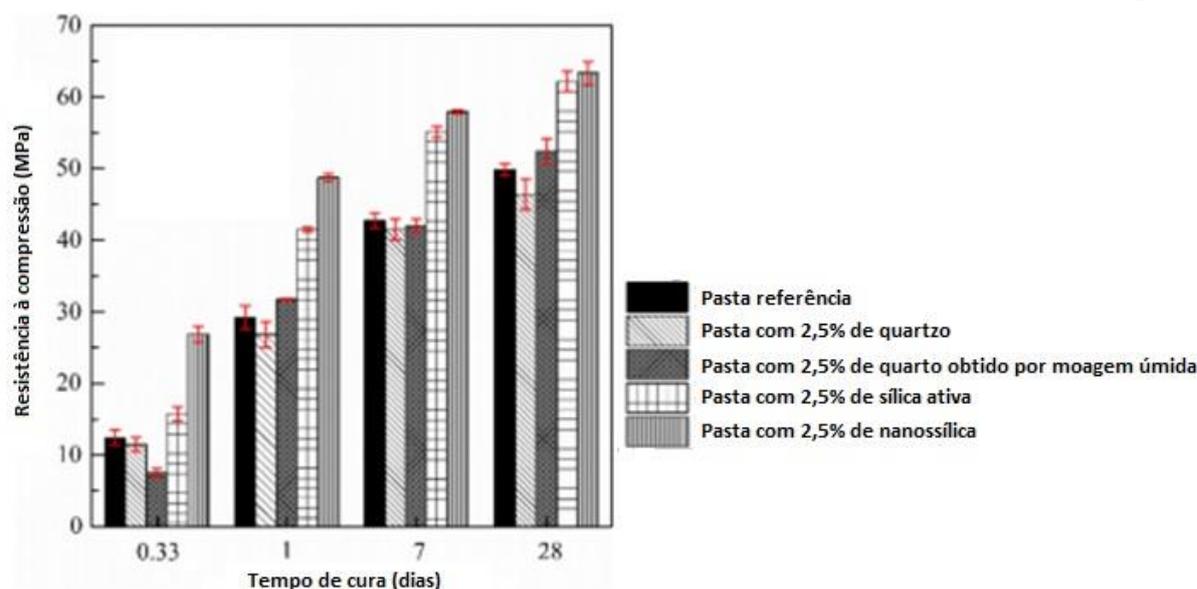


Figura 7 – Resistência à compressão de pastas de cimento Portland com sílica ativa e nanossílica (FLORES et al. (2017)).

QING et al. (2007) estudaram a influência da adição da sílica ativa e da nanossílica nas propriedades de pastas de cimento. Os resultados mostraram que houve influência da sílica ativa e da nanossílica na consistência das pastas. A nanossílica acelerou o processo de hidratação do cimento. A incorporação de nanossílica apresentou resultados de resistência à compressão superiores aos das pastas com sílica ativa, especialmente nas primeiras idades, como pode ser observado na tabela 2.

Tabela 2 – Proporção de mistura e resistência à compressão de pastas de cimento com sílica ativa e nanossílica (QING et al.(2007)).

Amostra	Proporção da mistura em massa					Consistência (mm) (profundidade da penetração)	Tempo de pega			Resistência à compressão (Mpa) (%)			
	cimento	nanossílica	sílica ativa	água	aditivo superplastificante		início	fim	Δt	1 dia	3 dias	28 dias	60 dias
CO	100	0	0	22	2,5	34	2h57min	4h23min	1h26min	48,9 (100)	61,1 (100)	79,2 (100)	94,9 (100)
A1	99	1	0	22	2,5	34	2h57min	4h05min	1h08min	49,2 (101)	71,6 (117)	94,7 (120)	101,6 (107)
A2	98	2	0	22	2,5	33	2h55min	3h50min	0h55min	49,8 (102)	72,6 (119)	95,8 (121)	102,5 (108)
A3	97	3	0	22	2,5	33	2h48min	3h40min	0h52min	52,0 (106)	82,2 (135)	97,6 (123)	105,8 (111)
A5	95	5	0	22	2,5	32	2h16min	3h06min	0h50min	53,0 (108)	86,1 (141)	98,8 (125)	108,8 (115)
B2	98	0	2	22	2,5	35	3h50min	4h45min	0h55min	47,5 (97)	61,0 (100)	84,2 (106)	101,5 (107)
B3	97	0	3	22	2,5	35	4h35min	5h20min	0h45min	47,3 (97)	60,4 (99)	92,0 (116)	104,3 (110)
B5	95	0	5	22	2,5	36	4h45min	5h28min	0h43min	47,0 (96)	60,0 (98)	95,3 (120)	106,9 (113)

4 Métodos de Dispersão da Sílica Ativa e da Nanossílica

Segundo VERAS-AGULHO et al., (2009), a utilização de pequenas partículas reflete em um maior grau de hidratação dos materiais cimentícios. Além disso, o grau de hidratação está diretamente ligado com a dispersão dessas pequenas partículas.

Devido ao pequeno tamanho, as partículas de sílica ativa e as partículas de nanossílica tendem a se aglomerar. Apesar da melhoria no desempenho mecânico desses materiais mesmo que aglomerados, é possível melhorar ainda mais esses resultados realizando a dispersão dessas partículas. Uma imagem de MEV da nanossílica aglomerada é mostrada na figura 8.

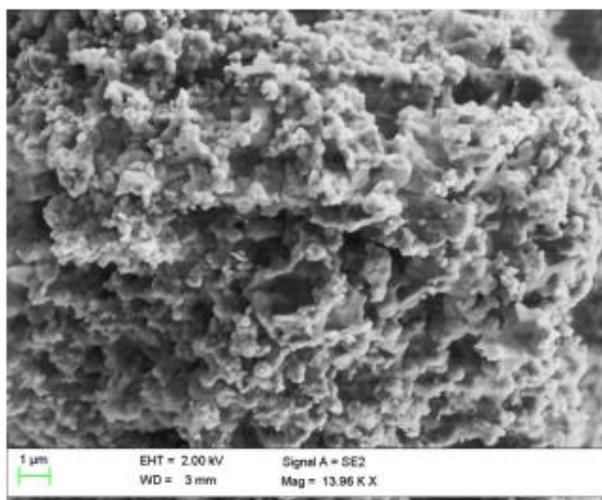


Figura 8 – Microscopia eletrônica de varredura da nanossílica (CHOLAEI et al. (2012)).

Na literatura, foi observado que diversos pesquisadores buscaram dispersar as partículas de sílica ativa e de nanossílica em seus estudos, mesmo que o foco das pesquisas não tenha sido estudar a dispersão. Na tabela 3 são mostrados os métodos utilizados para dispersar essas partículas.

Tabela 3 – Métodos de dispersão da sílica ativa e da nanossílica (Autoria própria (2018)).

MATERIAIS DISPERSADOS	MÉTODOS DE DISPERSÃO	AUTORES
Nanossílica em pó	Água, aditivo superplastificante e nanossílica foram pré-misturados por 1,5 minutos na velocidade de 120 rpm. Agregado miúdo, cimento e SF (se usados) foram adicionados ao misturador durante 2 min a 60 rpm. O processo foi seguido pela adição de água previamente misturada e SP. Depois disso, os materiais foram misturados durante 1,5 min a 120 rpm.	ZAPATA et al. (2013)
Sílica ativa	Aplicação de ondas ultra-sônicas com potência e frequência de 30W e 20kHz, respectivamente, em períodos que variaram de 15 s a 60 min.	JARAFI et al. (2014)
Nanossílica em pó	Primeiro, a quantidade especificada de nanossílica foi dissolvida em 500 mL de água com SP como o surfactante químico. Antes da ultrasonicação, a solução aquosa foi misturada à mão durante 1 min. O período de sonicação foi de 10 min, a uma potência de 400 W neste estudo. Durante a sonicação, foi fornecido um banho de gelo ao copo de vidro para evitar a evaporação de água.	DU et al. (2014)
Nanossílica em suspensão aquosa 40%	A suspensão de partículas de nanossílica foi pré-misturada com a água de mistura.	TOBÓN et al. (2015)
Sílica ativa	A sílica ativa foi dispersa através de uma pré-mistura de todos os materiais secos. Para preparar o cimento pré-misturado, utilizou-se um misturador rotativo RV02E da German Eirich. Foi utilizado um misturador inclinado com duas lâminas em um único eixo giratório. O processo de pré-mistura foi de 5 min onde os materiais misturados foram cimento, cinza volante, escória e sílica ativa.	HAN e HAN (2015)
Nanossílica em pó	As partículas de nanossílica foram primeiro dispersas com ultrassom. A sonicação foi realizada utilizando um dispositivo Hielscher UP400S de 24 kHz (Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Alemanha), capacidade de potência de 400 W, equipado com uma ponteira cilíndrica com 22 mm de diâmetro. A potência de saída foi regulada por meio de ajuste manual com amplitude da onda a 75% da capacidade máxima do dispositivo.	BARKOULA et al. (2016)
Sílica ativa	Primeiro, foi realizada a sonicação na solução de óxido de grafeno diluída usando um sonicador de buzina (VCX 500 W) por 5 min para garantir que o óxido de grafeno estivesse bem disperso. Para evitar o aumento da temperatura, um banho de gelo de água foi utilizado durante a sonicação. Depois, foi acrescentada a sílica ativa e foi iniciada a mistura com o misturador em velocidade lenta (4000 rpm) por 30 s para dispersar o óxido de grafeno e a sílica ativa.	LI et al. (2016)
Sílica ativa	A sílica ativa misturada com KH-550, álcool e água desionizada foi gradualmente dispersa por ondas ultra-sônicas (200 W) por 30 min à temperatura ambiente.	SHAO et al. (2016)
Sílica ativa	O aditivo superplastificante foi dissolvido em água e em seguida a sílica ativa foi incorporada e misturada 2 min. Depois disso, o cimento foi colocado no misturador e misturado por 3 min.	LEI et al. (2016)
Nanossílica em pó e em suspensão aquosa 25%	Foi feita a mistura mecanicamente em um misturador comercial ou ultrasonicamente em um béquer de vidro por 10 ou 20 min com a água de mistura pré-medida antes de colocar no misturador de argamassa. Para a nanossílica, a solução foi agitada e colocada diretamente no recipiente de mistura antes de adicionar o cimento e o agregado fino.	GHAFOORI (2017)

Atualmente, alguns métodos de dispersão estão sendo estudados e desenvolvidos. Foi possível destacar dois métodos de dispersão: misturador rotacional e ultrasonicação.

4.1 Dispersão com Misturador Rotacional

ROMANO et al. (2008) estudaram a dispersão da sílica ativa em água através de duas técnicas: misturador de baixa energia e dispersor de alta energia de cisalhamento. Ambos os métodos consistem em gerar condições de cisalhamento brando para dispersar as partículas aglomeradas. Os equipamentos utilizados podem ser observados na figura 9.

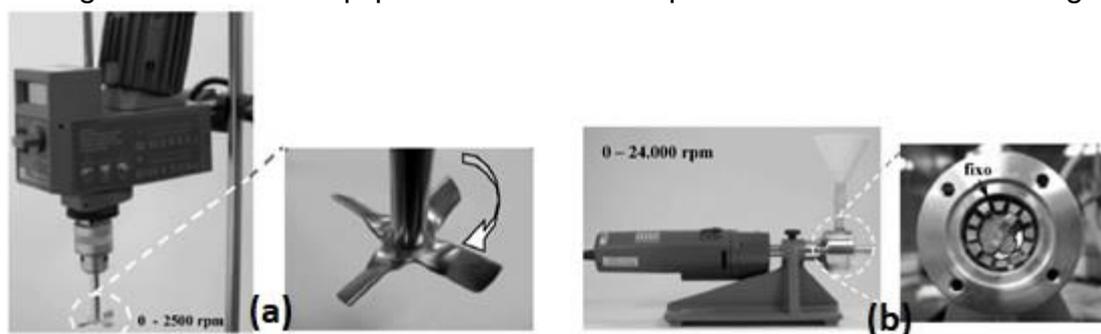


Figura 9 – Equipamentos utilizados na dispersão da sílica ativa (a) misturador rotacional com hélice naval IKA, modelo Labortechnik RW20, com potência do motor 70/35W e rotação máxima 2.500 rpm; (b) dispersor de elevada energia de cisalhamento IKA modelo Labortechnik T25 basic com potência 500/300W e rotação máxima 24.000 rpm (ROMANO et al. (2008)).

Os resultados de caracterização granulométrica, MEV e eficiência de dispersão mostraram que o dispersor de elevada energia de cisalhamento foi mais eficiente na dispersão da sílica ativa que o misturador com baixa energia. Por outro lado, mesmo o dispersor sendo mais eficiente, ele permitiu a obtenção de partículas com diâmetro médio (D50) de 20 μm , maior que o diâmetro das partículas desaglomeradas de sílica ativa que estão na faixa de 0,1 μm . Desse modo, os autores concluíram que a dispersão da sílica ativa demanda de equipamentos mais eficientes que os dois estudados.

4.2 Dispersão com Ultrasonicador

De acordo com a HIELSCHER (2018), fabricante de ultrasonicadores, a ultrasonicação é uma alternativa eficiente para a dispersão de pequenas partículas como sílica ativa, nanossílica e nanotubos de carbono. A dispersão ocorre quando o material é colocado em uma solução, que é sonicada. As ondas sonoras se propagam no meio líquido causando a colisão das partículas, que são desaglomeradas.

ZHANG et al. (2016b) estudaram o efeito da dispersão da sílica ativa densificada e não densificada em pastas, argamassas e concretos. Foram estudados os teores de 5% e 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland, com relações a/agl de 0,24 e 0,29. Os resultados mostraram que o teor de 10% de sílica ativa não densificada ultrasonicada com relação a/agl de 0,24 foi o que apresentou melhores resultados, com resistência à compressão no concreto superior a 130 MPa. As imagens de MEV da sílica ativa densificada e não densificada antes e depois da dispersão com ultrassom podem ser observadas na figura 10.

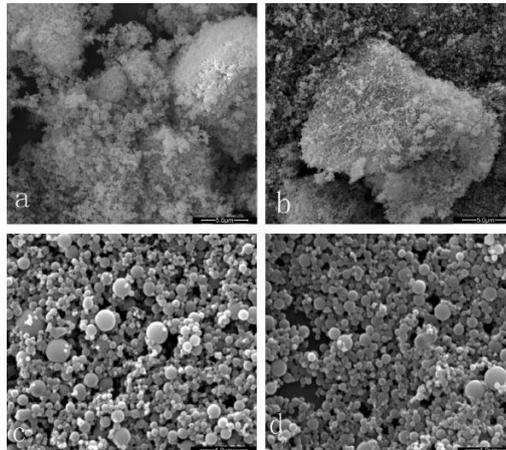


Figura 10 – Imagens de MEV (a) sílica ativa não densificada e não dispersa; (b) sílica ativa densificada e não dispersa; (c) sílica ativa não densificada e dispersa com ultrassom; (d) sílica ativa densificada dispersa com ultrassom (ZHANG et al. (2016b)).

RODRÍGUEZ et al. (2012) estudaram o efeito da ultrasonicação na reatividade da sílica ativa. Cinco diferentes tipos de sílica ativa foram submetidos ao tratamento com ultrassom para diminuir a aglomeração das partículas. A eficácia desse método foi observada com a redução na distribuição de tamanho das partículas de sílica ativa com o tratamento em comparação com as partículas de sílica ativa sem o tratamento, como pode ser observado na figura 11. Os resultados da caracterização microestrutural mostraram um aumento na reatividade da sílica ativa após o tratamento. Nesta pesquisa, foi utilizado o equipamento S-3000 da Misonix com potência de 600 W e frequência de 20 kHz por 10 minutos. A energia aplicada por unidade de massa durante o teste foi de 330 a 3300 J/g. Além disso, foi utilizado um resfriamento externo através de banho-maria para evitar aumento de temperatura acima de 40°C, que poderia levar à evaporação de água.

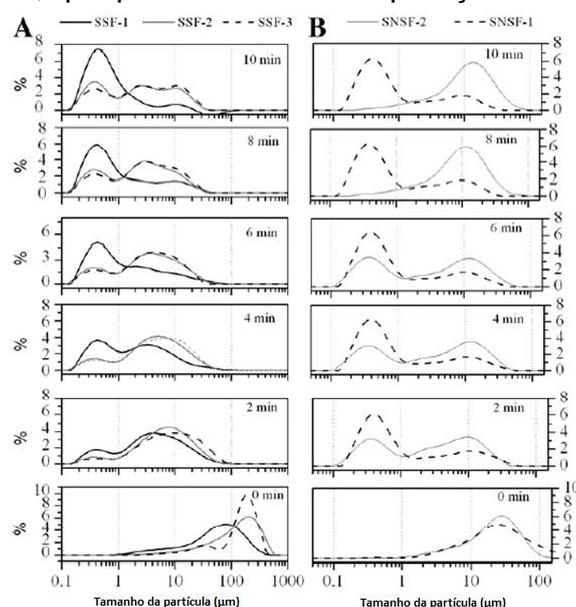


Figura 11 – Efeito da ultrasonicação da sílica ativa no tamanho das partículas (a) sílica ativa densificada ultrasonificada (SSF); (b) sílica ativa não densificada ultrasonificada (SNSF) (RODRÍGUES et al. (2012)).

CAI et al. (2017) estudaram os efeitos da adsorção da nanossílica na sílica ativa nas propriedades de materiais cimentícios nos estados fresco e endurecido. O processo de adsorção foi realizado com o auxílio do equipamento de ultrassom para dispersar as partículas de sílica ativa e nanossílica. Os parâmetros utilizados foram potência do ultrasonicador de 1200 W com diâmetro da sonda de 15 mm, amplitude de 30% e intervalos de sonicação de 2 segundos. Foi utilizado banho-maria de água gelada para evitar a evaporação de água durante o processo de ultrasonicação. Os resultados mostraram que a pré-adsorção da nanossílica pode melhorar as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios nas idades iniciais e avançadas.

5 Conclusões

A partir dos artigos pesquisados, foi possível concluir que:

- A utilização da sílica ativa e da nanossílica auxilia na melhoria no desempenho mecânico dos materiais cimentícios;
- Os métodos de dispersão da sílica ativa e da nanossílica mais pesquisados são: misturador rotacional e ultrasonicador;
- A dispersão da sílica ativa e da nanossílica modifica a microestrutura dos materiais cimentícios, melhorando o seu desempenho mecânico;
- O método mais eficaz para dispersão da sílica ativa e da nanossílica é a ultrasonicação.

6 Referências

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13956: **Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta**. Rio de Janeiro, 2012.

ABO-EL-ENEIN, S. A.; EL-KADY, G.; EL-SOKKARY, T. M.; GHARIEB, M. **Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash**. HBRC Journal. 2015.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. PINI, São Paulo, 2000.

BARKOULA, N. M.; IOANNOU, C.; AGGELIS, D. G.; MATIKAS, T. E. **Optimization of nano-silica's addition in cement mortars and assessment of the failure process using acoustic emission monitoring**. Construction and Building Materials, 546–552, 2016.

CAI, Y.; HOU, P.; CHENG, X.; DU, P.; YE, Z. **The effects of nanoSiO₂ on the properties of fresh and hardened cement-based materials through its dispersion with silica fume**. Construction and Building Materials, 148, 770–780, 2017.



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

CHOO LAEI, M.; RASHIDI, A.M.; ARDJMAND, M.; YADEGARI, A.; SOLTANIAN, H. **The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement.** Materials Science and Engineering A, 538, 288-294, 2012.

CITEK, D.; FORT, J.; PAVLIK, Z.; KOLISKO, J. **Experimental Investigation on Material Properties of Ultra - High Performance Fiber Reinforced Concrete in Extreme Conditions.** Advances in Engineering Research, volume 110, 3rd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME), 390–396, 2017.

DU, H.; DU, S.; LIU, X. **Durability performances of concrete with nano-silica.** Construction and Building Materials, 705-712, 2014.

FLORES, Y.C.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M. **Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica.** Construction and Building Materials, 146, 524-530, 2017.

GHAFOORI, N.; BATILOV, I.; NAJIMI, M. **Influence of dispersion methods on sulfate resistance of nanosilica-contained mortars.** Journal of Materials in Civil Engineering, 29 (7), 2017.

GLEIZE, P. J. P. **Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios.** In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

GUIMARÃES, J. P. F. **Sinergia entre a nanosílica e a sílica ativa na produção do concreto.** 56º Congresso Brasileiro do Concreto, Natal, 2014.

HAN, D.; HAN, M. **Effect of pre-mixed cement on the dispersion of silica fume in ternary blended cementitious paste.** Materials Research Innovations, vol. 19, 2015.

HIELSCHER. **Dispersão e desaglomeração ultra-sônica.** Disponível em: <<https://www.hielscher.com/pt/disperse.htm>>. Acesso em: 16 de abril de 2018.

JAFARI, V.; ALLAHVERDI, A.; VAFAEI, M. **Ultrasound-assisted synthesis of colloidal nanosilica from silica fume: Effect of sonication time on the properties of product.** Advanced Powder Technology, 1571-1577, 2014.

KANNING, R. C. **Utilização da Cinza de Folha de Bananeira como Adição em Argamassas de Cimento Portland.** Universidade Federal do Paraná. Tese de Doutorado. Curitiba, 2013.

KHAYAT, K. H.; AITCIN, P. C. **Silica fume in concrete – an overview.** In: International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 4, Istanbul, 1993.



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

LEI, D.; GUO, L.; SUN, W.; LIU, J.; SHU, X; GUO, X. **A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials.** Construction and Building Materials, 716–726, 2016.

LI, X.; KORAYEM, A. H.; LI, C.; LIU, Y.; HE, H.; SANJAYAN, J. G.; DUAN, W. H. **Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: A study of dispersion and compressive strength.** Construction and Building Materials, 327–335, 2016.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials.** Cement and Concrete Research, 1244-1256, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014.

QING, Y.; ZENAN, Z.; DEYU, K.; RONGSHEN, C. **Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume.** Construction and Building Materials, 21, 539–545, 2007.

RODRÍGUES, R. D.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.M. **Increase of the reactivity of densified silica fume by sonication treatment.** Ultrasonics Sonochemistry, 19, 1099-1107, 2012.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da técnica de dispersão nas propriedades da sílica ativa.** Cerâmica, 54, 456-461, 2008.

SHAO, D.; DIAO, J.; WANG, L.; LI, L. **Effect of surface modification on the compressive properties of silica fume/polyurethane composites.** Journal of Polymer Engineering, 2016.

SINGH, L.P.; BHATTACHARYYA, S. K.; AHALAWAT, S. **Preparation of Size Controlled Silica Nano Particles and Its Functional Role in Cementitious System.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 10, p. 345-352, 2012.

SOUSA, I. P. S. **Obtenção de nanossílica funcionalizada visando o uso como aditivo em misturas cimentícias.** Dissertação de Mestrado em Química – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

TOBÓN, J. I.; PAYÁ, J.; RESTREPO, O. J. **Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles.** Construction and Building Materials, 92-97, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D.C. **Concreto auto-adensável.** São Paulo: PINI, 2008.



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

VERAS-AGULHO, J.; CHOZAS-LIGERO, V.; PORTILLO-RICO, D.; GARCIA-CASAS, M.; GUTIERREZ-MARTINEZ, A.; MIERES-ROYO, J.; **Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials**. Nanotechnology in construction, vol. 3 Springer. Berlin Heidelberg, 2009.

ZAPATA, L. E.; PORTELA, G.; SUÁREZ, O. M.; CARRASQUILLO, O. **Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO₂ additions**. Construction and Building Materials, 41(4), 708–716, 2013.

ZHANG, Z.; ZHANG, B.; YAN, P. **Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures**. Construction and Building Materials, 483-490, 2016a.

ZHANG, Z.; ZHANG, B.; YAN, P. **Comparative study of effect of raw and densified silica fume in paste, mortar and concrete**. Construction and Building Materials, 82-93, 2016b.