

Estudio de las proporciones óptimas de microsílice y nanosílice en hormigones de alto desempeño por durabilidad, mediante un diseño de experimento de tipo hexagonal

Juan José Howland Albear

correo electrónico: jhalbear@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo Original

Jorge Bernardo Acevedo Catá

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Resumen

Se diseñó y ejecutó un experimento de tipo hexagonal utilizando diferentes proporciones de microsílice y nanosílice en el hormigón, de manera que la suma de ambas puzolanas no superara el 9,5% del peso del cemento en la dosificación. Se parte de un diseño de mezcla de hormigón, utilizado en una importante obra de infraestructura cubana, con el mismo cemento Portland y los áridos calizos de roca dura. De cada punto del diseño se realizaron tres réplicas de ensayos de resistencias a compresión y por durabilidad mediante ensayos de absorción capilar, así como cuatro réplicas de ensayos en el centro del hexágono. Los resultados obtenidos tanto por resistencias mecánicas como por durabilidad, demuestran la posibilidad de obtener hormigones de alto desempeño con porosidad efectiva inferior al 4% y rendimientos del cemento de hasta 0,142 MPa por cada kilogramo de cemento por metro cúbico de hormigón, o sea 0,142 MPa/(kg/m³).

Palabras claves: hormigón, microsílice, nanosílice, resistencias mecánicas, durabilidad

Recibido: 25 de agosto del 2015 Aprobado: 14 de julio del 2016

INTRODUCCIÓN

Una importante obra en construcción de infraestructura que se ejecuta en la región occidental de Cuba, ha requerido de hormigones con elevados desempeños, tanto por sus resistencias mecánicas como por su durabilidad, empleando en su fabricación los áridos disponibles en la localidad, de origen calizo y dos tipos de puzolanas artificiales: microsílice y nanosílice, con el objetivo de lograr hormigones más densos e impermeables, con elevadas resistencias mecánicas y un sistema de poros capilares aislados y fraccionados en toda la medida posible, para reducir al máximo el efecto de los *mecanismos de transporte* de los agentes agresivos hacia el interior de la estructura y en especial hacia el acero de refuerzo.

Los directivos de esta obra le solicitaron al Grupo de Investigaciones de Materiales y Tecnologías de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, una investigación sobre el impacto que pudiera tener especialmente la adición de nanosílice en suspensión con un aditivo superplastificante basado en de policarboxilatos, en los diseños de las mezclas con los materiales locales y las proporciones más racionales en que se pudiera utilizar esta adición tan especial.

La literatura técnica internacional más reciente aborda ya el tema del empleo combinado de la microsílice y la nanosílice. En la matriz cementicia de morteros y hormigones de altas resistencias con muy buenos resultados [1-4]

tanto por su incremento de las resistencias mecánicas como en el durabilidad, logrando hormigones más densos y compactos como inhibiendo la reacción deletérea árido-álcali. El doctor Andre Geyer de la Universidad Federal de Goias, Brasil, en exposiciones efectuadas en visitas recientes, manifestó la importancia del empleo conjunto de estas adiciones en las obras importantes de Brasil y en las obras de ampliación del Canal de Panamá [5]. En sus últimas conferencias efectuadas en Cuba, el doctor Geyer apreció la importancia de la nueva nanosílice en suspensión con el empleo de aditivos basados en acrilatos o policarboxilatos, lo cual evita el efecto muy nocivo para la salud de este producto en forma de polvo y su importante efecto en el cubrimiento de la porosidad característica de la zona de transición o interface árido-pasta, tal como se muestra en la figura 1.

La combinación racional de la microsilíce, con un efecto expansivo al reaccionar con la portlandita a nivel micro (10^{-6} m), con nanosílice en suspensión para lograr el mismo efecto expansivo pero rellenando vacíos a nivel nano (10^{-9} m), requería de un diseño experimental que permitiera evaluar los resultados de las combinaciones de ambas puzolanas en diferentes proporciones, pero sin sobrepasar un 10 % de porcentaje total de sílice muy reactiva, para evitar un posible efecto involutivo de las resistencias mecánicas del hormigón por la fuerte avidez de cal de estas puzolanas. Recientemente otros autores han magnificado el papel de la nanosílice y su especial impacto en la microestructura del hormigón como el ingeniero Alcaraz de Chile [6] y más especialmente el doctor León Brito de España [7], quien en su Tesis Doctoral ratificó la influencia positiva de la adición conjunta de microsilíce con nanosílice, en el comportamiento mecánico, microestructural y durable del hormigón.

Se trabajó el experimento a partir de un diseño básico de mezcla de hormigón con la utilización de materiales locales, todo con el objetivo de poder estudiar sus desempeños por resistencias mecánicas y también por durabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se decidió asumir para la investigación del desempeño de los hormigones con el empleo de nano y microsilíce, un diseño de experimento de tipo hexagonal como el que se muestra en la figura 2.

Los materiales utilizados para el diseño de los hormigones fueron los siguientes:

Cemento Portland Tipo 1 (con hasta un 10 % de adición) de la Fábrica René Arcay del Mariel. En la tabla 1 se muestran sus principales características y el cumplimiento de los requerimientos de la Norma Cubana NC95:2011[8].

Gravilla de la cantera de La Molina (Mariel) con fracción 20 – 10 mm con tamaño máximo de 19,1 mm.

Peso específico corriente de 2,62; Peso específico saturado sin humedad superficial de 2,66 kg/dm³.

Peso específico aparente de 2,72 kg/dm³ y un porcentaje de absorción de 1,38 %.

Los pesos unitarios son: Peso unitario suelto: 1 358 kg/m³; Peso unitario compactado: 1 520 kg/m³.

Porcentaje de absorción: 1,38 %; Porcentaje de vacíos: 42 %.

Porcentaje de material más fino que el tamiz No. 200 (0,074 mm de abertura): 1,20 %.

Módulo de finura: 6,90

Esta gravilla cumple con los requerimientos de granulometría establecidos en la Norma Cubana NC 251:2013[9], pero no con el porcentaje pasado por el tamiz No. 200.

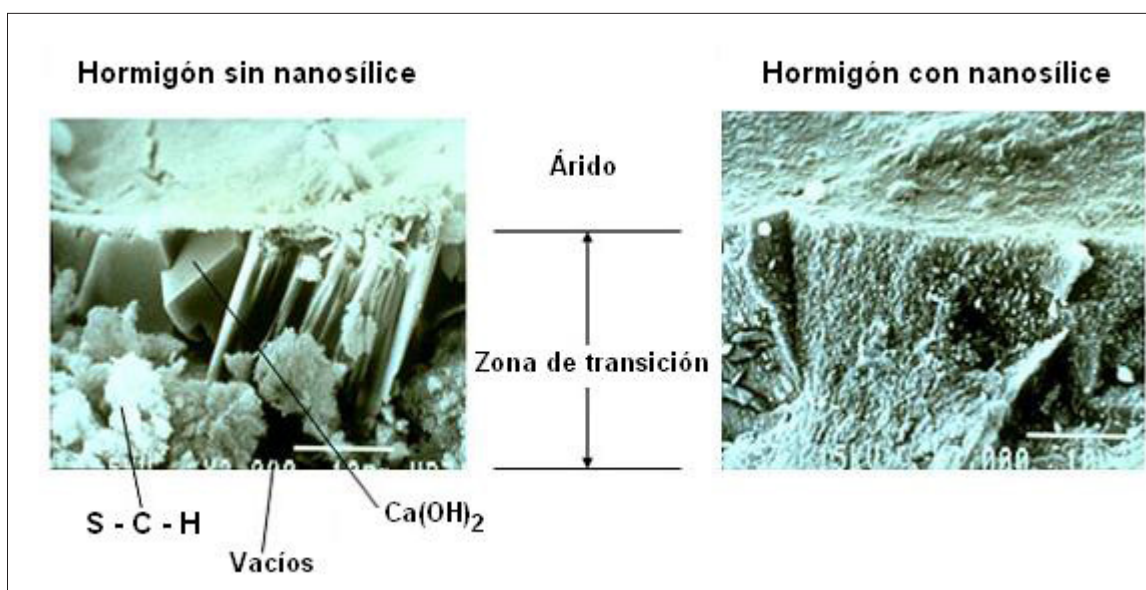


Fig. 1. Vistas en microscopía electrónica de la zona de transición árido-pasta de cemento con y sin nanosilíce (según los estudios de Geyer).

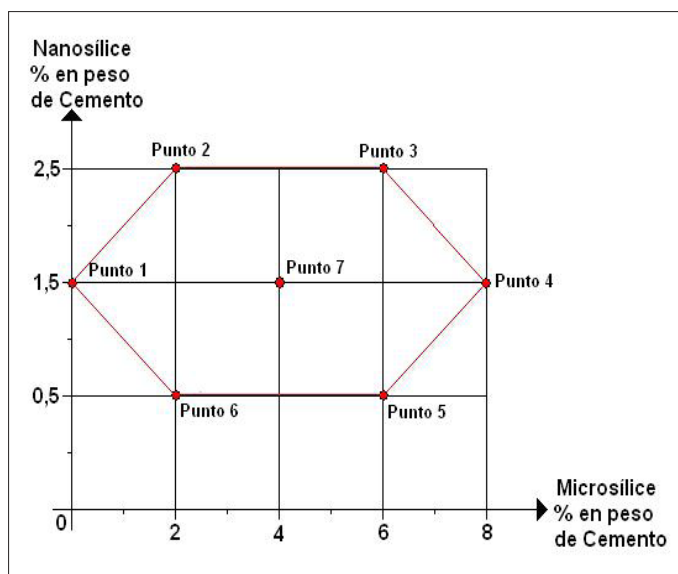


Fig. 2. Representación esquemática del experimento hexagonal indicando las proporciones de micro y nanosilíce en cada uno de los siete puntos evaluados.

Arena de la cantera de La Molina (Mariel) con fracción 5 - 0 mm.

Peso específico corriente de 2,63; Peso específico saturado sin humedad superficial de 2,66 kg/dm³.

Peso específico aparente de 2,71 kg/dm³ y un porcentaje de absorción de 1,07 %.

Los pesos unitarios son: Peso unitario suelto: 1 358 kg/m³; Peso unitario compactado: 1 520 kg/m³.

Porcentaje de absorción: 1,07 %; Porcentaje de vacíos: 40 %.

Porcentaje de material más fino que el tamiz No. 200 (0,074 mm).

Módulo de finura: 3,97

Esta arena *no cumple* con los requerimientos de granulometría establecidos en la Norma Cubana NC 251:2013, ni con el módulo de finura. Es una arena más gruesa que lo deseado.

Se efectuaron estudios empíricos de combinación de la gravilla y la arena de la cantera de La Molina, buscando obtener una adecuada proporción minimizando en lo posible el porcentaje de vacíos y la superficie específica, para lo cual se obtuvo una relación óptima de un 56 % de gravilla y un 44 % de arena.

Las adiciones empleadas fueron:

- Aditivo SILICON ns ad 500 de la firma brasileña TECNOSIL, que incluye la nanosilíce en suspensión con aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos. Esta nanosilíce se aplicó en dosis que variaron de 0,5 a 2,5% del peso del cemento, tal como se indicó en el experimento hexagonal de la figura 1.
- Microsilíce procedente de la firma SIKABrasil, en dosis de 0 al 8 % del peso del cemento en la dosificación, tal como se indicó en el diseño del experimento hexagonal de la figura 1.

Los diseños de las mezclas se efectuaron con los áridos secos hasta peso constante, para lograr un volumen total de 1 m³ y se ajustaron finalmente a escala de laboratorio para un volumen de 40 L, con el ajuste en pesos de los áridos y el agua en el diseño, atendiendo a la humedad total de los áridos en el momento de la realización de las mezclas.

De cada serie de probetas para los ensayos de resistencia a compresión a 28 días se extrajeron probetas adicionales para efectuar los ensayos de absorción capilar según los requerimientos de la Norma Cubana NC 345:2011[10]. A tal efecto se cortaron con sierra las probetas normalizadas de 150 x 300 mm (curadas como mínimo 28 días) en láminas delgadas de 25 mm ± 0,5 mm de espesor tomadas preferiblemente de la parte central de la probeta y garantizando el paralelismo de las caras. Estas lascas se preacondicionaron a equilibrio de humedad constante con secado a 60 °C durante 48 h (hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador. Las áreas laterales de las probetas se recubrieron con parafina. Las probetas se colocaron sobre cintillos de madera dentro de una bandeja metálica estanca con una altura de agua por encima de los cintillos de aproximadamente 5 mm, tal como se muestra en la foto de la figura 3. Para mantener constante el nivel del agua en todo el tiempo de las mediciones se llenó una probeta graduada de vidrio y se colocó con un soporte en posición invertida introducida dentro del agua del recipiente a 5 mm.

Las probetas se pesan antes de ser colocadas en el agua y se vuelven a pesar a las edades indicadas en la norma hasta las 96 h y cada 24 h a partir de las 96 h hasta lograr la saturación total de la probeta. Esto es indispensable para poder determinar el valor $\sqrt{t_n}$ que

Tabla 1
Datos principales del cemento Portland de la Fábrica René Arcay del Mariel

Referencia	SO ₃	MgO	Pérdida por ignición	Residuo insoluble	Superficie específica (Blaine)	Frag. inic.	Frag. final	Resistencia a compresión		
								3 días	7 días	28 días
Norma Cubana NC 95:2011	3,5 máx.	5,0 máx.	4,0 máx.	4,0 máx.	2 800 mínimo	45 mín.	10 máx.	17,0 mín.	25,0 mín.	35,0 mín.
Datos del cemento del Mariel	3,24	-	3,35	2,10	3566	72,5	2,18	32,7	37,8	45,3

indica el punto más o menos exacto en que se produce la inflexión de la curva de incremento de peso de la probeta por la humedad para alcanzar la saturación. El ensayo en condición óptima debe efectuarse a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de $65\% \pm 5\%$.



Fig. 3. Montaje del ensayo a absorción capilar de probetas de hormigón extraídas por perforación de probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, en el laboratorio y con su área lateral recubierta de parafina.

RESULTADOS

Los resultados promedio de tres ensayos de tres probetas cada uno, del desempeño de las mezclas de hormigón por sus resistencias a compresión a 28 días se muestran en la figura 4.

Los ensayos de absorción capilar se repitieron tres veces para cada punto del diseño de experimento. Un ejemplo de las curvas obtenidas de los ensayos se muestra en la figura 5.

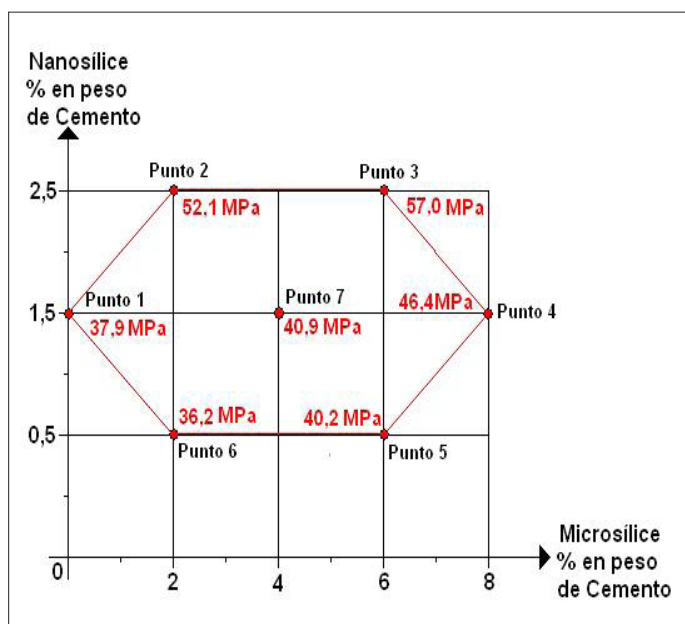


Fig. 4. Resultados promedio de las resistencias a compresión a 28 días de cada punto del diseño de experimento hexagonal.

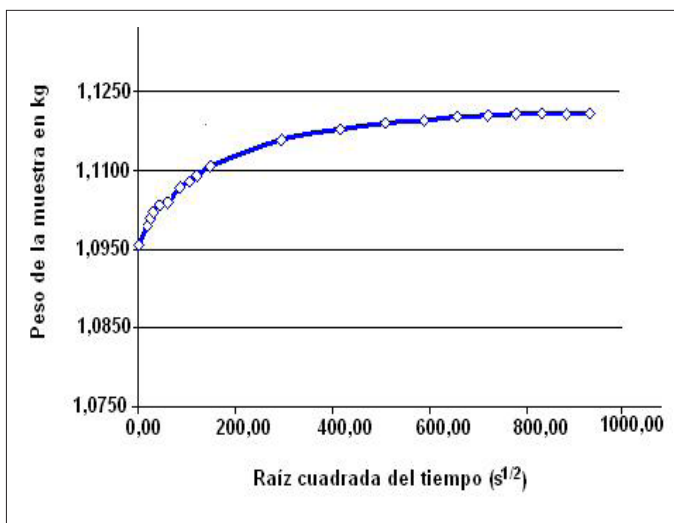


Fig. 5. Gráfico obtenido de incremento del peso de la probeta por la absorción capilar con la raíz cuadrada del tiempo del ensayo.

Los parámetros determinados en cada ensayo de absorción capilar fueron los siguientes:

m : Resistencia a la penetración del agua (s/m^2).

$$m = \frac{t_n}{h^2}$$

t_n : Tiempo en el punto crítico (h).

h : Altura o espesor total del espécimen (m).

k : Coeficiente de absorción capilar ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$).

$$k = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} \cdot \frac{1}{A^{(\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2})}}$$

donde:

Q_n : Peso del espécimen en el punto crítico (kg).

Q_0 : Peso del espécimen al inicio (kg).

A : Área de succión del espécimen (m^2).

ξ : Porosidad efectiva del hormigón (%).

$$\xi = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot 1000} \cdot 100(\%)$$

Los valores individuales y promedios de la resistencia a la penetración del agua (m), del coeficiente de absorción capilar (k) y de la porosidad efectiva (ξ) obtenidos en cada punto del diseño de experimento hexagonal se muestran en la tabla 2.

En la figura 6 se muestran ya en el hexágono del diseño experimental, los valores promedio de porosidad efectiva junto a los valores promedio de resistencias mecánicas obtenidos en los diseños de las mezclas de hormigón para los 7 puntos evaluados.

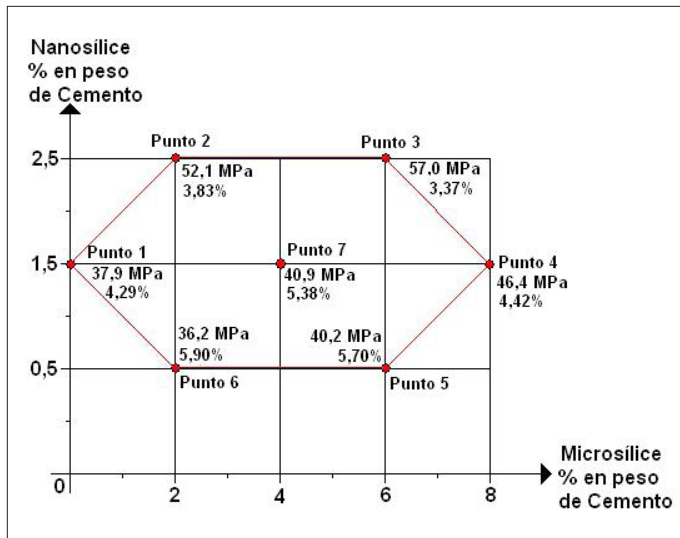


Fig. 6. Resultados finales promedio de resistencias a compresión y porosidad efectiva de los hormigones para los siete puntos del diseño de experimento hexagonal.

CONCLUSIONES

En el gráfico resumen de la figura 6 se puede apreciar que los hormigones con mejores desempeños tanto por resistencias mecánicas como por durabilidad se obtienen para los puntos 2 y 3 del diseño, o sea, para valores de microsilíce y nanosilíce de 6 y 2,5 % y para valores de 2 y 2,5 % respectivamente. Sin embargo, debe tenerse presente que al estar dispersa la nanosilíce en un aditivo superplastificante de última generación como son los policarboxilatos, el incremento al mismo tiempo del porcentaje de aditivo tiene un rol importante para los valores más elevados de nanosilíce. Hay que indicar que los hormigones de los puntos 2 y 3, estuvieron muy cerca de la segregación por la carencia de finos aportados por los áridos.

Es muy significativo el hecho de haber obtenido por primera vez en el país, hormigones con valores de porosidad efectiva inferiores al 4 %, con áridos calizos cubanos cuya absorción es elevada. Estos valores de porosidad efectiva son característicos de hormigones de muy alto desempeño por durabilidad. Lo cual ratifica la relevancia del empleo de estas adiciones.

Tabla 2

Valores individuales y promedios de m , k y ξ para cada punto del diseño de experimento hexagonal. Los valores subrayados se han eliminado por ser muy dispersos

Punto del experimento	m (s/m ²)				k (kg/m ² s ^{1/2})				ξ (%)			
	1	2	3	Prom.	1	2	3	Prom.	1	2	3	Prom.
1	1,11 · 10 ⁶	1,26 · 10 ⁶	1,02 · 10 ⁶	1,13 · 10⁶	0,037	0,040	0,044	0,040	3,93	4,52	4,44	4,29
2	1,11 · 10 ⁶	0,99 · 10 ⁶	1,21 · 10 ⁶	1,10 · 10⁶	0,027	0,043	0,040	0,037	2,83	4,24	4,44	3,83
3	1,17 · 10 ⁶	1,20 · 10 ⁶	1,18 · 10 ⁶	1,18 · 10⁶	0,038	0,023	0,032	0,031	4,11	2,51	3,49	3,37
4	1,23 · 10 ⁶	1,22 · 10 ⁶	1,22 · 10 ⁶	1,22 · 10⁶	0,047	0,050	0,023	0,040	5,20	5,54	2,50	4,42
5	1,15 · 10 ⁶	1,93 · 10 ⁶	1,33 · 10 ⁶	1,47 · 10⁶	0,058	0,036	0,056	0,050	5,77	<u>1,58</u>	5,63	5,70
6	1,12 · 10 ⁶	1,35 · 10 ⁶	1,23 · 10 ⁶	1,23 · 10⁶	0,057	0,052	0,051	0,053	6,07	5,99	5,64	5,90
7	1,17 · 10 ⁶	0,98 · 10 ⁶	1,13 · 10 ⁶	1,09 · 10⁶	0,049	0,050	0,053	0,050	5,31	4,98	5,57	5,29
8 (Réplica del punto 7)	1,15 · 10 ⁶	1,22 · 10 ⁶	1,15 · 10 ⁶	1,17 · 10⁶	0,071	0,053	0,059	0,061	7,62	5,81	6,40	6,61
9 (Réplica del punto 7)	1,17 · 10 ⁶	1,02 · 10 ⁶	1,15 · 10 ⁶	1,11 · 10⁶	0,051	0,079	0,059	0,063	5,61	7,98	5,71	6,43
10 (Réplica del punto 7)	0,39 · 10 ⁶	0,36 · 10 ⁶	<u>0,12 · 10⁶</u>	0,37 · 10⁶	0,060	0,058	0,060	0,059	3,77	3,51	2,07	3,11
Promedio del punto 7	-	-	-	0,88 · 10⁶	-	-	-	0,058	-	-	-	5,38

AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer al personal del Laboratorio del CECAT de la Facultad de Ingeniería Civil: al ingeniero Yoel Barbería, a los técnicos Geovanny Alemán y Dayron Muñoz por su asistencia constante y su trabajo riguroso en la realización de los ensayos.

Asimismo, a la firma brasileña Tecnosil Materiales de Construcción LTDA por el aporte del aditivo *Siliconns ad 500* y a la firma SIKA Brasil por el aporte de la microsilíce.

Agradecemos también al ingeniero Yoani Rivero Mora y al personal del Laboratorio del CYTEC del MINFAR, por la asistencia recibida en el corte de las probetas cilíndricas para la realización de los ensayos de porosidad efectiva.

REFERENCIAS

1. Using nanosilica to strengthen concrete. Materials Innovations, 011-012 Stevens Innovation, innd 12. 2011. www.stevens.edu/ses/me.
2. **TOROPOVS, Nikolajs** *et. al.* "The Formation of Microstructure in High Strength Concrete Containing Micro and Nanosilica". *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 604, pp. 83-86, Online available since 2014/Mar/12 at www.scientific.net. (2014) Trans Tech Publications Switzerland. Doi: 10.4028 www.scientific.net/KEM.604.83.
3. **SENFF, L.** *et. al.* "Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars". *Advances in applied ceramics*. 2010, vol. 109, núm. 2, Institute of Materials, Minerals and Mining. DOI 10.1179/174367509X12502621261659.
4. **FROLOV, A. V.** *et al.* "The economy of use and the impact of nanoparticles on properties of lightweight high-strength concrete". *Construction of Unique Building and Structures*. Saint-Petersburg State Polytechnic University, Russia. 2014, vol. 4, núm. 19, pp.51-61. ISSN: 2304-6295.
5. **GEYER, Andre.** Investigaciones y experiencias prácticas con el uso de microsilíce y nanosilíce en importantes proyectos en Brazil, Centroamérica. Presentación en Power Point, CECAT, Cujae, 2013.
6. **ALCARAZ MARÍN, Jesús.** "Microestructura del hormigón con adición de nanosilíce". Universidad Tecnológica de Chile. Tesis de Maestría. Escuela de Arquitectura e Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cartagena, mayo 2015.
7. **LEÓN BRITO, Nelson.** "Influencia de la adición de microsilíce y nanosilíce en el comportamiento mecánico, microestructural y durable de un hormigón autocompactante". Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral. Madrid, España, noviembre 2015.
8. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. *Norma Cubana NC95:2011 Cemento Portland–Especificaciones*. ICS: 91.100.10 2, diciembre 2011.
9. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. *Norma Cubana NC251:2013 Áridos para hormigones hidráulicos–Requisitos*. ICS: 91.100.15 1, noviembre 2013.
10. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. *Norma Cubana NC345:2011 Hormigón endurecido–Determinación de la absorción de agua por capilaridad*. ICS: 91.100.30 2, diciembre 2011.

AUTORES

Juan José Howland Albear

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Investigador Titular, Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Jorge Bernardo Acevedo Catá

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Profesor de Mérito, Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Study about the Optimal Proportions of Microsilica and Nanosilica in Concretes with High Durability Performance Using an Experimental Design of Hexagonal Type

Abstract

An experimental design of hexagonal type was designed and realized using different proportions of micro and nanosilica in the concrete, under the condition that the sum of the two pozzolans was not over the 9.5% of the cement weight in the concrete mix. From the concrete mix design used in a very important construction of infrastructure in Cuba, with the same Portland cement and hard limestone aggregates, in each point of the experimental design was realized three repetitions of compression strengths and durability trials of the concretes and four repetitions of trials in the point of the hexagonal center. The results obtained show the possibility to obtain high performance concretes by mechanical resistance and durability, which have demonstrated to obtain an effective porosity below the 4 % and cement yields up to 0,142 MPa for each kg of cement in each cubic meter of concrete, that is to say 0,142 MPa/(kg/m³).

Key words: concrete, microsilica, nanosilica, mechanical strengths, durability