



Estudio de la incorporación de nanosílice en concreto de alto desempeño (HPC)

Study of the Incorporation of nano-SiO₂ in high-performance concrete (HPC)

Mohammad Farid Alvansaz | Universidad Central del Ecuador, Ecuador

Claudio Bombon | Universidad Central del Ecuador, Ecuador

Bagner Rosero | Universidad Central del Ecuador, Ecuador

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recepción: 21/02/2022
Aceptación: 18/04/2022

PALABRAS CLAVE

Hormigón de alto desempeño, nanosílice, microsíllice, ensayo de compresión, ensayo a flexión, propiedades físico-mecánicas del hormigón.

KEY WORDS

High performance concrete, nanosilica, microsilica, compression test, tensile test, physical mechanic properties of concrete.

RESUMEN

El proyecto de investigación está orientado al estudio de la influencia de la adición de partículas de nanosílice en las propiedades físicas y mecánicas de un hormigón de alto desempeño: en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo elástico, módulo de Poisson y módulo de rotura, en el cual se incluyó las partículas de nanosílice de 0,75%, 1,50% y 3% como reemplazo en peso de la cantidad de cemento de un hormigón patrón y también se reemplazó el 5% y el 10% de microsíllice. El hormigón de alto desempeño se diseñó para cumplir con las características de tener un f_c mayor a 55 MPa y contar con una alta trabajabilidad. Para cumplir con la trabajabilidad deseada en todas las dosificaciones se usó un aditivo superplastificante. Además, se realizaron ensayos de microscopía para conocer la influencia de las adiciones de sílice en la microestructura y en la hidratación de los hormigones. De los resultados obtenidos se concluyó que el porcentaje óptimo de nanosílice es de 1,5%, a los 28 días de edad; los resultados de los ensayos realizados determinaron que el porcentaje óptimo de nanosílice con respecto al hormigón patrón y a los hormigones con microsíllice produce una mejora de resistencia a la compresión del 8,44% y del 7,52%, resistencia a la tracción del 4,31% y del 26,30%, módulo de rotura del 16,21% y del 9,63%, y módulo de elasticidad del 16,53% y del 4,51%, respectivamente. El reemplazo de nanosílice mostró ser viable y beneficioso para las propiedades físico-mecánicas de un hormigón de alto desempeño.

ABSTRACT

The research project aims to study the influence of the addition of nanosilica particles on the physical and mechanical properties of high-performance concrete: compression resistance, tensile strength, elastic module, Poisson module and break module. In which nanosilica particles of 0,75%, 1,50% and 3% were added as a weight replacement for the amount of a concrete pattern and also replacements of 5% and 10% of microsilica. The high performance concrete was designed to fulfill the characteristics of having a f_c greater than 55 MPa and having high workability, to meet the desired workability, a superplasticizing additive was used. Microscopy test were conducted to determine the influence of silica additions in the microstructure and in the hydration of the concrete. From the results obtained, it was concluded that the optimal percentage of nanosilica is 1,5%. At 28 days of age, the results of the tests carried out determined that the optimal percentage of nanosilica with respect to the pattern concrete and the microsilica concretes produces an improvement of: resistance to compression of 8,44% and of 7,53%, tensile strength of 4,31% and of 26,30%, break module of 16,21% and of 9,63%, and elasticity module of 16,53% and of 4,51% respectively. Nanosilica replacement showed to be viable and beneficial for the physical-mechanical properties of high performance concrete..

I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más empleados en las obras de ingeniería civil, el cual se elabora con la combinación de varios componentes, como son: cemento, agua, agregado grueso y agregado fino, adicionalmente se les puede incorporar en la mezcla un componente que se denomina adición;

por ello se cree que con la incorporación de nanomateriales en la mezcla matriz del hormigón, éste incrementa las propiedades físico-mecánicas, debido a las propiedades de finura y cementantes, que permite la elaboración de concretos más densos, con mayor durabilidad y resistentes.

Un hormigón de alto desempeño debe cumplir con las características de alcanzar grandes resistencias y a la vez poseer trabajabilidad, propiedades que serán estudiadas a través de la recolección de datos y resultados de distintos tipos de ensayos mecánicos como son: compresión simple, tracción indirecta, flexión, módulo elástico, módulo de Poisson, de probetas cilíndricas y vigas que serán elaborados y ensayados de acuerdo a las normativas vigentes como es la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN), la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y del Instituto Americano del Concreto (ACI). Los cuales precisan los requisitos y valores permitidos para validar los resultados obtenidos en los ensayos del estudio.

Adicionalmente, se efectuarán ensayos de microscopía de electrones (SEM) y difracción de rayos x (XRD), para establecer la morfología y la microestructura de las nanopartículas presentes en el hormigón fabricado con y sin adiciones de nanosílice y microsíllice.

FUNDAMENTACIÓN

Para el diseño del hormigón de alto desempeño se fundamentó principalmente en las normativas y manual siguientes:

- ACI 318-19: requisitos del Código para el hormigón estructural.
- ACI 363-10: reporte sobre hormigón de alta resistencia.
- ACI 211.4R-08: Guide for selecting proportions for high-strength concrete using Portland cement and other cementitious materials.
- Terence C. Holland: *Silica fume user's manual*.

DEFINICIONES

Hormigón de alto desempeño: hormigón que cumple con las combinaciones especiales y requisitos como el rendimiento y uniformidad, los cuales no siempre se pueden lograr de manera rutinaria usando componentes convencionales y prácticas normales de mezclado, colocación y curado [1].

Nanopartículas: partículas muy finas, las cuales poseen diámetros entre 1 y 100 nm.

Sílice: Dióxido de silicio (SiO₂).

Humo de sílice: sílice no cristalina muy fina producida en hornos de arco eléctrico como subproducto de la producción del silicio elemental o aleaciones que contienen silicio.

Resistencia temprana: resistencia del concreto o mortero que generalmente se desarrolla durante las primeras 72 horas después de la colocación [1].

FORMULACIÓN

- Determinar experimentalmente las propiedades físico-mecánicas del hormigón de alto desempeño con la incorporación de las partículas de nanosílice y microsíllice.
- Diseñar una mezcla de un hormigón patrón con una resistencia mayor a 55 Mpa.
- Diseñar mezclas de hormigón de alto desempeño con la adición de diferentes porcentajes: 0,75%, 1,5% y 3% de partículas de nanosílice.
- Diseñar mezclas de hormigón de alto desempeño con la adición de diferentes porcentajes: 5% y 10% de partículas de microsíllice.
- Obtener los valores de la resistencia a la compresión ($f'c$), resistencia a la tracción (σ_t), resistencia a la flexión, módulo de elasticidad (E_c), coeficiente de Poisson (μ) de las diferentes dosificaciones planteadas.
- Realizar un análisis comparativo entre las propiedades físico-mecánicas de un hormigón estándar, un hormigón con adiciones de microsíllice y un hormigón con adiciones de nanosílice.

Si fabricamos un hormigón de alto desempeño con adición de partículas de nanosílice y microsíllice, sus propiedades físico-mecánicas se ven influenciadas positivamente.

II. MATERIALES, FUENTES Y MÉTODOS

MATERIALES

El hormigón de alto desempeño tiene varios componentes como son: cemento Portland tipo I, arena lavada, grava triturada lavada, agua, adiciones de nanosílice y microsíllice, y aditivo superplastificante.

Agregado grueso

Consiste en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantes mayores a 5 mm, las que generalmente tienen diámetros entre 9,5 mm (3/8 pulgadas) y 37,5 mm (1 1/2 pulgadas) [2].

Agregado fino

Partículas provenientes de la trituración de las rocas cuyo tamaño o diámetro es inferior a 5 mm, o aquellas partículas que pasan por el tamiz N.º 4 (4,75 mm), y que es retenido en su totalidad en el tamiz N.º 200 [3].

Cemento

El cemento es un material conglomerante; al entrar en contacto con el agua se produce una reacción química

por la cual adquiere propiedades de adherencia y cohesión, luego se convierte en un aglutinante que unifica a los agregados gruesos y finos.

Agua

El agua cumple la función de hidratar el cemento y brindar la trabajabilidad de la mezcla del hormigón de alto desempeño. Para la elaboración de los hormigones se debe utilizar agua natural, que sea potable y que no presente sabor u olor [4].

Microsílice

Las partículas de microsíllice tienen una presentación en polvo, que es extremadamente fino, las cuales están compuestas del 90% al 95% por dióxido de sílice amorfo. Este material es producido por la fabricación de silicio y ferrosilicio [5].

Nanosílice

Este producto nace como una alternativa al uso del microsíllice, se produce por la reacción del silicio, tetracloruro, hidrógeno y oxígeno en hornos de altas temperaturas; en donde se fabrican con diferentes áreas de superficie específicas que van desde 50 m²/g a 400 m²/g [6].

Aditivo superplastificante

Los aditivos superplastificantes tienen el efecto de aumentar la fluidez del hormigón, mejorando la trabajabilidad y, con la baja relación agua/cemento que presenta el hormigón de alto desempeño, trata de producir un hormigón fluido con un alto valor de asentamiento, sin afectar las resistencias de diseño [7].

FUENTES

Las características y propiedades del hormigón dependen de la calidad de sus agregados. Para el desarrollo del estudio se utilizaron agregados provenientes del cantón Santo Domingo, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

MÉTODOS

Muestra

Los agregados gruesos y finos se obtuvieron de la cantera Copeto Cía. Ltda. ubicada en el margen derecho del río Toachi, en la urbanización Brasília del Toachi, se utilizó cemento Holcim tipo GU, microsíllice Rheomac SF 100, aditivo superplastificante Master Glenium 7955, que se adquirieron en la empresa Imperquik Cía. Ltda. y el na-

nosíllice Aerosil® 200 que se adquirió a la empresa Evonik, a través de la comercializadora química Comerquim Cía. Ltda.

Técnicas

Se realizó la caracterización de los agregados a través de ensayos de laboratorio, de acuerdo a las especificaciones de las normas INEN y ASTM, para asegurar la calidad de los materiales a emplearse en la elaboración del hormigón de alto desempeño.

RECOPIACIÓN DE DATOS

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Para la caracterización de los agregados se ejecutaron varios ensayos de laboratorio en los cuales se determinaron las propiedades de densidades aparentes, sueltas y compactas, peso específico, granulometría y capacidad de absorción. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 1 (ver Tablas 1 y 2).

DISEÑO DEL HORMIGÓN DE ALTO DESEMPEÑO

El diseño del HPC se basa principalmente en la metodología presentada en el *Manual de usuarios de microsíllice* [8].

PROCESO PARA EL DISEÑO DE HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

1. Propiedades de los materiales

Para comenzar la dosificación se debe primero conocer las propiedades de los materiales como se indica en las tablas 1 y 2.

2. Ubicar una dosificación base

Este método de diseño se basa en encontrar la dosificación de un hormigón que obtuvo propiedades similares a las que se pretende diseñar en el estudio; y ésta se utiliza como dosificación base, según consta en la tabla 3 (ver Tabla 3).

3. Modificación de dosificación

Conociendo las propiedades de los materiales utilizados en la dosificación base se la modifica usando los datos de las densidades de los materiales en estudio a fin de obtener la dosificación de control para 1 m³ de hormigón.

De acuerdo con las especificaciones de la obra se determina qué características deberá cumplir el hormigón

Tabla 1.
Datos de las propiedades de los agregados

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
Capacidad de absorción	%	1,99	2,75
Densidad aparente suelta	g/cm ³	1,67	1,31
Densidad aparente compactada	g/cm ³	1,76	1,45
Peso específico	g/cm ³	2,43	2,60
Módulo de finura	-	3,03	2,65
Tamaño nominal máximo	pulgada	-	3/8

Tabla 2.
Densidades reales de los materiales

<i>Material</i>	<i>Densidad real (g/cm³)</i>
Cemento	2,87
Microsílice	2,20
Nanosílice	2,00
Superplastificante	0,91

Tabla 3.
Cantidades por metro cúbico del hormigón base

<i>Material</i>	<i>Peso (kg)</i>
Cemento	550
Agua	165
Grava	1067
Arena	705
Superplastificante	3,85

Fuente: [6].

de alto desempeño utilizando las ecuaciones presentadas en el trabajo de titulación de Bombón C. y Rosero B. *Estudio de la incorporación de nanosílice en concreto de alto desempeño HPC* (p. 78). Se obtiene la dosificación patrón como se indica en la tabla 4 (ver Tabla 4).

4. Adición de sílice a las dosificaciones

Determinadas las cantidades en peso de cada material para elaborar 1 m³ de hormigón patrón se reemplaza porcentajes en peso del cemento por el nanosílice o microsílice que se desee incluir en la dosificación.

La diferencia en la densidad del cemento con las adiciones de sílice hace necesario modificar las cantidades de los agregados y esto se lo hace como se describe en la norma ACI 211.4R-08. [9] De esta forma se obtiene las cantidades a emplear en cada dosificación de hormigones de alto desempeño. Como se indica en la tabla 5 (ver Tabla 5).

5. Proceso de fabricación del hormigón de alto desempeño

Para la fabricación de hormigones de alto desempeño se debe seguir el siguiente procedimiento, previo a la elaboración de la mezcla:

- En primer lugar, se debe obtener el contenido de humedad de los agregados gruesos y finos, mediante el procedimiento descrito en la norma, [10] para realizar las correcciones por humedad pertinentes a la dosificación.
- Las adiciones de sílice requieren una predisposición, antes de ser incorporados en la mezcla del hormigón, en especial el nanosílice que, debido a su superficie específica que es $200 \pm \text{m}^2/\text{g}$, fue necesario un mezclador de altas revoluciones para su solubilidad con una parte del agua de la mezcla a 800 r. p. m. durante 25 minutos.
- Se procede a medir las cantidades determinadas de cada uno de los componentes del hormigón de acuerdo a la cantidad a fabricar.
- A continuación, se humedece el tambor de la concreteira para evitar la pérdida de agua de mezclado durante

Tabla 4.*Cantidades por metro cúbico del hormigón patrón*

Material	Peso (kg)
Cemento	550
Agua	165
Grava	971,89
Arena	647,92
Superplastificante	3,3

Tabla 5.*Cantidades por metro cúbico de hormigones de alto desempeño con inclusión de partículas de microsílíce y nanosílíce*

Material	Cantidad en peso de los materiales (kg)				
	MS-5%	MS-10%	NS-0,75%	NS-1,5%	NS-3%
Cemento	522,50	495,00	545,88	541,75	533,50
Agua	165,00	165,00	165,00	165,00	165,00
Grava	964,70	958,43	966,35	961,72	952,48
Arena	643,13	638,95	644,23	641,15	634,99
Microsílíce	27,50	55,00	-	-	-
Nanosílíce	-	-	4,13	8,25	16,50
Superplastificante	4,95	6,05	6,05	8,25	12,65

la fabricación del hormigón de alto desempeño.

e. Finalmente, se procede de acuerdo a lo sugerido en [6]:

- Se añade a la concreteira el agregado grueso y fino, se procede a mezclar durante un minuto.
- Luego se agrega el cemento a la concreteira y los materiales se mezclan durante 30 segundos.
- Posteriormente se le incorpora la predisposición de microsílíce o nanosílíce a la concreteira de acuerdo al hormigón de diseño y se mezcla durante otros dos minutos.
- Finalmente, se añade el agua de mezcla faltante junto con el aditivo superplastificante en la concreteira y se mezcla los materiales por dos minutos.

f. Se descarga la concreteira y se procede a determinar la consistencia, trabajabilidad y homogeneidad del hormigón mediante los procedimientos descritos en [11] y [12].

g. En caso de no lograr la trabajabilidad que se requiere, se procede a modificar la cantidad de aditivo superplastificante y se vuelve a realizar la mezcla.

h. Una vez obtenido un hormigón con las características de trabajabilidad adecuadas se procedió a elaborar las probetas de hormigón según lo establecido en [13].

TRATAMIENTO DE LAS VARIABLES

La determinación de las propiedades del hormigón en estado fresco se realizó inmediatamente luego de haber terminado la mezcla, obteniéndose los valores de consis-

tencia, homogeneidad, asentamiento, [11] fluidez [12] y densidad fresca del hormigón de acuerdo a la normativa ASTM C-138.

En el hormigón endurecido, se procede a la medición de las propiedades mecánicas como son: la resistencia a la compresión, de acuerdo a la norma INEN 1573, la resistencia a la tracción indirecta bajo la normativa INEN 2648, el módulo de la rotura descrita en la INEN 2254, módulo elástico detallado en la ASTM C-469 y la densidad seca referido a la normativa ASTM C-567.

III. RESULTADOS

Para el hormigón de alto desempeño en estado fresco se realizó ensayos de laboratorio determinando los valores de las propiedades de densidad, asentamiento y fluidez de cada mezcla fabricada; mientras que para el estudio del hormigón en estado endurecido se ejecutó ensayos a los 3, 7, 28 y 56 días de edad para conocer la evolución de la resistencia a través del tiempo, de acuerdo a lo que indican las siguientes tablas (ver Tablas 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, Figuras 1, 2, 3 e Imágenes 1, 2 y 3).

IV. CONCLUSIONES

1. Los resultados de la caracterización del hormigón en estado fresco muestran que con la incorporación de las partículas de nanosílíce y microsílíce en la mezcla del

Tabla 6.

Valores de las propiedades del hormigón del alto desempeño en estado fresco

Mezcla	Asentamiento (cm)	Fluidez (cm)	Densidad (kg/m ³)
H. de control	22,00	55,00	2410,54
H. con 5% de microsílíce	21,00	59,50	2370,11
H. con 10 de microsílíce	20,50	64,50	2368,20
H. con 0,75% de nanosílíce	19,50	67,00	2392,55
H. con 1,5% de nanosílíce	19,00	58,50	2398,25
H. con 3,0% de nanosílíce	18,00	50,00	2392,05

Tabla 7.

Valores de densidad endurecida de los hormigones de alto desempeño

Mezcla	Densidad (kg/m ³)			
	3 días	7 días	28 días	56 días
H. de control	2382,57	2380,71	2400,19	2403,42
H. con 5% de microsílíce	2363,30	2338,34	2342,30	2377,32
H. con 10% de microsílíce	2345,59	2362,00	2350,47	2346,84
H. con 0,75% de nanosílíce	2370,30	2385,94	2387,45	2388,22
H. con 1,5% de nanosílíce	2376,33	2402,43	2387,02	2389,08
H. con 3,0% de nanosílíce	2375,97	2383,00	2366,71	2394,07

Tabla 8.

Valores de resistencia a la compresión de los hormigones de alto desempeño

Mezcla	Resistencia a compresión(Mpa)			
	3 días	7 días	28 días	56 días
H. de control	34,77	45,36	61,16	69,08
H. con 5% de microsílíce	21,87	36,03	61,51	69,50
H. con 10% de microsílíce	21,41	36,72	61,68	69,99
H. con 0,75% de nanosílíce	35,13	46,04	63,22	71,18
H. con 1,5% de nanosílíce	36,36	46,97	66,32	74,01
H. con 3,0% de nanosílíce	35,28	46,63	65,21	71,05

Tabla 9.

Valores de resistencia a la tracción indirecta de los hormigones de alto desempeño

Mezcla	Resistencia a tracción indirecta (Mpa)			
	3 días	7 días	28 días	56 días
H. de control	3,13	3,53	5,11	5,22
H. con 5% de microsílíce	2,36	3,06	4,21	4,87
H. con 10% de microsílíce	2,24	2,53	4,22	4,59
H. con 0,75% de nanosílíce	2,69	3,79	4,70	4,89
H. con 1,5% de nanosílíce	2,63	3,94	5,33	5,56
H. con 3,0% de nanosílíce	2,59	3,85	4,67	5,25

Tabla 10.

Valores de módulo dinámico de los hormigones de alto desempeño

Mezcla	Resistencia (Mpa)	
	28 días	56 días
H. de control	6,17	7,24
H. con 5 % microsílíce	6,54	8,08
H. con 10% microsílíce	6,51	8,38
H. con 0,75% nanosílíce	6,39	8,35
H. con 1,5% nanosílíce	7,17	8,69
H. con 3,0% nanosílíce	6,94	8,10

Tabla 11.

Valores de módulo dinámico de los hormigones de alto desempeño

Mezcla	Resistencia (Gpa)			
	3 días	7 días	28 días	56 días
H. de control	32,77	36,21	39,35	41,43
H. con 5% de microsílíce	28,18	31,14	38,02	39,32
H. con 10% de microsílíce	28,54	31,84	36,73	38,82
H. con 0,75% de nanosílíce	33,66	36,90	37,33	39,86
H. con 1,5% de nanosílíce	17,49	33,70	40,99	45,27
H. con 3,0% de nanosílíce	28,25	33,04	42,94	43,61

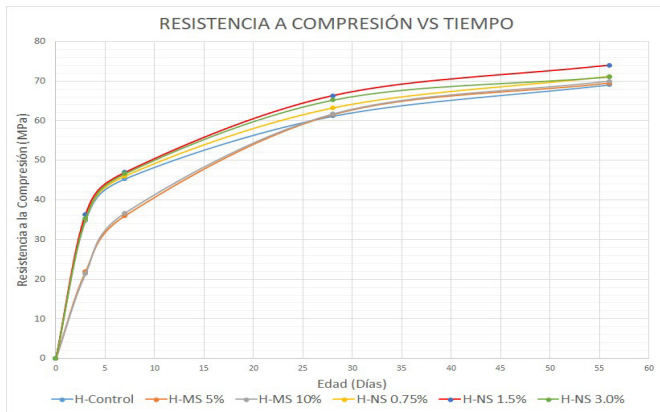


Figura 1.
Resistencia a la compresión vs. tiempo de los hormigones de alto desempeño

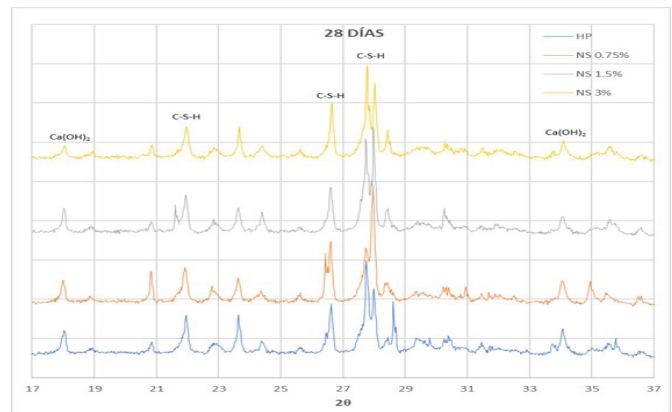


Figura 3.
Comparación de los ensayos XRD de las dosificaciones del hormigón de alto desempeño con nanosílíce a los 28 días

Tabla 12.

Valores de módulo elástico y coeficiente de Poisson de los hormigones de alto desempeño

Mezcla	Módulo elástico (Mpa)	Coficiente de Poisson
H. de control	31.667,20	0,21
H. con 5 % microsílíce	35.713,53	0,20
H. con 10% microsílíce	36.901,74	0,20
H. con 0,75% nanosílíce	36.367,91	0,20
H. con 1,5% nanosílíce	35.310,52	0,20
H. con 3,0% nanosílíce	35.189,01	0,20

Figura 1.

Resistencia a la compresión vs. tiempo de los hormigones de alto desempeño

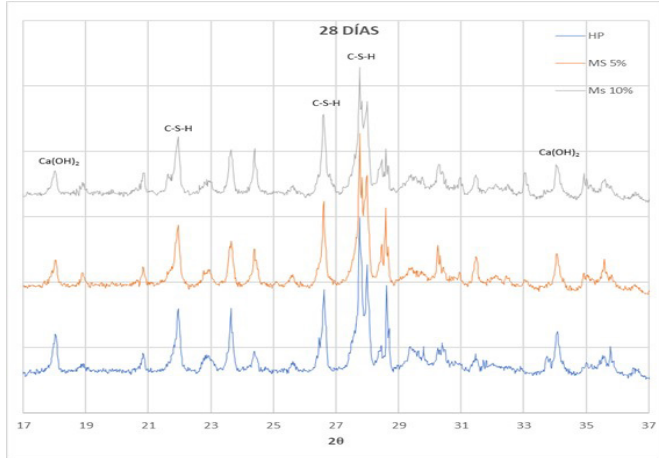


Imagen 1.

Ensayo SEM, del hormigón patrón de alto desempeño a los 28 días. del Laboratorio de Microscopía, ESPE

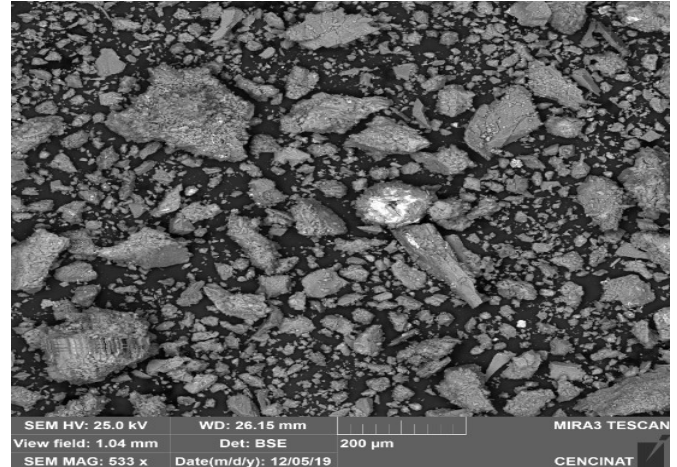


Imagen 2.

Ensayo SEM del hormigón de alto desempeño con adición de nanosílice 1,5% a los 28 días del Laboratorio de Microscopía, ESPE

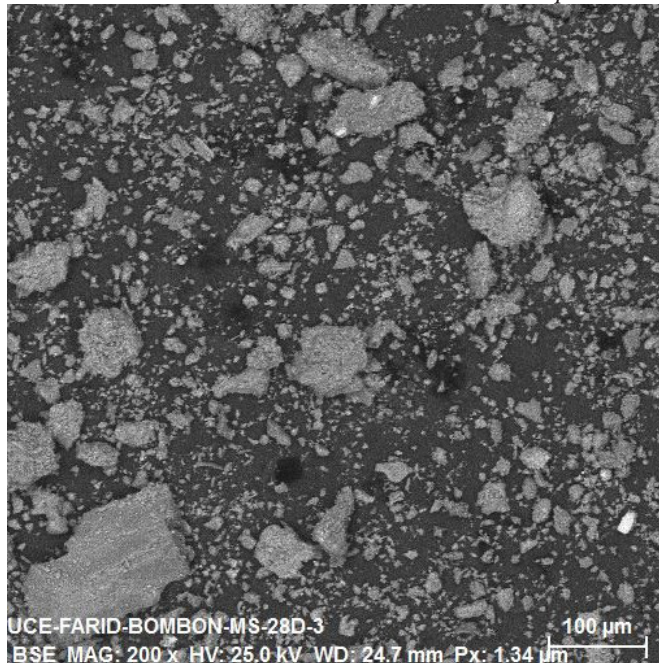
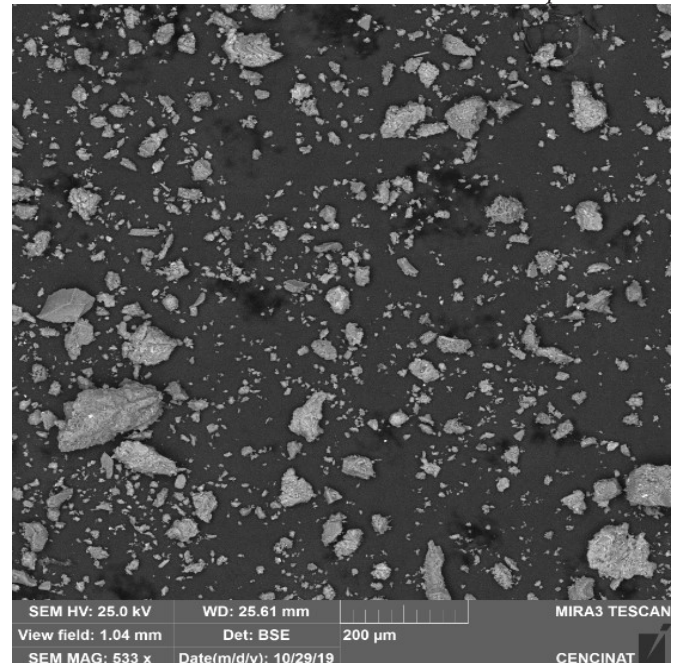


Imagen 3.

Ensayo SEM del hormigón de alto desempeño con adición de microsíllice 5% a los 28 días del Laboratorio de Microscopía, ESPE



hormigón, existe una pérdida de trabajabilidad a medida que aumenta el contenido de partículas de sílice, esto se compensa con el incremento de la cantidad del superplastificante para lograr la trabajabilidad deseada.

2. Las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones de alto desempeño con inclusión de partículas de sílice se vieron afectadas positivamente en comparación con el hormigón de control (ver Tablas de la 6 a la 12). En donde se evidencia que con adición de nanosílice se incrementa la resistencia a la compresión en un 8% a los 28 días del ensayo.
3. La propiedad que se vio más beneficiada por la inclusión de nanosílice en un hormigón de alto desempeño

fue el módulo de rotura, el cual alcanzó un valor de hasta 120% del obtenido con el hormigón patrón.

4. La inclusión del 1,5% de nanosílice resultó ser el porcentaje óptimo en reemplazo en peso del cemento, ya que con aquel porcentaje se logró obtener mejores resultados de las propiedades mecánicas del hormigón de alto desempeño.
5. En los ensayos xrd, se determinó que el hormigón con partículas de nanosílice tiene un aumento en el pico de la curva de la figura 2, siendo el sulfato de calcio hidratado, producto de la hidratación del cemento, lo que significa que se tuvo mayor hidratación de la mezcla en comparación con la curva del hormigón patrón.

6. En el ensayo sem, se observa que las partículas de nanosílice producen un llenado de poros de la mezcla, generando así un hormigón más resistente, de baja permeabilidad, y más durable en el tiempo.

REFERENCIAS

- [1] ACI CT-18: ACI Concrete terminology.
- [2] A. Imbaquingo, *Diseño de hormigón de alto desempeño*, tesis de pregrado, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí-Ecuador, 2012.
- [3] ASTM 125-20: Terminología referente al concreto y agregados para concreto.
- [4] ACI 318-19: Requisitos del Código para hormigón estructural.
- [5] C. Salgado, *Estudio de la actividad puzolánica de microsílíce/nanosílíce y su aplicación en hormigones de altas resistencias*, tesina de especialidad, Universidad de Catalunya, 2010.
- [6] A. Khaloo, M. Hossein y P. Hosseini, «Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete», Elsevier, Teherán, Irán, 2016.
- [7] S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese y J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto*, 1.ª ed., Illinois, EE. UU., 2004.
- [8] Terence C. Holland. *Silica fume user's manual*, 2005.
- [9] ACI 211.4R-08. *Guía para la selección de proporciones de hormigones de alta resistencia usando cemento Portland y otros materiales cementicios*.
- [10] NTE INEN 862. Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad, 2011.
- [11] NTE INEN 1578. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento. 2010.
- [12] ACI 237R-07. Self-consolidating concrete. Reapproved 2019.
- [13] NTE INEN 1576. Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.

ELEMENTOS GRÁFICOS

Imagen 4.

Extracción de los agregados gruesos y finos de la cantera Cope-to Cía. Ltda., ubicada en el margen derecho del río Toachi, Santo Domingo.



Imagen 5.

Fabricación del hormigón de alto desempeño (hpc)



Imagen 6.

Curado del hormigón de alto desempeño (HPC)



Imagen 7.

Ensayo de asentamiento del hormigón de alto desempeño (HPC)

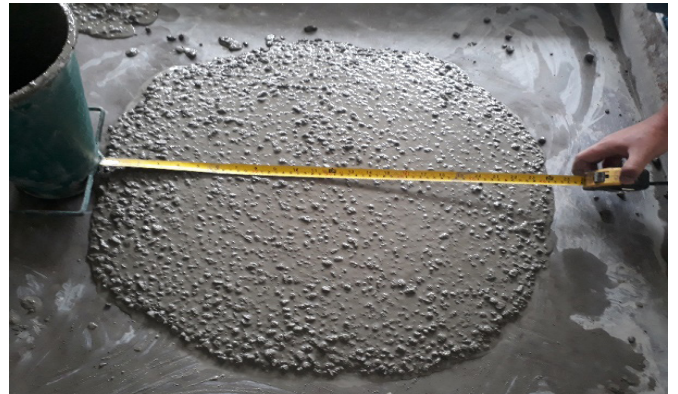


Imagen 8.

Ensayo de compresión del hormigón de alto desempeño (HPC)



Imagen 9.

Ensayo a tracción indirecta o método brasileño del hormigón de alto desempeño (hpc)



Imagen 12.

Ensayo de ultrasonido del hormigón de alto desempeño (HPC)



Imagen 10.

Ensayo a flexión del hormigón de alto desempeño (HPC)



Imagen 11.

Estructura interna del hormigón de alto desempeño (HPC)

