

Recibido: 20-08-2024 Aceptado 12-10-2024

Efecto de la naturaleza química de nanopartículas en las propiedades mecánicas del cemento Portland

Effect of the chemical nature of nanoparticles on the mechanical properties of Portland cement

Juan Manuel Guzmán Cardona¹

Juan Manuel Jaramillo Zuluaga²

Carlos Alberto Mosquera Hurtado³

Cómo citar:

Guzmán, J., Jaramillo, J. & Mosquera, C. (2024). Efecto de la naturaleza química de nanopartículas en las propiedades mecánicas del cemento Portland. *Vía Innova*, 11 (1), 199-216. <https://doi.org/10.23850/2422068X.6821>

¹ Juan Manuel Guzmán Cardona, Estudiante pregrado Ingeniería de Minas y Metalurgia, Universidad Nacional de Colombia UNAL. ljuguzmanc@unal.edu.co

² Juan Manuel Jaramillo Zuluaga, Estudiante pregrado Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia UNAL. jaramillo.2002@outlook.com

³ Carlos Alberto Mosquera Hurtado, Estudiante pregrado Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia UNAL. mosquerahurtadocarlosalberto@gmail.com

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es evaluar el efecto de la naturaleza química de tres tipos de nanopartículas cuando se adicionan al cemento Portland. Para ello, se investigó la fluidez, la resistencia a la compresión en cuatro edades y el tiempo de fraguado de este material a una composición de nanopartículas constante. Se pudo determinar que todas las nanopartículas disminuían la fluidez del material en menos de un 18 % mientras que el tiempo de fraguado mostró mejoras de hasta 15 minutos con adición de nano-SiO₂ y retrasos de más de 20 minutos al interactuar con nano-Al₂O₃ o nano-FeO. Posteriormente, se observó que la naturaleza química de la nano-FeO le suministró al cemento aumentos de resistencia a los 28 días de hasta 7 MPa (un 29 % respecto al patrón), resultados considerablemente mayores que los cambios de la nano SiO₂ y nano Al₂O₃ en +2 y -2 MPa respectivamente sobre la muestra sin nanopartículas. Para la más eficiente se realizó un análisis de diseño en costos vs estabilidad que permite dar una idea al lector de las proyecciones que tienen estos efectos nanotecnológicos en la sociedad contemporánea.

200

Palabras Clave: Nanopartículas, Nanotecnología, Cemento, Propiedades mecánicas, Resistencia a la Compresión.

ABSTRACT

The main objective of this study is to evaluate the effect of the chemical nature of three types of nanoparticles when added to Portland cement. In this way, the fluidity, compressive strength at four ages, and setting time of this material were investigated at a constant nanoparticle composition. It was determined that all nanoparticles reduced the material's fluidity by less than 18 %, while the setting time showed improvements of up to 15 minutes with the addition of nano-SiO₂ and delays of over 20 minutes when interacting with nano-Al₂O₃ or nano-FeO. Subsequently, it was observed that the chemical nature of nano-FeO provided the cement with strength increases at 28 days of up to 7 MPa (29 % compared to the standard), results that were considerably higher than the changes of nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ at +2 and -2 MPa respectively over the sample without nanoparticles. For the most efficient one, a cost vs stability design analysis was performed to give the reader an idea of the projections these nanotechnological effects have in contemporary society.

201

Keywords: Nanoparticles, Nanotechnology, Cement, Mechanical properties, Compressive Strength.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del concreto como material de construcción ha sido una de las prácticas más empleada para la ejecución de obras civiles. Según el DANE, para junio de 2022 la producción de concreto habría aumentado un 15,9 % respecto al año pasado en la misma fecha, alcanzando 569,2 miles de metros cúbicos producidos (DANE, 2022), cifras que evidencian la alta demanda que existe en este sector con relación a ese material. Sin embargo, el concreto como material de construcción posee varias limitaciones; la principal de ellas y de hecho, la más preocupante, es su resistencia a la compresión, pues hace que en varios escenarios sea más atractivo usar materiales como la madera o el acero, que aunque tiene un costo más elevado, suplen algunas de las falencias que tiene el concreto. Por esta razón, a través del aprovechamiento de las propiedades químicas de diversas nanopartículas, se pretende optimizar las características del concreto, al mismo tiempo que se busca mantener los costos dentro de márgenes controlados.

En esta investigación se usó cemento Portland con la idea de que es un cemento ampliamente utilizado en construcción por su alta versatilidad, comercialización y calidad. Además, es compatible con muchos de los materiales que se usan convencionalmente para las obras tales como PVC, adoquines, ladrillos, entre otros (BECOSAN, 2021). Las principales características que se buscan en el cemento son, por supuesto, la resistencia a la compresión, pero también el tiempo de fraguado, la trabajabilidad, la sanidad y algunas propiedades químicas como su hidratación y calor. Al hacer un análisis sobre todas estas consideraciones y teniendo en cuenta que debido al rápido crecimiento que están registrando las ciudades, así como el poco espacio que está quedando disponible, se vuelve necesario desarrollar nuevos cementos que posean propiedades lo suficientemente competentes para construir estructuras más esbeltas pero que logren garantizar buen servicio y seguridad al público en general (Meza & Rodríguez, 2018). Por lo anterior, se estudió el uso de nanopartículas como aditivo al cemento Portland para medir el cambio en algunas de las propiedades antes descritas con respecto a una muestra patrón.

Las nanopartículas utilizadas poseen propiedades químicas muy particulares que lograron repercutir en cada uno de los ensayos. La nano SiO₂ goza de una naturaleza química que, al reaccionar con el hormigón convierte las nanopartículas de sílice en nanopartículas de cemento, llegando a aumentar en más del 50 % los esfuerzos de flexo-tracción. También mejora el acabado, la textura del hormigón y brinda una permeabilidad casi nula, aumentando su durabilidad. A los 20 °C cuenta con un pH de 5.00 ± 1 (ácido), densidad 1.03 ± 0.02 g/cm³ y viscosidad 13 ± 2 sec. Regularmente se

aplica una vez estén mezclados los áridos con el cemento, y luego de haber agregado el agua correspondiente la cantidad de nanopartículas estará entre el 1 y el 3 % sobre el peso del cemento. La sílice es productora de geles CSH, los mismos que funcionan como pegamento del hormigón y hacen que cohesione con todas sus partículas. Se producen partículas de CSH en tamaños de 5 a 250 nm, es decir, se está reforzando la estructura del hormigón a un nivel mil veces más pequeño (Rodríguez, 2013).

Otra de las nanopartículas utilizadas es la nano FeO, que está constituida por partículas de un tamaño entre 10-20 nm. Debido a esto, consta de características primordiales con las cuales se pueden relacionar los resultados que esta nanopartícula obtuvo. La primera, es su capacidad para rellenar los poros que dejan los cristales hidratados al formarse y que logran una mejora notable en la durabilidad (Heras, 2015). Luego, se cuenta con que no tiene propiedades puzolánicas al no contener en su composición aluminio o sílice; así, no produce ninguna reacción de tipo químico con los compuestos hidratados de la pasta. En cuanto a sus propiedades, la densidad es de 5,242 g/cm³, la masa molar de 159,07 g/mol, el punto de fusión se produce a 1565 °C y es insoluble en agua (Heras, 2015).

Finalmente están las nanopartículas de alúmina; su tamaño ronda los 15 nm y está conformada en un 99 % de Al₂O₃, con una densidad de 0.12 gramos por centímetro cúbico. Se ha visto que adicionar estas nanopartículas a la pasta de cemento provoca mayor compactación y dureza en la microestructura porque tienen una capacidad de rellenar los espacios libres entre granos de cemento inmovilizando las partículas de agua que se encuentran allí. Además favorece la formación de portlandita, etringita y geles CSH que van de la mano de las reacciones puzolánicas (Bessini, 2015).

El concepto más acertado actualmente sobre nanotecnología, es el que la describe como una rama de la ciencia que comprende y controla la materia a nanoescala, la cual está contemplada entre 1 y 100 nanómetros (NNI, 2022). La posibilidad de manipular directamente átomos y moléculas sería introducida por primera vez en 1959 por el dr. Richard Feynman en la American Physical Society con la conferencia "There's Plenty of Room at the Bottom", donde expresó que la materia podría exhibir propiedades físicas, químicas y biológicas en sus tamaños nanos que difieren de una forma considerable de las propiedades de las otras dimensiones en las que se presenta todo lo que constituye la existencia (Muon, 2012). En el presente de los avances industriales, la nanotecnología se ha convertido en pionera y en un excelente aliado del bienestar y la evolución de la vida cotidiana con aplicaciones importantes en diferentes sectores; entre los más destacados

se encuentran el sector de los hidrocarburos y la energía (Franco et al, 2017, Contreras et al, 2022, Franco et al, 2013, Franco et al, 2013) en la apuesta por conseguir y recuperar extracciones más limpias; el sector de la medicina (Anselmo & Mitragotri, 2016, Salata, 2004) durante el abordaje de las enfermedades desde el interior del organismo; el sector de la electrónica (Gabilondo, 2019), mediante la fabricación de dispositivos sensoriales o resonantes, y finalmente, el sector de los materiales y la construcción. En este último, se destaca la relación del impacto generado tras el aprovechamiento que esos espacios pequeños le puedan proporcionar a la fabricación y el tratamiento de los materiales que allí se utilizan con la optimización del costo-beneficio inherente al proceso. Consecuentemente, algunos autores han podido determinar que las nanopartículas de SiO_2 alteran la resistencia y la estructura del cemento cuando se combinan con superplastificantes (Stefanidou & Papayianni, 2012). También, se han obtenido concretos con mejores presentaciones en el sentido de conseguir materiales más densos, livianos y ecológicos que tienen menores emisiones de CO_2 y menores consumos de energía cuando interactúan con grafeno, nanotubos de carbono o nanopartículas de hierro (Vilela & Ludvig, 2020, Muon, 2012, Tobón & Medina, 2010, Pan et al, 2015, Mendes et al, 2015).

De este modo, es importante aclarar que, si bien se han ejecutado avances relevantes que ayudan a obtener un punto de equilibrio efectivo para la adición de una composición adecuada (1 %) (Stefanidou & Papayianni, 2012, Tobón et al, 2007, Mendes et al, 2015), muchos de estos resultados no se han aterrizado sobre aplicaciones en el sector (especialmente el colombiano) y carecen de evaluaciones en algunas propiedades mecánicas importantes que podrían estar involucradas directamente en la modificación de las otras. Sobre este trabajo se pretende entregar una vista un poco más sintetizada que abra camino a la solución de problemas presentes en las obras a gran escala con base a la nanotecnología aplicada.

204

2. METODOLOGÍA Y MATERIAS PRIMAS

Para este estudio se utilizaron tres nanopartículas comerciales de sílice (SiO_2 , Sigma Aldrich, USA), alúmina (Al_2O_3 Sigma Aldrich, USA) y magnetita (Fe_3O_4 , Sigma Aldrich, USA). El cemento empleado (Portland, Argos, Colombia) junto con las materias primas utilizadas para la producción de las pastas cumplen con la NTC-220.

Las nanopartículas de SiO₂ cuentan con un tamaño de 200 a 300 nm, FeO con 30 nm y Al₂O₃ con 200 a 300 nm de diámetro. Junto con la supervisión del técnico de laboratorio se determinó hacer uso de tres cubos de 250 gramos de cemento Portland convencional para la evaluación de cada edad; cada mezcla estuvo conformada por una proporción 1:3 de cemento-arena y agua-cemento (W/C) de 0.53. Las nanopartículas se añadieron 60 segundos después de mezclar el cemento, la arena y el agua en una mezcladora mecánica al 1 % ppm. las relaciones de estos materiales se resumen en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Resumen de cantidades en materias primas

Naturaleza	Cemento (g/edad)	Agua (ml/edad)	Arena (g/edad)	Adición (g/edad)	Edades	Total (g)
Patrón	250	132.5	750	0	3	3397.5
Nanos (1 % ppm)	250	132.5	750	0.25	9	5694.8
Total						9092.3

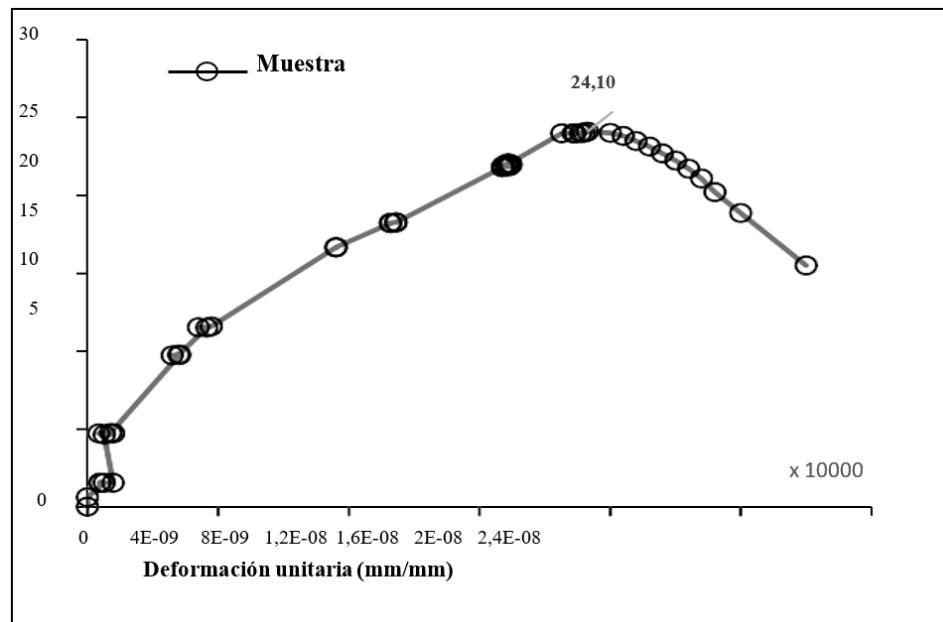
Fuente: elaboración propia.

Nota: con “nanos” se hace referencia a los tres especímenes utilizados. Por cada naturaleza se requieren tres edades, es decir, nueve en total.

Para establecer el efecto que las adiciones producen en las propiedades mecánicas del cemento, se realizaron ensayos que determinarían la resistencia a la compresión, fluidez y tiempo de fraguado. Buscando tener un seguimiento del resultado, se evaluó el comportamiento de cada muestra en edades de 3,7 y 15 días con una proyección logarítmica a los 28 días. Se utilizó una prensa universal para medir la resistencia de las probetas, registrando la deformación en función de los incrementos de esfuerzo aplicados. Este procedimiento permite determinar la carga exacta a la que cada muestra falla (ver figura 1). El experimento se repitió en tres probetas, diferenciadas por su naturaleza y edad, y las medias de los resultados se emplearon para la elaboración de los diagramas presentados en la sección 3. Finalmente, los especímenes fueron curados en un ambiente húmedo y la totalidad de estos ensayos permitió realizar una comparativa entre el com-

portamiento de las tres nanoadiciones y la muestra patrón. El objetivo principal será precisar cuál de estas presenta mejores resultados y comparar el diseño respecto a los costos en función de la durabilidad para concluir si es viable o no hacer uso de estas alteraciones en la materia.

Figura 1. Curva de deformación de una probeta de cemento sin adiciones con un curado de 28 días sometida a una prensa universal.



Fuente: elaboración propia

Nota: El pico máximo es utilizado para obtener la resistencia del material.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

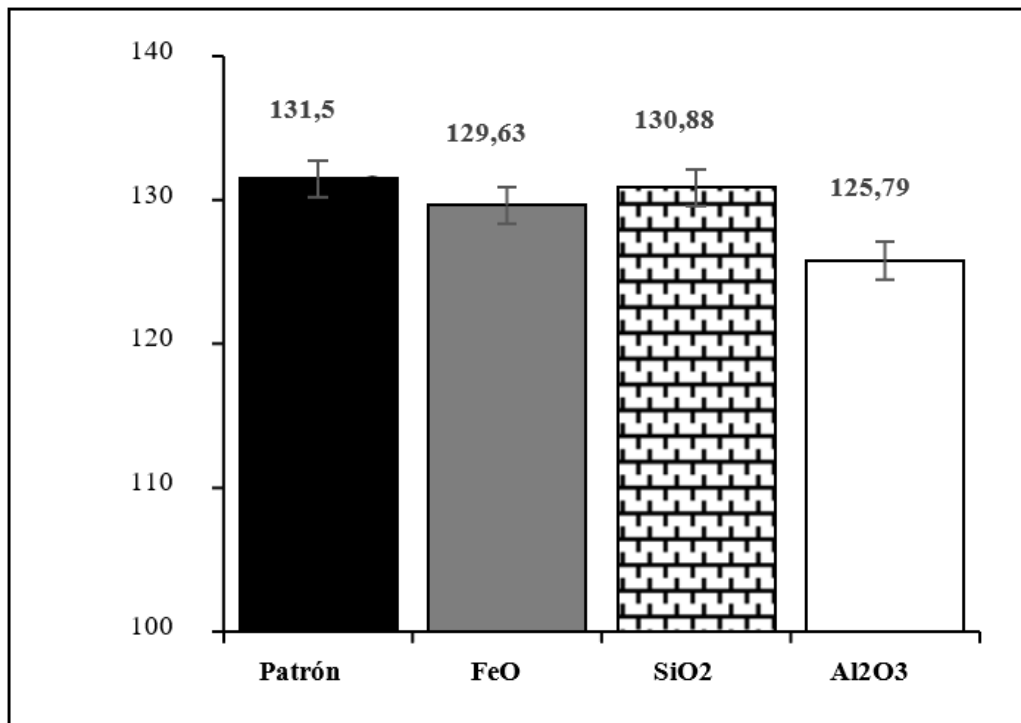
3.1 Fluidez

La fluidez o trabajabilidad del material está asociada con la facilidad para usar la mezcla sin que se produzcan problemas de segregación. El tiempo en que la muestra puede actuar sin secarse y la facilidad con que la mezcla puede retener el agua aun estando en contacto con superficies absorbentes (Leal & Echeverri, 2020). Esta medida estará dada por el incremento del diámetro de un espécimen moldeado por un mediocono después de sacudirlo un número específico de veces. Según la NTC 111 y aplicando la metodología de la NTC-5784 para garantizar el alcance de buenos resultados, es necesario apisonar el molde 20 veces en forma de espiral, apisonar la misma cantidad de veces con igual intensidad al aplicar la segunda capa, y una vez retirado el molde, aplicar

los 25 golpes en 15 segundos para lograr una correcta dispersión de la mezcla sobre la mesa (Leal & Echeverri, 2020).

Los ensayos mostraron que la adición de todas las nanopartículas reducía la trabajabilidad del cemento, esto puede deberse a la gran área superficial que tienen las partículas adicionadas, lo cual implica una mayor absorción de agua (Liu et al, 2012). Como se muestra en la *figura 2*, la nanopartícula que más influencia tuvo en la disminución de la fluidez fue la alúmina. La adición de partículas de hierro y sílice mantuvieron una fluidez similar a la muestra patrón.

Figura 2. Porcentajes de expansión de pastas de cemento Portland con adición de nanopartículas al 1 %.



Fuente: elaboración propia

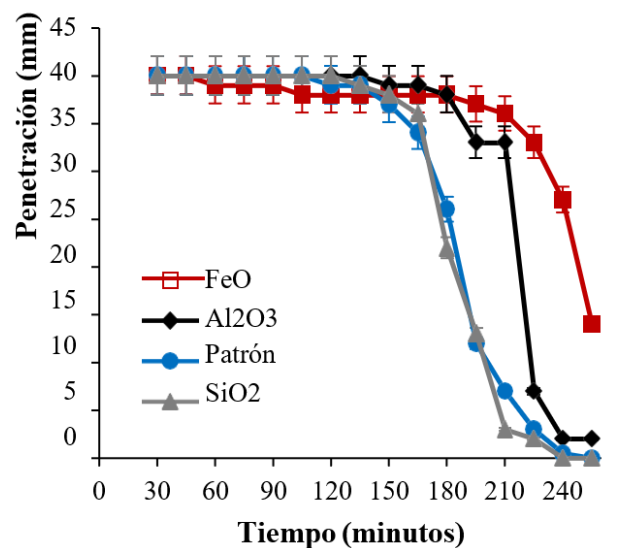
La fluidez adecuada para una pasta debe presentar un porcentaje de expansión del $30 \% \pm 2 \%$ (Leal & Echeverri, 2020), es decir, los resultados muestran que si bien las nanopartículas de FeO y SiO₂ disminuyen la trabajabilidad, no hay un impacto relevante en esta propiedad mecánica que permita descartar su uso, una apreciación que no se puede extender al resultado de las nanopartículas de Al₂O₃. Estas observaciones tienen importancia al momento de ejecutar los vaciados en obra.

3.2 Tiempo de fraguado

Cuando se cuenta con una correcta consistencia en la pasta de cemento, este presentará una resistencia específica a la penetración de una aguja. Dicha penetración determinará el tiempo que se demora en secar el concreto para saber si se puede reforzar estructuralmente en ese instante o se debe esperar un intervalo de tiempo dado (Leal & Echeverri, 2020, González & Allaza, 2012). Si se quieren alcanzar datos de buena calidad, es preciso ser puntuales con los tiempos en que se revisará la muestra una vez haya iniciado la prueba, situar la aguja inicialmente donde entre en contacto con el molde, leer la aguja cuando haya terminado la penetración, limpiar la aguja de Vicat inmediatamente después de cada penetración y por último, engrasar el molde y la placa de aceite con un aceite adecuado (González & Allaza, 2012). Dicho esto, el tiempo de fraguado es relevante en el avance de la construcción de obras civiles en donde no se va a cargar la estructura de forma inmediata, por ejemplo, en las cunetas de las vías o el concreto lanzado en los ciclos de un túnel.

Para el caso de esta investigación, los ensayos mostraron un efecto retardante en la adición de óxido de hierro y óxido de aluminio; para esta última, se evidencia un mayor efecto inicial. En la **figura 3** esta adición apenas había alcanzado el tiempo inicial de fraguado cuando la muestra patrón ya estaba llegando al tiempo final. La adición del FeO mostró un mayor retraso en la etapa final, pues teniendo en cuenta la penetración de la aguja, aún le faltaban entre 15 a 20 mm cuando las otras muestras ya habían fraguado casi en su totalidad. La adición de nanopartículas de sílice, por su parte, no causó un efecto tan evidente como las demás, en esta se alcanzó el periodo final de fraguado 15 minutos antes que la muestra patrón.

Fig 3. Curvas del tiempo de fraguado de pastasde cemento portland con y sin nanopartículas.



Fuente: elaboración propia

Cuando el avance y la relevancia del proyecto lo determina la resistencia que haya alcanzado la mezcla de concreto a una determinada edad, es más importante la curva de aumento de resistencia que la del fraguado. En la mayoría de obras no existe un problema relevante al dejar secar el cemento por una hora más, sin embargo, el que la infraestructura no soporte una determinada carga con el pasar de los días sí genera pérdidas millonarias como el caso del colapso del edificio Space en Medellín, que no solo generó una pérdida de 40.600 millones de pesos, sino que también provocó el fallecimiento de 12 personas en el 2013 (Restrepo, 2017).

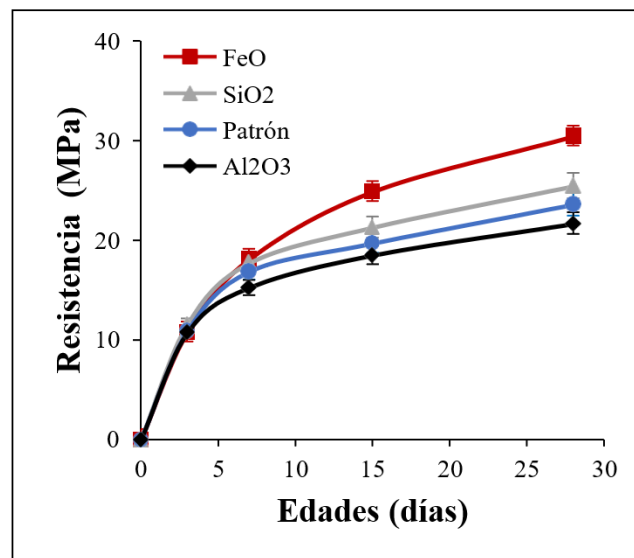
3.3 Resistencia a la compresión

La empresa más reconocida en cementos mexicanos, CEMEX, afirma que “la resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área” (CEMEX, 2019, Pg01), es decir, qué tanta fuerza axial puede soportar el cemento antes de empezar a fracturarse.

Los resultados de estas pruebas se emplean fundamentalmente para determinar si el cemento de interés se encuentra dentro de la norma y cumple con los requerimientos de resistencia especificados para una o varias estructuras en particular (Herreras, 2015, CEMEX, 2019). Sobre esta

investigación, se pretende encaminar una mezcla tradicional peromenos costosa a que cumpla con esos requerimientos mediante la alteración química de su estructura.

Figura 4. Evolución de la resistencia a la compresión simple del cemento Portland enpresencia de nanopartículas al 1 %.



Fuente:elaboración propia

210

La *figura 4* muestra las curvas de resistencia y el avance de sus valores con el pasar de los días. Como es evidente, las nanopartículas de FeO le suministraron un aumento considerable a la resistencia del material, específicamente, incrementaron esta propiedad durante la etapa final en 7 MPa (un 29 %). Por otra parte, las nanopartículas de SiO₂ y Al₂O₃ presentaron alteraciones de +2 y -2 MPa respectivamente. Estos resultados sugieren que la adición de óxido de hierro puede ser la más eficiente a la hora de obtener concretos con mayores niveles de resistencia y que el óxido de aluminio no es conveniente cuando se quiere obtener un beneficio de este material. Mencionado esto, en la próxima sección se realizará un análisis aplicativo para justificar si la adición con mejores efectos mostrados se puede llevar al mercado o se queda netamente en términos de avances en conocimientos nanotecnológicos.

4. APLICACIONES

El objetivo de hacer estas investigaciones es poder construir seccionesLa sección C.2.1 de la **norma NSR-10 (ASOSISMICA, 2010)**, define f'_c como la resistencia especificada a la compresión del concreto en MPa. El valor correspondiente fue calculado mediante ensayos de compresión simple, observándose un aumento del 29 % a los 28 días en comparación con una muestra de control sin adición de nanopartículas (FeO). Este incremento en la resistencia puede ser aplicado en elementos estructurales, como columnas o losas, los cuales son diseñados para resistir solicitaciones tales como fuerza axial, cortante y momento flexor.

4.1 Fuerza axial

Considere una columna estructural sin refuerzo de acero (utilizado únicamente con fines demostrativos, dado que las estructuras de concreto siempre deben contar con refuerzo de acero). En este contexto, la resistencia axial de diseño para elementos no preesforzados se define según lo establecido en C.10.3.6.2 como: $\phi P_{(max)} = 0.75\phi[0.85f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$ (1)

Donde:

ϕ = Factor de reducción de resistencia

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto

A_g = Área bruta de la sección en concreto

f_y = Fluencia del acero

A_{st} = Área total del refuerzo longitudinal no preesforzado

Como se trata de una suposición, una columna sinrefuerzo, la **ecuación 1** se lee:

$$\phi P_{(max)} = 0.75\phi[0.85f'_c A_g] \quad (2)$$

La **ecuación 2** muestra que la resistencia axiales directamente proporcional a la resistencia a la compresión y al área bruta del concreto. De este modo, el constructor puede elegir dos caminos para el futuro de su obra:

- Se mantiene la sección transversal de diseño y la resistencia de la columna aumenta un 29 %

- Se mantiene la resistencia de diseño y el área bruta de la sección en concreto se reduce un 29 %

De las dos opciones anteriores, es llamativa la segunda ya que es la que incentiva la disminución en la cantidad de material empleado y, por tanto, una disminución significativa de costos.

4.2 Fuerza cortante

Suponga que tiene un elemento estructural de concreto no preesforzado sometido únicamente a esfuerzos cortantes y tensionales. La resistencia nominal a la fuerza cortante proporcionada por el concreto se define en C.11.2.1.1 como:

$$V_c = 0.17\lambda * \sqrt{f'_c} * b_w * d \quad (3)$$

Donde:

λ = Factor de modificación de acuerdo con el peso del concreto

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto

b_w = Ancho del alma o diámetro de la sección circular

d = Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción

212

La **ecuación 3** muestra que la resistencia axial es directamente proporcional a la raíz de la resistencia a la compresión del concreto y al área $b_w * d$. Haciendo un análisis análogo a la sección 4.1, se puede entonces afirmar que el constructor puede optar por dos caminos:

- Se mantiene la sección transversal de diseño y la resistencia de la columna aumenta en un 13.6 %
- Se mantiene la resistencia de diseño y el área se reduce $b_w * d$ en un 13.6 %

De las dos opciones anteriores, la más conveniente es la última por su estrecha relación con la disminución en la cantidad de material empleado, y consecuentemente, con la disminución de costos.

A la hora de hacer un análisis respecto a la resistencia al momento flexor del concreto, se puede observar que diverge del análisis que se hizo para las fuerzas axiales y cortantes, ya que no

se diseñan las estructuras de concreto para resistir la tracción que le induce el momento flector. Además, para esto se debe añadir refuerzo de acero. Por otra parte, los ensayos no mostraron una mejoría significativa en cuanto al tiempo de fraguado del cemento, por lo tanto, no hay propuestas para reducir el tiempo de construcción de estructuras de concreto en cuanto a secado del cemento, sin embargo, es necesario resaltar que esta propiedad mecánica puede ser importante de acuerdo a los intereses ingenieriles del encargado de obra en aplicaciones como el suministro de explosivos en macizos subterráneos reforzados con cemento o la estabilidad de taludes en superficie que puedan obstruir los ciclos de operación en minería.

5. CONCLUSIONES

Los avances en nanotecnología han dado paso a una nueva visión científica en lo que compete al estudio de la materia, de esta manera se ha visto que la interacción entre algunos compuestos en tamaños nanométricos con las estructuras cristalinas del cemento Portland permiten que, debido a su naturaleza química, se alteren considerablemente las propiedades del material. Las adiciones al 1 % ppm de nanopartículas de SiO_2 , FeO y Al_2O_3 registran cambios en la trabajabilidad de las pastas de concreto con un único efecto que se sale del rango permitido por la norma y que está asociado a la última nanopartícula en mención (-2.5% del margen aproximadamente). Por otra parte, solo una nanopartícula registra pequeñas desviaciones positivas en el tiempo de fraguado del cemento y corresponde a la sílice, produciendo un efecto acelerante que se encuentra alrededor de los 15 minutos.

También se registran cambios trascendentales en los valores de resistencia ligados a las estructuras; la alúmina se puede mencionar como una nanopartícula de descarte en la optimización de las propiedades mecánicas del cemento por su efecto disminuyente en la resistencia del material. Los otros especímenes aumentan este esfuerzo de falla en 2 MPa asociados al óxido de silicio y 7 MPa al óxido de hierro, reduciendo considerablemente la demanda del material que se requiere a la hora de ejecutar proyectos que dependan de la seguridad, estabilidad y sostenimiento estructural a largo plazo. Aunque este sector ha experimentado avances significativos en tecnología, el presente trabajo ofrece una perspectiva más precisa en condiciones de campo, lo que podría facilitar futuros desarrollos en el ámbito de la nanotecnología. Esta rama de la ciencia constituye un pilar fundamental para abordar los desafíos de la sociedad contemporánea.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, por el apoyo logístico y financiero brindado a través del Laboratorio de estructurasy el Laboratorio de Fenómenos de Superficie. También agradecen al Prof. Dr. John Jairo Blandón y el técnico Jorge Arturo Osorio por su apoyo durante la realización de las pruebas experimentales.

7. REFERENCIAS

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Tomo 2. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica
- About Nanotechnology | National Nanotechnology Initiative. (2022).
- Anselmo, A. C. & Mitragotri, S. (2016). Nanoparticles in the clinic. *Bioengineering & Translational Medicine*, 1(1), 10-29
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Tomo 2. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- BECOSAN®. (2021). Cemento Portland.
- Bessini, J. G. (2015, Junio). Morteros de cemento con nano-adiciones de sílice, hierro y alúmina. Archivo Digital UPM. Retrieved November 15, 2022.
- DANE. (2022). Estadísticas de Concreto Premezclado (EC).
- Franco, C. A., Montoya, T., Nassar, N. N., Pereira-Almao, P. & Cortés, F. B. (2013). Adsorption and Subsequent Oxidation of Colombian Asphaltenes onto Nickel and/or Palladium Oxide Supported on Fumed Silica Nanoparticles. *Energy & Fuels*, 27(12), 7336-7347.
- Franco, C. A., Nassar, N. N., Ruiz, M. A., Pereira-Almao, P. & Cortés, F. B. (2013). Nanoparticles for Inhibition of Asphaltenes Damage: Adsorption Study and Displacement Test on Porous Media. *Energy & Fuels*, 27(6), 2899-2907.
- Franco, C. A., Zabala, R. & Cortés, F. B. (2017). Nanotechnology applied to the enhancement of oil and gas productivity and recovery of Colombian fields. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 157, 39-55.
- Gabilondo, M. (2018). Desarrollo de recubrimientos funcionales con nanopartículas para la electrónica impresa. Universidad de Navarra
- Gonzales, E. & Allaza, A. M. (2012). Método de ensayo de cementos. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. Campus Virtual ULL.

- Heras Murcia, D. (2015, Junio). Morteros de cemento con nano-adiciones de hierro y sílice. Retrieved November 15, 2022.
- Herreras Murcia, D. (2015, Junio). Morteros de cemento con nano-adiciones de hierro y sílice. Universidad Politécnica de Madrid.
- Leal Rozo, R. & Echeverri Vergara, S. (2020). Fluidéz y resistencia a compresión de seis marcas de cemento de uso general. Universidad Piloto de Colombia.
- Liu, X., Chen, L., Liu, A. & Wang, X. (2012). Effect of Nano-CaCO₃ on Properties of Cement Paste. *Energy Procedia*, 16, 991-996.
- Maria Contreras-Mateus, Afif Hethnawi, Yazan Mheibesh, Tatiana Montoya, Kotaybah Hashlamoun, Mohammed Bakir, Taha Karaki & Nashaat N. Nassar. (2022). Applications of Nanoparticles in Energy and the Environment: Enhanced Oil Upgrading and Recovery and Cleaning up Energy Effluents, 169-267.
- Meza-Estrada, C. E. & Rodríguez-Potes, L. M. (2018). La construcción sostenible frente a la mitigación del cambio climático. *Módulo Arquitectura CUC*, 21, 9-22.
- Mendes, T. M., Hotza, D., & Repette, W. L. (2015). Nanoparticles in cement based materials: A review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 40(1), 89-96.
- Muon Ray. (2012, 23 agosto). Richard Feynman «Tiny Machines» Nanotechnology Lecture - aka «There's Plenty of Room at the Bottom». YouTube.
- Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., Collins, F., Li, D., Duan, W. H. & Wang, M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 58, 140-147.
- Restrepo Isaza, D. (2017). Ejercicio del control de la actividad constructora en Medellín. El caso Space (Doctoral dissertation). Universidad EAFIT.
- Rodríguez Cheda, J. B. (2013, April 17). Nanosilice. Slideshare. Retrieved November 15, 2022.
- Salata, O. (2004). Applications of nanoparticles in biology and medicine. *Journal of Nanobiotechnology*, 2, 3.
- Stefanidou, M. & Papayianni, I. (2012). Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. *Composites Part B: Engineering*, 43(6), 2706-2710.
- Tobón, J. I., Restrepo, O. J. & Payá, J. J. (2007). Adición de nanopartículas al cemento Portland. *Dyna*, 74(152), 277-291.
- Tobón, J. I. & Medina, A. M. (2010). Evaluación del desempeño del cemento Portland tipo III adicionado con nanopartículas de hierro. Memoria de tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.

Vilela Rocha, V. & Ludvig, P. (2020). Influence of carbon nanotubes on the mechanical behavior and porosity of cement pastes prepared by a dispersion on cement particles in isopropanol suspension. *Materials*, 13(14), 3164.

¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto? | CEMEX Perú. (2019).