



## Propiedades reológicas e mecânicas de um concreto auto adensável, com a adição de nano sílica e de micro sílica (sílica ativa)

E. Sánchez<sup>1</sup>, J. Bernal<sup>2</sup>, N. León<sup>3</sup>, A. Moragues<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad Politécnica de Madrid; España.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Mazatlán. Universidad Autónoma de Sinaloa. México.

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Universidad Politécnica de Madrid; España.

### Información del artículo

#### DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.111>

Artículo recibido el 22 septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 15 de Diciembre de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

## RESUMO

O concreto auto adensável é um concreto dosado para assegurar a sua correta colocação em estruturas fortemente armados em que o processo de vibração é muito complicado e haja risco de alterar a posição da armadura. Juntamente com as vantagens deste concreto e devido ao aumento da procura de concretos de alto desempenho, a micro sílica ou sílica ativa e, mais recentemente, os nano-materiais são usados como adições aos concretos. Principalmente a nano sílica. O objetivo deste trabalho é a obtenção de concreto auto adensável com uso de nano sílica, sílica ativa e misturas binárias das duas adições para atender a demanda de alta resistência mecânica e durabilidade. A mistura com melhor desempenho foi aquela com 2,5 % de nano sílica e 2,5% de sílica ativa.

**Palavras-chave:** concreto auto adensável; nano sílica; sílica ativa; reologia do concreto; propriedades mecânicas do concreto.

## ABSTRACT

Self-compacting concrete is the result of the redesign of quality mixtures with the ability to ensure its correct placement in strongly assembled structures, where the vibration process is too complicated and where there is the risk of altering the position of the reinforcement bars. Along with the advantages of this concrete and due to the greater demand for high performance concrete, fumed silica is used, and more recently, nanomaterials with nano-silica as well; mainly, nano-silica. The objective of this work is to obtain self-compacting concretes with nano-silica, fumed silica and binary mixtures of both, which satisfy the demands for high mechanical resistance and durability, determining that the dosage with the best features contains: 2.5% of nano and 2.5% of fumed silica.

**Keywords:** Self-compacting; nano-silica; fumed silica; rheology; mechanical properties.

## RESUMEN

El hormigón autocompactante es el resultado de diseñar mezclas de calidad con capacidad para asegurar su correcta colocación en estructuras fuertemente armadas en las cuales el proceso del vibrado resulta muy complicado y con riesgo de alterar la posición de las armaduras. Unido a las ventajas de este hormigón y debido a la mayor demanda de hormigones de altas prestaciones, se utiliza humo de sílice y, más recientemente, nanomateriales como adiciones. Principalmente nano-sílice. El objetivo de este trabajo es obtener hormigones autocompactantes con nano-sílice, humo de sílice y mezclas binarias de ambas adiciones que satisfagan la demanda de altas resistencias mecánicas y durables, determinando que la dosificación con mejores prestaciones es la que contiene 2.5% de nano y 2.5%.de humo de sílice.

**Palabras clave:** Autocompactante; nanosílice; humo de sílice; reología; propiedades mecánicas.

Autor de correspondência: Elvira Sánchez ([elvira.sanchez.espinosa@upm.es](mailto:elvira.sanchez.espinosa@upm.es))

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto auto adensável é aquele capaz de preencher os espaços da forma e das armaduras sem necessidade de uso de vibrador mecânico, ao mesmo tempo que se mostra adequado para os casos de excesso de armadura e haja risco de alterar a posição da armadura.

O Prof. Okamura e Ozawa (1996) iniciam o desenvolvimento desse concreto na Universidade de Tóquio, em meados dos anos 90, atualizando os critérios de dosagem e controle nos anos seguintes. (Okamura, 1997, Okamura e Ouchi, 1999, Okamura, Ozawa, e Ouchi, 2000, Okamura, Maekawa, e Mishima, 2005).

Esse concreto é caracterizado por uma relação água / cimento reduzida, alto teor de finos, que podem ser cimento mais filler calcário, um reduzido teor de agregado graúdo e a inclusão de aditivos superplastificantes.

Tudo isso permite a obtenção de um concreto de alta fluidez, que, por ação do seu próprio peso, tem um bom auto adensamento, aparentemente com pouquíssima exsudação ou segregação (De la Peña 2001, EHE-08, 2010). Na indústria de pré-moldado as vantagens da utilização deste concreto são ainda maiores, uma vez que aumenta a vida útil dos moldes porque reduz os danos ocasionados pelos vibradores aos moldes e reduz o ruído.

Juntamente com as vantagens do concreto auto adensável e, como resultado do aumento da procura de concreto de alta resistência, passou a ser conveniente utilizar os nano materiais como adições. Estes destinam-se a conferir características especiais, para o concreto, quer na sua capacidade resistente quanto na durabilidade.

Por conseguinte, o concreto a ser obtido é considerado como um concreto de alto desempenho, uma vez que não só tem de satisfazer a exigência de alta resistência mecânica, mas também deve atender a requisitos rigorosos relativos à durabilidade.

De todas as nano partículas pesquisadas, as mais utilizadas são a sílica, titânio, alumina e ferro (Sanchez e Sobolev, 2010). A natureza que deverá ser escolhida do tipo da nano partícula, depende das propriedades que se deseja melhorar ou se deseje conferir ao concreto destinado a uma certa função.

A maior concentração de estudos sobre a incorporação de nano partículas na área de engenharia civil são os relativos ao uso da nano-SiO<sub>2</sub> (Kawashima, Hou, Corr, Shah, 2013). A maioria dos estudos concorda que a incorporação de tais nano partículas produz mudanças micro estruturais porque é um ativador das reações pozolânicas (Bjornstrom, Martinelli, Matic, Börjesson, Panas, 2004).

De modo semelhante ao resultado já conhecido pelo uso de sílica ativa, a nano-SiO<sub>2</sub> reage com o hidróxido de cálcio Ca (OH)<sub>2</sub>, produzindo uma maior quantidade de gel de CSH para densificar o material, com a consequente redução de sua permeabilidade (Said, Zeidan, Bassuoni, Tian, 2012) e lixiviação de Ca<sup>2+</sup> (Nazari e Riahi, 2010).

O tamanho da sílica adicionada produz alterações no número e tamanho médio dos cristais de portlandita. Estas mudanças microestruturais estão associadas a mudanças nas propriedades macroestruturais das argamassas e concretos, tais como resistência à compressão, módulo de elasticidade (Yu, Spiesz, Brouwers, 2014; Zyganitidis, Stefanidou, Kalfagiannis, Logothetidis, 2011, e Leão, Massana, Alonso, Moragues, Sanchez-Espinosa, 2014), entre outras.

Existem vários estudos sobre a influência de nano sílica e de sílica ativa em concreto, comparando diferentes parâmetros (Mondal, Shah, Marks, Gaitero, 2010; Borralleras, 2012; Craeye, Van Itterbeeck, Desnerck, Boel, De Schutter, 2014; Rong, Sun, Xiao Jiang, 2015), mas há poucos trabalhos onde misturas binárias dessas duas adições tenham sido estudadas na dosagem de concreto auto adensáveis e de alto desempenho.

Portanto, o objetivo deste trabalho de pesquisa é o de estudar a influência da nano sílica e do micro sílica ou sílica ativa combinadas como adições em misturas binárias ao concreto auto adensáveis e de alta resistência, comparando propriedades reológicas e mecânicas com vistas a encontrar o teor ótimo da mistura dessas adições para as propriedades tanto no concreto fresco como no endurecido.

## 2. PROCEDIMENTO

Para os concretos estudados foi utilizado o cimento Portland CEM I 52,5 R (CP) de acordo com a norma EN 197-1, cujas propriedades são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do cimento Portland (CP), nanoSi (nSI) e microSi ou sílica ativa (mSI)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Pérda ao fogo (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Sup. espec. (m <sup>2</sup> /g)
<b>CP</b>	19.20	6.07	1.70	63.41	2.56	3.38	0.2	0,33	2,09	3,5	0,42
<b>nSi</b>	99.90	-	-	-	-	-	-	-	0,10	1,29	200
<b>mSi</b>	94	-	-	-	-	-	-	-			

A nano sílica (nSI) utilizada foi a Levasil 200/40% sob a forma de dispersão aquosa com uma riqueza de 40%, uma área superficial específica de 200m<sup>2</sup> / g e um tamanho médio de partícula de 15 nm. A sílica ativa (mSI) utilizada foi a Elkem Microsílica MS 940 U, composta de esferas amorfas não porosas, aglomeradas de SiO<sub>2</sub>, com uma superfície específica de 15 a 30m<sup>2</sup> / g e um tamanho médio de partícula das esferas de cerca de 150 nm.

Embora algumas das esferas encontram-se isoladas, a maioria delas ficam aglomeradas com um tamanho típico de 100 a 1000nm. Os aditivos utilizados foram: SIKA superplastificante ViscoCrete® 5720 (SP) (polycarboxylato) e aditivo modificador de viscosidade (MV) SIKA Estabilizador 4R. Os agregados utilizados nas misturas foram areia de rio com diâmetro inferior a 4 mm, pedregulho de 6mm a 12mm e filler calcário com granulometria conforme com a norma UNE 12620:2003+A1:2009, com um diâmetro máximo de 63.000 nm.

Foram dosadas dez misturas diferentes (ver Tabela 2). Todas as misturas mantiveram uma relação água / materiais cimentícios de 0,36. As dosagens foram: três com 2,5%, 5% e 7,5% de nano-SiO<sub>2</sub> ([nSi]-2,5; [nSi]-5; [nSi]-7,5), três com 2,5%, 5% e 7,5% de micro-SiO<sub>2</sub> ([mSi]-2,5; [mSi]-5; [mSi]-7,5), e três com as duas adições, com as percentagens de cada adição de 2,5% / 2,5%, 5% / 2,5% e 2,5% / 5% nano-SiO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub>, respectivamente ([nmSi]-2,5/2,5; [nmSi]-5/2,5; [nmSi]-2,5/5) em relação ao peso de cimento. Foi dosada uma décima mistura, sem qualquer adição, que será considerada como referência.

Para avaliar as características de auto adensamento dos concretos foram realizados ensaios no concreto fresco, padronizados de acordo com a norma EHE-08(2010). Tais ensaios foram o de espalhamento (UNE-EN 12350-8), o teste V funil (EN 12350-9), o ensaio da caixa L (UNE-EN 12350-10) e o ensaio de escoamento com anel japonês (UNE-EN 12350-12).

Comprovados o auto adensamento das misturas, procedeu-se à moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de 100mm por 200mm e dois corpos de prova normalizados de 150mm de diâmetro e altura de 300mm. Essas amostras foram mantidas no laboratório durante 24 h. Após esse tempo, foram desmoldados e submetido a cura por 28 dias numa câmara a uma temperatura de 20 ± 2 ° C com humidade superior a 95%, de acordo com a norma UNE-EN 12390-2.

Tabela 2. Estudo de dosagem dos concretos

Componentes (kg/m <sup>3</sup> )	HAC	[mSi]-2,5	[mSi]-5	[mSi]-7,5	[mSi]-2,5	[mSi]-5	[mSi]-7,5	[mSi]-2,5/2,5	[mSi]-5/2,5	[mSi]-2,5/5
<b>Cimento</b>	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
<b>Nano sílica</b>	-	11,25	22,5	33,75	-	-	-	11,25	22,5	11,25
		2,5%	5%	7,50%				2,5%	5%	2,5%
<b>Sílica ativa</b>	-	-	-	-	11,25	22,5	33,75	11,25	11,25	22,5
					2,5%	5%	7,50%	2,5%	2,5%	5%
<b>Água</b>	162	166,0	170,1	174,1	166,0	170,1	174,1	170,1	174,1	174,1
<b>Filler calcário</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>Areia</b>	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
<b>pedregulho 6/12</b>	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585
<b>SP(%)*</b>	2	3,30	4	6	2,30	2,50	2,70	3,60	4,80	3,90
<b>MV (%)*</b>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

(\*) Porcentaje en peso de cemento.

Para caracterizar os concretos de acordo com as suas propriedades mecânicas foram ensaiados 3 corpos de prova a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias de idade de acordo com a norma UNE-EN 12390-3. O tamanho máximo do agregado inferior a 12mm, viabilizou o uso deste ensaio (Fernandez, 2013).

Além disso, aos 28 dias de cura, procedeu-se a determinar a resistência à tração, testando 2 amostras de 100x200 mm de acordo com a UNE EN 12390-6: 2001. Os 2 corpos de prova de 150x300 mm foram ensaiados com a mesma idade para determinar o módulo de elasticidade de acordo com a norma UNE-EN 83316: 1996.

Estes testes foram realizados em uma prensa IBERTEST, com uma capacidade máxima de 1.500 kN. Para determinar as deformações foi utilizado sistema LVDT marca IBERTEST com um computador de aquisição de dados.

As cargas foram uniformemente aumentadas a uma velocidade de 0,2 MPa/s, durante três ciclos sucessivos de carga e descarga para 40% da resistência à compressão.

O corpo de prova restante foi utilizada para a caracterização micro estrutural das misturas. Para isso foi feito, para todas as idades e misturas concebidas, uma análise termo gravimétrica (TGA) aos 7, 28 e 91 dias, de acordo com a norma ASTM E1131: (2008).

Para este teste, uma amostra do pó, foi utilizado com um tamanho de partícula inferior a 0,5mm. Para se conseguir essas características se utilizou uma amostra de 20mm depois de eliminado os 20mm mais externos. A amostra obtida foi submetida a um moinho de mandíbulas para obter partículas de tamanhos inferiores a 8 mm.

Estas partículas foram colocadas num dessecador ligado a uma bomba de vácuo, que assegurou uma pressão de vácuo entre 1 e 5 kPa. Manteve-se as amostras no dessecador durante 45 minutos. Posteriormente, foram imersas por 24 horas em isopropanol a 95% a fim de deter os processos de hidratação no concreto. Finalmente as amostras foram secas em estufa a 40° C durante um tempo mínimo de 72h para assegurar a secagem completa da amostra.

Antes de realizar o ensaio, as partículas foram trituradas num almofariz de aço manualmente, dando acabamento de refinação do grão no moinho de ágata, Retsch RM 200. O processo termina por peneiramento do pó através de um crivo/peneira de 0,5 mm. A massa moída, pesando aproximadamente 300 g, foi agitada em saco fechado para homogeneizar.

Foi realizado o quarteamento da amostra, dividindo-a em 8 partes até completar 2g, que então foram colocadas em estufa a 40° C durante 7 dias até estabilizar. O equipamento utilizado foi um analisador térmico simultâneo, marca SETARAM, modelo LABSYS EVO, com uma balança de precisão de 0,1 g. Para o ensaio foi empregada uma amostra de aproximadamente 55 mg, a qual foi sujeita a uma rampa de aquecimento dinâmica de 40° C a 1.100° C com velocidade de 10°C/minuto.

Cadinhos de alumina foram usadas como materiais de referência  $\alpha$ -alumina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), previamente calcinada a 1200 ° C, a uma atmosfera de ensaio de nitrogênio (N<sub>2</sub>).

Esta análise permitiu determinar a quantidade de CSH e portlandita (Ca (OH)<sub>2</sub>, presente em cada concreto. Para este efeito, foram determinados os valores das perdas de água de gel submetendo a amostra a temperaturas entre 105 ° C e 400° C. As perdas de água de Portlandita livre foram obtidos numa gama de temperatura entre 400° C e 600 ° C aproximadamente.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1 Propriedades reológicas**

Na inspeção visual das 10 misturas não foi observado segregação nem exsudação. Este resultado é contrário ao obtido por Dubey e Kumar (2012) que dizem que mais de 2% de um aditivo super plastificante tipo carboxalato, semelhante ao utilizado no presente estudo, induz a mistura à segregação.

No entanto, as avaliações visuais das misturas mostraram uma grande quantidade de borbulhamento nas misturas com nSi. Este fenómeno pode ser atribuído à quantidade elevada de super plastificante, necessária para obter a trabalhabilidade desejada conforme explica Borrelleras Mas (2012).

No caso desta pesquisa não foi determinado o teor de ar incorporado nem ar aprisionado. No entanto, Yu et al. (2014) realizaram ensaios em concreto de alto desempenho com um teor de nano sílica entre 1% a 5% e quantidade fixa de super plastificante, verificando que o teor de ar do concreto fresco aumentou exponencialmente com o aumento do teor de nSi. Essa constatação coincide com a desta pesquisa e permite concluir que tanto a quantidade de SP como de nSi, podem acarretar aumento dos teores finais de ar aprisionado/incorporado.

Além disso, para avaliar se essa quantidade de ar pode ser removida, as misturas foram repetidas e energeticamente vibradas em mesa vibratória, mas o ar não saiu da mistura que permaneceu homogênea e coesa.

Observou-se também que a camada de superfície tinha uma aparência de plástico, que não permitia a expulsão das referidas bolhas. Posteriormente foram realizados ensaios de resistência à compressão e PIM e não foram observadas diferenças significativas entre as misturas, razão pela qual esses resultados não estão aqui publicados.

A proposta dos autores deste estudo para mitigar a quantidade de bolhas é dar maior energia ao concreto misturado, e aumentar o tempo de mistura, conseguindo assim que as bolhas sejam expulsas através dos movimentos mecânicos, obtendo inclusive boa trabalhabilidade da mistura fresca. Também é recomendável utilizar mais um aditivo de natureza condensado de polietileno para atuar como agente anti-espumante.

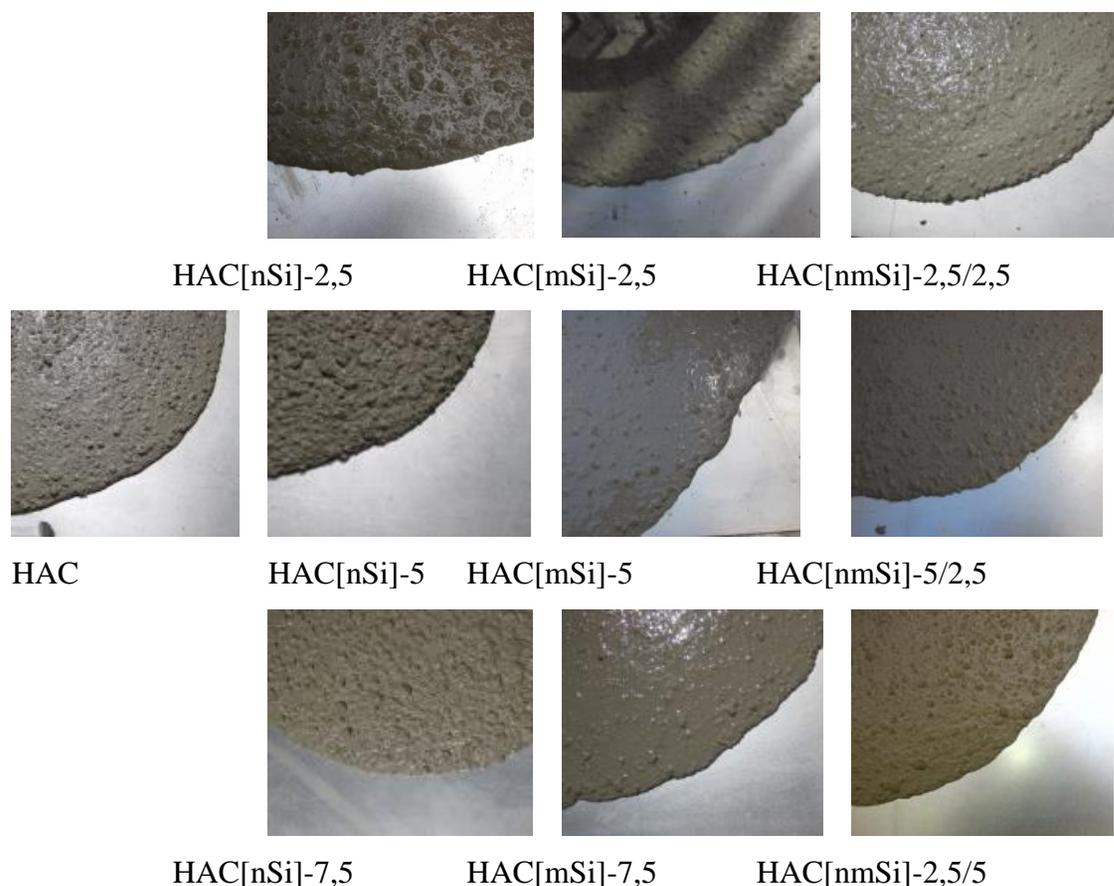


Figura 1. Aspecto da borda das diferentes misturas, em estado fresco, depois do ensaio de escoamento.

Os valores obtidos nos vários ensaios para verificar o auto adensamento do concreto, de acordo com a EHE-08 (2010), são mostrados nas Figuras 2, 3, 4 e 5. Estas apresentam o diâmetro de escoamento ( $d_f$ ) (Figura 2), o tempo de  $T_v$  que passa através do funil em V (Figura 3), a taxa de escoamento da caixa L ( $C_{bl}$ ) (Figura 4) e o diâmetro de escoamento com anel japonês ( $d_{if}$ ) (Figura 5).

Na Figura 2, em geral, observa-se que o diâmetro de escoamento varia de 550 mm a 850 mm. Além disso, não mostram segregação ou exsudação, apesar de ter grandes quantidades de super plastificante e até mesmo, no caso da mistura [nSi]-7,5, teor superior ao permitido pela (EHE-08), que é de 5%.

Estes resultados contradizem Dubey e Kumar (2012) que dizem que com mais de 2% de super plastificante, semelhante ao utilizado no presente estudo, sempre haverá risco de segregação. Inclusive alguns autores, (Borralleras, 2012), que argumentam que existe um teor ótimo máximo de super plastificante, teor esse não observado nesta pesquisa experimental.

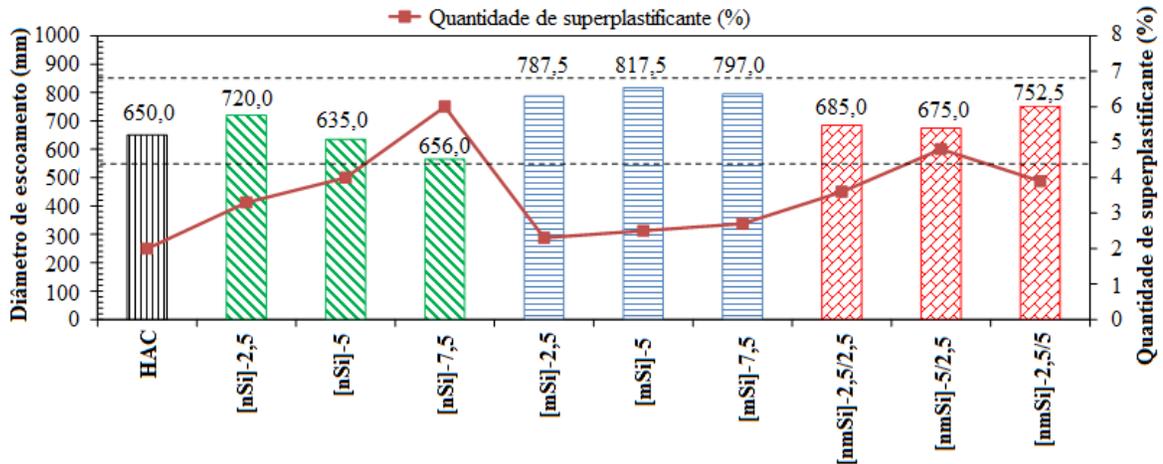


Figura 2. Diâmetro de escoamento ( $D_f$ ) (mm) e quantidade de superplastificante.

Também é possível observar a existência de uma clara influência do tipo de adição. Assim, misturas com adição de nSi mostram uma diminuição do diâmetro de escoamento à medida do aumento do teor de nano sílica. Isso resulta em uma fluidez menor com aumento brutal da coesão, mesmo quando há um aumento de 6% no teor de aditivo super plastificante, muito acima do limite recomendado pela EHE-80.

Este fenômeno não ocorre quando sílica ativa mSi é usada como uma adição. Neste caso, há pouca variabilidade de diâmetro, que é cerca de 800 mm, ou seja, máxima fluidez. Finalmente, nas misturas binárias, observa-se como a nano sílica nSi compromete a fluidez sendo sempre necessário aumentar o teor de super plastificante.

Jalal et al. (2012), afirmam que tanto a nSi quanto a mSi melhoram a fluidez do concreto auto adensável, mas não avaliaram o quanto interfere na trabalhabilidade um aumento de teores dessas adições. No entanto, observam que teores de 2% de nSi não alteram substancialmente a trabalhabilidade do concreto fresco e por essa razão estudaram misturas com 2% de nSi e 10% de mSi. Por outro lado, esta quantidade elevada de adições e aditivos pode induzir bolhas e isto é diretamente proporcional aos teores adicionados (Nazari e Riahi, 2010).

Estas bolhas podem resultar em poros não interligados no material endurecido, o que pode comprometer as características de resistência do concreto de modo que é recomendável utilizar junto com o superplastificante um outro aditivo antiespumante à base de condensado de polietileno (Jalal et al., 2012).

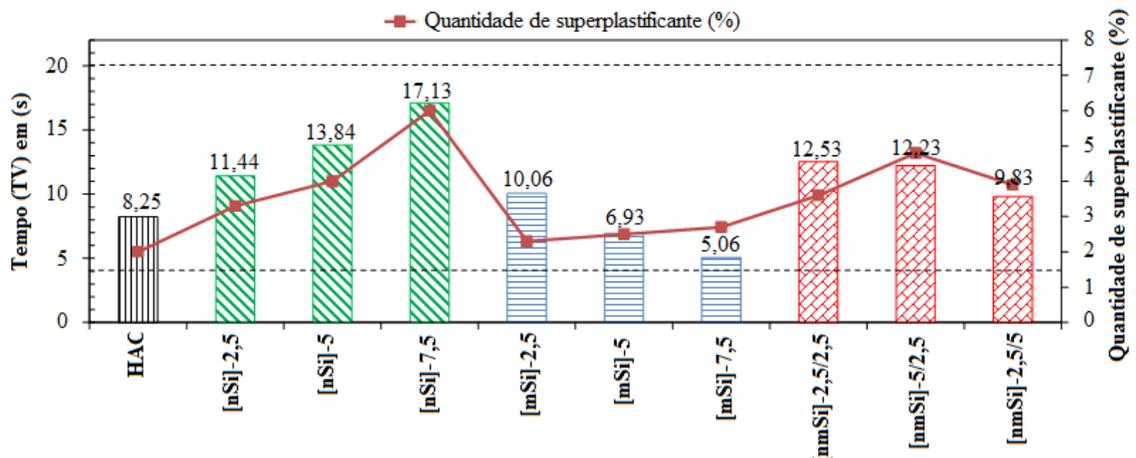


Figura 3. Tempo (TV) em (s) de escoamento no funil e quantidade de superplastificante

A Fig. 3 mostra o tempo de escoamento do concreto auto adensável através do ensaio do funil V. Os concretos atendem aos requisitos da EHA-08 para concreto auto adensáveis pois os tempos medidos estão entre 4s e 20s.

Observa-se que o comportamento das misturas é claramente diferente. Aqueles contendo apenas nSi acarretam aumentos do tempo de escoamento diretamente proporcional ao aumento do teor de nSi. As misturas com mSi, ao contrário, reduzem o tempo de escoamento com o aumento do teor de mSi na mistura.

Em ambos os casos foi necessário aumentar o teor de super plastificante, sendo bem elevado no caso das misturas com nSi. Portanto pode-se afirmar que para uma quantidade fixa de super plastificante, as misturas com nSi irão perder trabalhabilidade e fluidez, pois exigem cada vez teores mais altos de super plastificante.

Misturas binárias apresentam um comportamento coerente com as observações parciais. Aumentar nSi implica aumentar teor de super plastificante ou reduz fluidez. Aumentar mSi aumenta fluidez e reduz demanda de super plastificante. Estes resultados diferem dos obtidos por Jalal et al. (2012), que obteve um tempo, através do funil V, mínimo de 4s para misturas com 500kg / m<sup>3</sup> e 2% nSi e máximo (12 s) para a mistura binária 10% mSi + 2% nSi e 400 kg / m<sup>3</sup>. As diferenças no consumo de cimento poderiam ser responsáveis por estas diferenças notáveis nos resultados já que um aumento na quantidade de cimento melhora as propriedades reológicas devido a um aumento no volume da pasta (Jalal et al., 2012)

Na Fig. 4, apresenta-se a medida da taxa de escoamento na caixa L, C<sub>b1</sub> observando-se todos os valores dentro do intervalo de 0.75 e 1. No entanto, observou novamente um comportamento diferente dependendo do tipo de adição utilizada. Assim, a taxa de escoamento na caixa L, ficou menor no caso de aumento do teor de nSi.

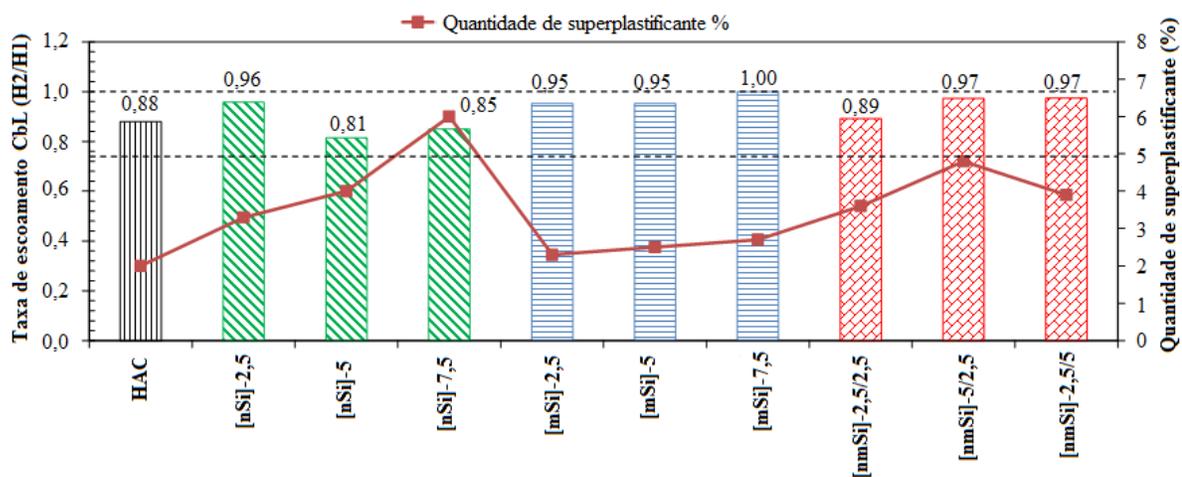


Figura 4. Taxa de escoamento na caixa L e quantidade de superplastificante.

Além disso, este parâmetro fornece informações sobre a capacidade de concreto auto adensável (EHE-08, 2010) se auto nivelar. Observou-se que os menos autonivelantes foram os concretos com altos teores de nSi. No entanto, os valores permanecem substancialmente constantes para ambas as dosagens de mSi, e para as misturas binárias com adições. Cabe destacar a elevada taxa de escoamento obtida com as misturas de 7,5% de mSi, que apresentou resultado igual a 1, máximo possível.

Esse bom desempenho pode explicar-se porque essa mistura é a mistura mais líquido de todas as estudadas. Na Fig. 5, é mostrado o valor de escoamento do anel japonês (d<sub>if</sub>). A EHE-08 limita o valor deste parâmetro, dependendo do diâmetro do escoamento (d<sub>f</sub>) obtido da mesma mistura,

devendo cumprir que a sua diferença seja inferior a 50mm, o que, efetivamente, ocorreu para todas as misturas estudadas.

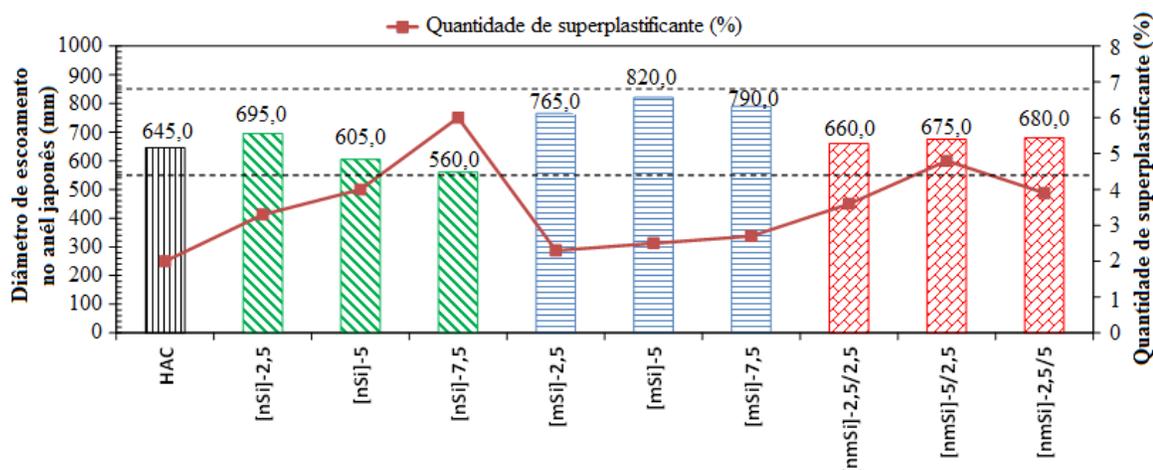


Figura 5. Diâmetro de escoamento no anel japonês (cm) e quantidade de superplastificante.

Ao observar a Fig. 5 nota-se que o concreto com adição de nSi têm um comportamento similar ao do ensaio de escoamento ( $d_f$ ), ainda que com valores inferiores, uma vez que com esse ensaio se avalia a capacidade do concreto auto adensável superar obstáculos. Assim quanto maior o teor de nSi, menos capaz o concreto de superar obstáculos.

Em concretos com adição de mSi, ocorrem os valores mais altos. Nas misturas com adições binárias não se observam grandes variações, mas claramente as propriedades dos concretos são governadas pelo teor de nSi.

Uma observação importante no fabrico das misturas foi que o concreto com adição de nSi teve um aumento notável no tempo de pega. Não importou o teor de aditivos super plastificante pois a pega sempre ocorreu rapidamente, em poucos minutos. Isso fez com que a manipulação desses concretos fosse prejudicada.

No entanto, este fenômeno pode ser uma vantagem na indústria de pré-moldado, em que pega rápida pode ser benéfico, devido à possibilidade de desmoldagem em tempos mais curtos. Isto coincide com o que tem sido estudada por Bjornstrom et al. (2004) que indica que a nSi é um ativador das reações pozolânicas.

## 3.2 Propriedades mecânicas

### 3.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão das diferentes dosagens é apresentada na Fig. 6. Nesta, observa-se que os concretos com NSi têm resistência maior do que aquelas obtidas no concreto de referência. Além disso, esta resistência aumenta com o aumento da quantidade de adição nSi.

Para concretos com mSi, as resistências à compressão são um pouco maiores do que observadas no concreto de referência, com incrementos notáveis aos 7 dias e moderados nas demais idades. Por último, e no caso de misturas binárias, com as duas adições, não foi notado uma diferença de comportamento do concreto fresco que justifique a preponderância de uma adição sobre a outra. No entanto, as resistências mais elevadas são conseguidas com a mistura de [nmSi]-2,5/2,5, de modo que os autores acreditam que a resistência à compressão depende não apenas do tamanho da partícula e a quantidade adicionada, mas também a distribuição de tamanho de partícula de todos os componentes da mistura.

Assim que quanto mais compacta a granulometria da mistura, maior será sua resistência.

Nestas misturas, os valores de resistência à compressão alcançaram 82,17 MPa aos 28 dias de idade e 86,87 MPa em 91 dias. Isto representa um aumento de 36% em comparação com os valores obtidos do concreto de referência nas mesmas idades.

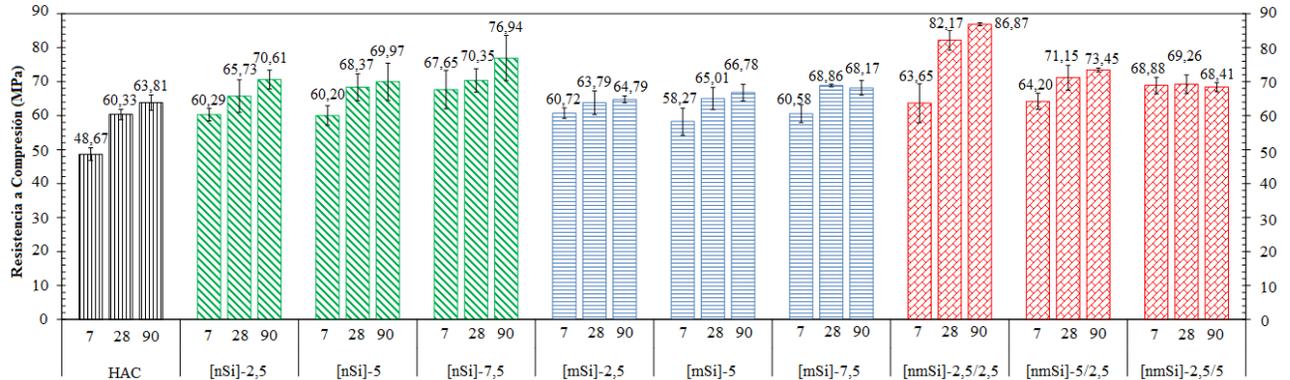


Figura 6. Resistencia a Compresión (MPa)

### 3.2.2. Resistência à tração e módulo de elasticidade

Nas Fig. 7 e 8 são apresentados os resultados de resistência a tração indireta e do módulo de elasticidade. Os valores de resistência à tração indireta dos concretos com adições são significativamente maiores que os do concreto de referência.

No entanto não há diferenças significativas entre as misturas com adições. Ou seja, o tamanho e conteúdo das várias adições contidas nas diferentes misturas não alteraram significativamente a tração indireta.

Por outro lado, para o módulo de elasticidade, observou-se valores significativamente menores, para as misturas que contêm nSi. No restante dos concretos, os valores obtidos são similares entre eles e não diferem muito do módulo do concreto de referência.

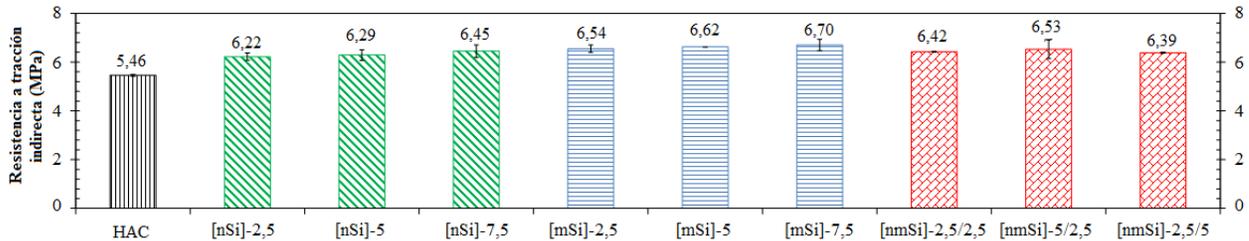


Figura 7. Resistencia a tracción indirecta (MPa)

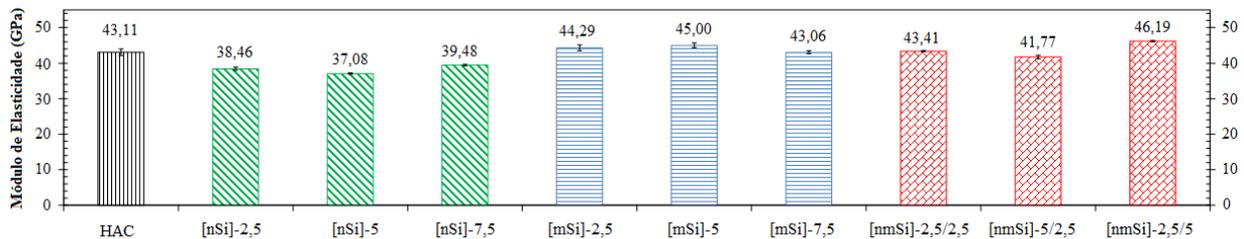


Figura 8. Módulo de Elasticidade (GPa)

### 3.3 Caracterização microestrutural, Análises termogravimétricas

Os resultados da análise termogravimétrica das dez dosagens são mostrados nas Figuras 9, 10 e 11, em que se apresentam a relação entre a perda de água do gel e de água da Portlandita livre aos 7, 28 e 91 dias de idade.

Em geral, os valores obtidos são tais que, para todas as idades, os maiores valores dessa razão são obtidos em concretos com nSi. Isto mostra que a formação de gel secundário ou tobermorita é maior o que justifica a redução da Portlandita.

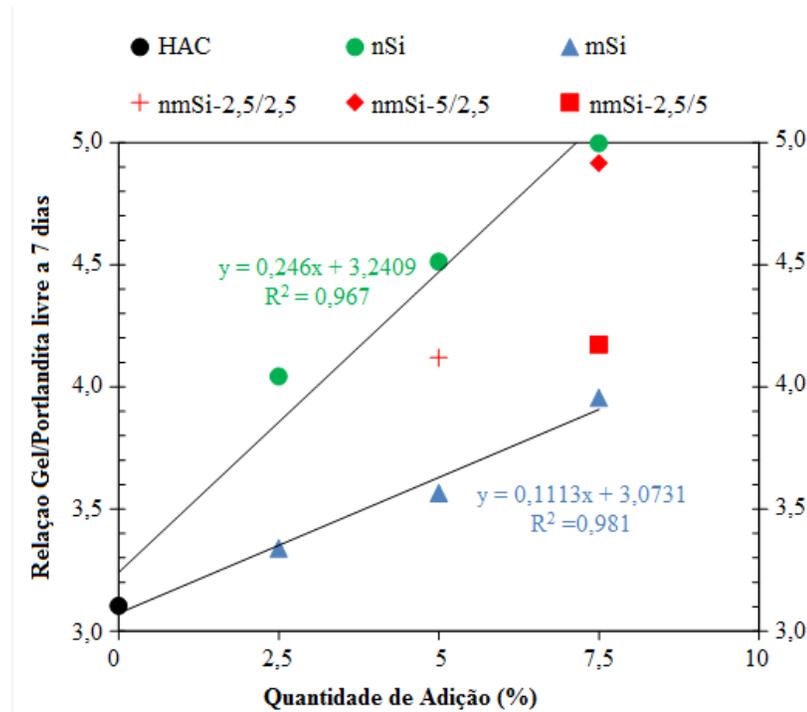


Figura 9. Relação Gel/Portlandita livre a 7 dias

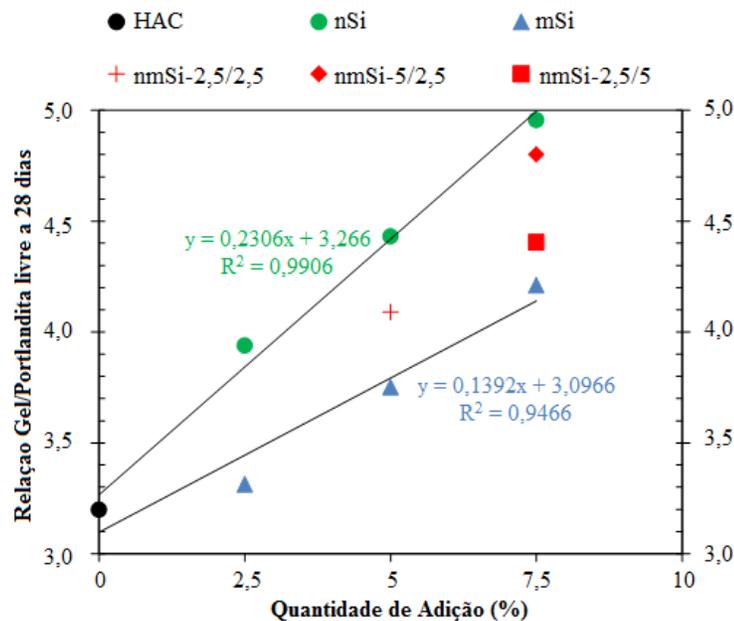


Figura 10. Relação Gel/Portlandita livre a 28 dias

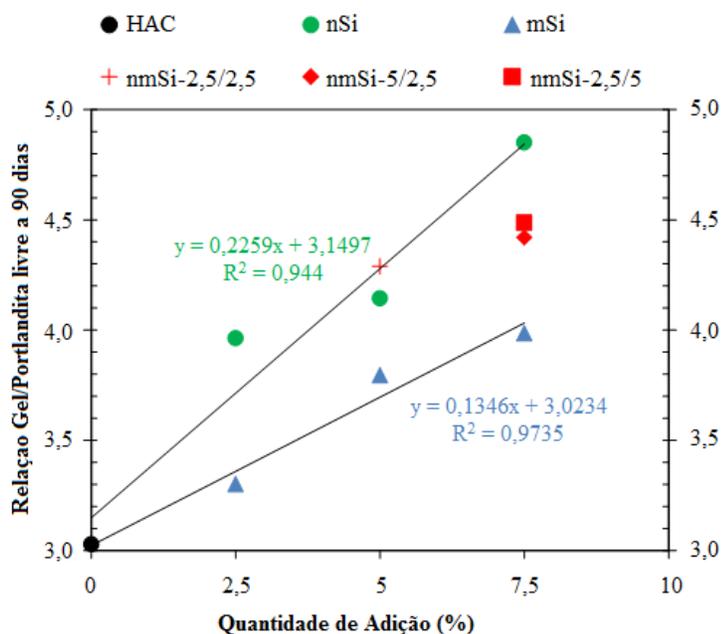


Figura 11. Relação Gel/Portlandita livre a 90 dias

Além disso, no caso dos concretos com a MSI, as relações têm valores inferiores que coincidem com os resultados de Mondal et. al. (2010), Zyganitidis et al. (2011), Jalal et al. (2012) e Leon et al. (2014). Em ambos os casos, a proporção aumenta quando o conteúdo da adição mSi também aumenta. O comportamento das misturas binárias parece definido pelo maior conteúdo de cada uma das adições.

Além disso, é importante notar que com o aumento da idade as misturas com nSi mostram uma diminuição nos valores da relação gel / portlandita livre. Este fenômeno pode ser observado, progressivamente, nas Figuras 9, 10 e 11. Isto sugere que a formação do gel diminui com a idade, ou seja, a atividade pozolânica se manifesta mais intensamente nas primeiras idades (Jalal et al., 2012).

Isto é consistente com os valores de resistência à compressão aos 7 dias. No entanto, nos concretos com mSi, os valores da relação gel / portlandita livre aumentam com o aumento da idade. Um tamanho de partícula menor acelera ativação da reação pozolânica

Sendo evolução diferente no tempo da MSI e da nSi, as misturas contendo ambos vão igualando seu comportamento, resultando em 91 dias um comportamento intermediário ao obtido para o mesmo percentual de cada adição. A mistura com 2,5% de nSi, e mSi, tem um comportamento diferenciado nas maiores idades. Neste caso, a proporção de gel / portlandita livre é superior ao obtido usando 5% de nSi. Este resultado é consistente com o desempenho mecânico e durável da mistura. Este comportamento pode indicar que nesta dosagem a relação entre a superfície da adição e a água livre resultou ser ótima.

#### 4. CONCLUSÕES

A incorporação de nSi gera uma perda de trabalhabilidade e um aumento nas reações iniciais de pega e endurecimento, fenômeno que dificulta o manuseio em campo. A viscosidade e adaptação ao molde ficam prejudicadas com a incorporação de nSi. Os concretos contendo 7,5% mSi ou misturas binárias [nmSi]-5 / 2,5; [nmSi]-2,5 / 5 conduzem a concreto auto adensáveis e autonivelantes.

No entanto, a adição de nSi como adição única, acarretam a perda desta propriedade. As misturas com mSi são as que mostraram melhores comportamentos.

A incorporação de nSi gera um aumento significativo na resistência à compressão em relação ao concreto com mSi e ao de referência. A mistura [nmSi]<sub>2,5</sub> / 2,5 é aquela com valores mais elevados, isto pode ser creditado a uma melhor distribuição granulométrica, considerando todos os componentes que contêm o concreto, de modo que assim é obtido um concreto mais compacto. A incorporação de nSi, mSi ou misturas binárias de ambas as adições produzem concretos com um pequeno e significativo aumento nas resistências à tração indireta.

Concretos com nSi apresentam uma diminuição do seu módulo de elasticidade, o que conduz a misturas mais deformáveis.

Os concretos com nSi apresentam os maiores valores na relação entre perda de água de gel e perda de água de portlandita em idades precoces, o que mostra que a formação de gel secundário ou tobermorite é maior quando utilizadas adições nano. Além disso, no caso dos concretos com mSi, essas relações têm valores mais baixos, ou seja, resultados concordantes com a menor resistência à compressão.

Nas misturas binárias, com a mesma quantidade total de adições e considerando as maiores idades, os valores daquela relação se aproximam aos valores intermediários das duas adições nas mesmas proporções.

O comportamento singularmente bom da mistura [nmSi]<sub>-2,5</sub> / 2,5 sugere que existe uma relação ótima de superfície / água livre que também poderia melhorar o comportamento de qualquer uma das adições em separado.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Ministério da Economia e Competitividade (Espanha), Projeto de Pesquisa MAT2013-48009-C04-04-P.

## 6. REFERÊNCIAS

- Bjornstrom, J., Martinelli, A., Matic, A., Borjesson, L., Panas, I. (2004), “*Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silica-hydrate formation in cement*”, Chem Phys Lett 392 (1-3), 242-248.
- Borralleras, P. (2012), “*Criterios de selección del aditivo superplastificante en HAC*”, 3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante: Avances y oportunidades., 3-4 diciembre. Madrid. España.
- Craeye, B., Van Itterbeeck, P., Desnerck, P., Boel, V., De Schutter, G. (2014), “*Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes*”, Cement and Concrete Composites 54, 53–61.
- De la Peña R. Bernardo (2001), “*Hormigón Autocompactante*”, Revista BIT, pp. 7-12.
- Dubey, R., Kumar, P. (2012), “*Effect of superplastizer dosages on compressive strength of self compacting concrete*”, International Journal of civil, structural, environmental and infrastructure engineering research and development vol. 2, (3), pp 98-105.
- EHE-08. (2010), “*Instrucción de Hormigón Estructural*”, Serie Normativa, Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. 4ª Edición. Madrid. España.
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, A. R. (2012), “*Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles*”, Materials and Design 34, 389–400

- Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., Shah, S. P. (2013), “*Modification of cement-based materials with nanoparticles*”, Cement and Concrete Composites. 36, 8-15.
- León, N., Massana, J., Alonso, F., Moragues, A., Sánchez-Espinosa; E. (2014), “*Effect of nano-Si<sub>2</sub>O and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on cement mortars for use in agriculture and livestock production*”, Biosystems engineering 123, 1-11.
- Mondal, P., Shah, S. P.; Marks, L. D.; Gaitero, J. J. (2010), “*Comparative Study of the Effects of Microsilica and Nanosilica in Concrete*”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nº 2141, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 6–9.
- Nazari, A., Riahi, S. (2010), “*Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> nanoparticles*”, Materials Science and Engineering A 527.7663–7672.
- Okamura, H., Ozawa, K. (1996), “*Self-compactable high-performance concrete in Japan*”, ACI publicación especial SP159-02, pp. 31-44.
- Okamura, H. (1997), “*Self-compacting high-performance concrete*”, Concrete International, 19 (7), pp. 50-54.
- Okamura, H., Ouchi, M. (1999), “*Self-compacting concrete development, present and future*”, Proceedings of the First International RILEM Symposium, pp. 3-14.
- Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M. (2000), “*Self compacting concrete*”, Structural Concrete, 1, pp. 3-17.
- Okamura, H., Maekawa, K., Mishima, T. (2005), “*Performance based design for self-compacting structural high-strength concrete*”, ACI publicación especial SP228-02, pp. 13- 33.
- Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., Jiang, G. (2015), “*Effects of nano-SiO<sub>2</sub> particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites*”, Cement and Concrete Composites 56, 25–31.
- Said, A. M.; Zeidan, M. S.; Bassuoni, M. T., Tian, Y. (2012), “*Properties of concrete incorporating nano-silica*”, Construction and Building Materials 36. 838–844.
- Sánchez, F., Sobolev, K. (2010), “*Nanotechnology in concrete – A Review*”, Construction and Building Materials. 24 2060–2071.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2014), “*Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount*”, Construction and Building Materials 65,140–150.
- Zyganitidis; I.; Stefanidou, M.; Kalfagiannis; N.; Logothetidis S.; (2011), “*Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO<sub>2</sub> nanoparticles*”, Materials Science and Engineering B, 176, 1580-1584.