

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



**Comportamiento físico y mecánico de concreto $F'c=500$ kg/cm² con
nanoplaquetas de grafeno y ondas ultrasónicas**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**

AUTOR

Kevin Paul Guevara Rimarachin

ASESOR

Angel Antonio Ruiz Pico

<https://orcid.org/0000-0003-2638-0593>

Chiclayo, 2023

PRUEBA DE TURNITIN

INFORME DE ORIGINALIDAD

21 %	20 %	12 %	11 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	3 %
2	opencivilengineeringjournal.com Fuente de Internet	2 %
3	www.deepdyve.com Fuente de Internet	1 %
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1 %
5	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1 %
6	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	1 %
7	Abhilash Mukherjee, Deepmala, Prateek Srivastava, Jasminder Kaur Sandhu. "Application of smart materials in civil engineering: A review", Materials Today: Proceedings, 2021 Publicación	1 %

Índice

Resumen	4
Abstract	5
Introducción.....	6
Metodología.....	11
Materiales.....	11
Dispersión de Nanoplaquetas de grafeno (NPG).....	13
Diseño de Mezcla	14
Elaboración de los especímenes de concreto.....	15
Resultados y discusión	16
Dispersión de Nanoplaquetas de Grafeno (NPG).....	16
Propiedades físicas en estado fresco	17
Densidad	17
Asentamiento.....	17
Temperatura	18
Propiedades físicas en estado endurecido	19
Densidad	19
Absorción	20
Vacíos.....	20
Propiedades mecánicas	21
Resistencia a la compresión.....	21
Resistencia a la flexión.....	21
Resistencia a la flexión	23
Conclusiones	24
Referencias.....	26

Resumen

El crecimiento poblacional ha generado necesidades en infraestructura, como vivienda y transporte, lo que ha impulsado el uso de concreto de alta resistencia reduciendo el tiempo de desencofrado. Aunque existen opciones en el mercado como aditivos, fibras y materiales puzolánicos para mejorar la calidad del concreto, su uso puede tener consecuencias negativas como pérdidas económicas, controles de calidad exhaustivos y sobreexplotación de recursos naturales. Esta investigación evalúa si la adición de nanoplaquetas de grafeno (NPG) en porcentajes de 0.27% y 0.33% mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto y facilita su elaboración mediante la aplicación de ondas ultrasónicas. Los resultados mostraron que la dosificación más efectiva fue del 0.27% de nanoplaquetas de grafeno (NPG), y que su adición mejora las propiedades mecánicas y físicas del concreto.

Palabras clave: Concreto; concreto de alta Resistencia; nanotecnología; nanoplaquetas de grafeno; ondas ultrasónicas.

Abstract

The population growth has led to infrastructure needs such as housing and transportation, which has driven the use of high-strength concrete to reduce formwork stripping time. Although options exist in the market such as additives, fibers, and pozzolanic materials to improve concrete quality, their use can have negative consequences such as economic losses, rigorous quality controls, and overexploitation of natural resources. This research evaluates whether the addition of graphene nanoplatelets (GNP) at percentages of 0.27% and 0.33% enhances the physical and mechanical properties of concrete and facilitates its production through the application of ultrasonic waves. The results demonstrated that the most effective dosage was 0.27% of graphene nanoplatelets (GNP), and their addition improves the mechanical and physical properties of concrete.

Keywords: Concrete, high-strength concrete; nanotechnology; graphene nanoplatelets; ultrasonic waves.

Introducción

El concreto puede presentar múltiples deficiencias debido a los materiales que lo componen. Es un material complejo cuya calidad depende de ciertas variables asociadas a su composición [1]. La industria del concreto ha innovado diferentes tipos de soluciones mediante la combinación de las variables principales que delimitan sus propiedades, entre ellas el uso de aditivos, fibras o materiales con actividad puzolánica [2]. Estos constituyentes pretenden mejorar algunas propiedades del concreto en estado endurecido como la resistencia a compresión, flexión y tracción, y en estado fresco la trabajabilidad y la exudación. Además de mejorar dichas propiedades, se busca reducir los costos en la fabricación tanto por sus constituyentes como en los procesos de constitución o de control de calidad.

El presente artículo de investigación contribuye en la generación de conocimiento por medio de la aplicación de nanotecnología en el desarrollo de materiales y sus aplicaciones. En particular, supone una evolución en el desarrollo de concreto de altas prestaciones [3]. La industria de la construcción está teniendo un crecimiento importante a nivel internacional debido al crecimiento de la población y al aumento del poder adquisitivo. Esto implica un incremento de las necesidades sociales en todos los ámbitos como en el ámbito de vivienda o del transporte. Se requieren concretos que alcancen las resistencias de diseño en menor tiempo para reducir el período de construcción. Además, estos concretos deben garantizar las prestaciones y durabilidad que permitan edificar construcciones en altura reduciendo las secciones de los elementos estructurales para aprovechar los espacios así sucede en las superestructuras, por ejemplo, o los puentes de grandes luces con apoyos seguros y alejados del curso de los ríos [4]. Teniendo en cuenta dichas necesidades de infraestructura, los concretos de alta resistencia aparecen como una solución eficaz. Este tipo de concreto contribuye en la reducción de inversiones económicas debido a: (1) la optimización en el requerimiento de cemento y de acero para estructuras armadas, (2) se reducen los controles de calidad, (3) se reducen los vertederos de construcción producto de demoliciones a edad temprana o por término de la vida útil de una infraestructura [5]. Además del ámbito económico, la introducción de la nanotecnología en la construcción deriva en la disminución de las emisiones producto de la sobre explotación de los recursos naturales para la producción de cemento [6]. Por su parte, el mercado del grafeno proyecta un crecimiento del 38.5% para el periodo 2018-2024. Los países europeos y asiáticos dominan este mercado debido al gran presupuesto destinado a la investigación. En consecuencia, los costos de producción de este producto han disminuido progresivamente, por lo cual resulta cada día más sostenible, industrializable y aplicable en

fabricación de materiales que anteriormente resultaban inviables por las elevadas inversiones económicas.

Entre los diversos estudios sobre nanotecnología, los más comunes estudian el campo del grafeno, en particular los nanotubos. Sin embargo, recientemente se han publicado investigaciones en el campo de las NPG.

Yee K., Ghayesh M [7], destaca en su revisión que el uso de NPG se ha popularizado debido a su fácil y económica fabricación en comparación con los nanotubos de grafeno. Las NPG son una mezcla de monocapa de grafeno, multicapa (2-10 capas) y grafito nanoestructurado, lo que las convierte en un híbrido entre el grafito y el grafeno. En su estudio, se encontró que agregar una pequeña cantidad de NPG a diferentes materiales de matriz mejora la mecánica de estructuras de vigas, placas y láminas, reduciendo las deflexiones dinámicas y de flexión y aumentando los valores de carga de pandeo. Sin embargo, el comportamiento mecánico está influenciado por la geometría y el número de capas de las NPG. Se comprobó que un área de superficie más grande y con menos láminas de grafeno de una sola capa es más beneficioso. El grosor de la nanoplaquetas es el mayor contribuyente en las propiedades físicas y mecánicas. Aunque la adición de NPG parece ser favorable en general, los análisis experimentales demostraron que un mayor aumento en la cantidad de NPG puede degradar la estructura con respecto de otra con menor cantidad o incluso sin adición de nano placas debido a la aglomeración de las mismas en la estructura compuesta por la dispersión no uniforme. Además, la dispersión depende en gran medida de la fracción en peso de NPG utilizada, así como la duración del procedimiento de fabricación, las geometrías y el material de matriz de las NPG.

Por otro lado, Jiang Z., Sevim O, Ozbulut O. [8] profundizan en el estudio de los efectos de las NPG sobre las propiedades mecánicas de los compuestos cementosos con agregados gruesos. En la investigación se evaluaron 6 tipos de dispersión para las concentraciones de NPG que varían entre 0,025% y el 0,10% en peso del cemento. Se utilizó una técnica húmeda de dispersión que emplea una mezcla de alto cizallamiento y superplastificante a base de policarboxilatos en agua, junto con ultrasonidos con una potencia de 240W y una frecuencia de sonda de 10kHz. La primera muestra se sometió a 30 minutos de cizallamiento, la segunda a 60 minutos de cizallamiento y la tercera a 90 minutos de cizallamiento. Las muestras cuarta, quinta y sexta se sometieron al mismo tiempo de cizallamiento, pero con la adición de 15 minutos de ultrasonidos en cada una. Se concluyó que el uso de ultrasonidos junto con la mezcla de alto cizallamiento da lugar a láminas de grafeno de tamaño más pequeño, siendo más importante la aplicación de ultrasonidos para reducir el tamaño de las escamas. A pesar que ninguno de los dos métodos generó defectos en las láminas, estos tampoco llegaron a exfoliar las NPG en

menos capas. Asimismo, se concluyó que cuando se agregan NPG a la mezcla de hormigón en una dosis de 0,025%, se produce un aumento máximo del 17% en la resistencia a la compresión, mientras que no se observa un efecto significativo de los GNP en la resistencia a la flexión, pudiendo notar además que dosificaciones más altas dan como resultado una disminución en la resistencia.

Por su parte, Du H., Pang S. [9] investigaron la dispersión y estabilidad de las nanoplaquetas de grafeno en agua y su influencia en los compuestos de cemento. Para ello, se modificaron las dosis de dispersante y el tiempo de aplicación de ultrasonidos, mediante una medición cuantitativa de la absorbancia de luz a lo largo del tiempo, concluyeron que con 1 hora de sonicación y un 15% de dispersante con una proporción de 1% de NPG se mantiene estable durante 6 horas. Cabe destacar que la potencia de salida en el procesamiento fue de 210W con una frecuencia de 20kHz, debido a que una sonicación más prolongada produce resultados marginales y cambio en las propiedades físicas de las NPG entre otros. Asimismo, se reflejó que el refuerzo de las nano partículas se obtuvo mediante la unión física, obteniendo la duplicación de dureza, y este resultado concuerda con lo obtenido por los investigadores mediante las pruebas de intrusión de mercurio, ya que en la concentración de 1% de NPG se alcanzaron reducciones del 37% y el 30% en la porosidad efectiva y el diámetro crítico de los poros, respectivamente.

Papanikolaou I., Ribeiro de Souza L, Litina C., Al-Tabbaa A. [10] también estudiaron la dispersión de las nanoplaquetas en materiales compuestos de cemento, usando diferentes tratamientos superplastificantes, tales como lignosulfonato, naftaleno y dos policarboxilatos junto con ultrasonidos. La caracterización de NPG se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA) y análisis de difracción de rayos X (XRD). El efecto de los superplastificantes en la dispersión se midió con la potencial zeta, mientras que la espectroscopía UV-Vis se utilizó para examinar el efecto de la dosis de superplastificante. Los resultados demostraron que el tratamiento mecánico aislado mediante ultrasonidos en un medio acuoso era insuficiente para dispersarlas homogéneamente. También se observó que los superplastificantes a base de lignosulfonato y naftaleno que funcionan por repulsión electrostática, no son suficientes para lograr una dispersión homogénea y estable. En cambio, los superplastificantes a base de policarboxilato, que actúan mediante un mecanismo de impedimento estérico, resultaron más eficaces. La investigación pudo demostrar que los policarboxilatos son mejores para mantener la fluidez de la pasta de cemento bajo los efectos del aumento en las concentraciones de NPG.

Un estudio realizado por Ismail F. y su equipo [11] evaluó el comportamiento de un concreto de alto desempeño con nanoplaquetas de grafeno (NPG) en condiciones de curado ambiental. Se utilizaron diferentes dosis de NPG, desde 0.02% hasta 0.50% en peso del cemento, y se evaluaron las propiedades mecánicas del concreto a diferentes tiempos de madurez (3, 7, 28, 56 y 90 días). Durante la primera fase del estudio se analizó el comportamiento de hidratación de las NPG y del concreto mediante espectroscopia infrarroja transformada de Fourier. Los resultados mostraron que la adición de NPG aumentó el grado de carbonización, pero no se desarrollaron nuevas fases cristalinas. Se encontró que el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, la tracción directa, la flexión, la tenacidad a la flexión y el índice de ductilidad mejoraron con la adición de hasta un 0.10% de NPG, mientras que las adiciones de 0.30% y 0.50% resultaron en una disminución de estas propiedades. Se observó que la adición de 0.02% de NPG mejoró la resistencia a la compresión, tracción directa, flexión y módulo de elasticidad en un 20.82%, 30.05%, 13.16% y 21.70% respectivamente, a los 28 días. También se mejoró la tenacidad a la flexión y el índice de ductilidad en un 79.9% y 43.10% respectivamente. Además, se encontró que la capacidad de deformación por compresión y tracción mejoró en un 18.22% y 41% respectivamente. Los autores concluyeron que estas mejoras se deben a que las NPG llenaron los poros del concreto, logrando una matriz de concreto más compacta y robusta. En resumen, los resultados sugieren que el curado ambiental con NPG es una alternativa práctica y económica para mejorar las propiedades mecánicas del concreto

En la investigación realizada por Tao J. [12] y su equipo se estudió el efecto de las nanoplaquetas de grafeno (NPG) en los compuestos piezorresistivos a base de cemento, que son materiales autosensibles necesarios para el desarrollo de edificios inteligentes. Se utilizó un método de cuatro sondas para evaluar las propiedades piezorresistivas de los morteros de cemento modificados con NPG. Los resultados indican que la incorporación de NPG puede densificar la microestructura y mejorar las propiedades mecánicas de los morteros. La conductividad eléctrica varía dependiendo del contenido de NPG [12]. Además, se encontró que los mecanismos de reacción piezorresistiva están asociados con la deformación elástica y la conductancia interfacial entre las NPG y la matriz material [12]. El estudio concluye que los hallazgos pueden facilitar el camino en el desarrollo de materiales de construcción piezorresistivos con función de autodetección para su uso en edificios e infraestructuras inteligentes.

En contraste con los estudios mencionados anteriormente, se establece la mejoría del concreto si éste lleva una serie de exámenes, estudios y pruebas. Por ello, el objetivo principal de esta investigación es evaluar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del

concreto $F'_c=500 \text{ kg/cm}^2$ utilizando nanoplaquetas de grafeno con la aplicación de ondas ultrasónicas para facilitar la obtención de concretos de alta resistencia. Para lograr dicho objetivo en la primera parte del estudio se analizaron el tiempo y potencia óptimos para lograr una adecuada dispersión de NPG y en segundo lugar se cuantificó el impacto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con adiciones de NPG de 0.27% y 0.33%.

Se prefiere la narración en tercera persona (Ejemplo: Se realizaron las encuestas, se publicaron resultados, se establecieron parámetros, etc.) y la utilización de conectores los cuales enriquecerán la redacción del texto.

Algunos ejemplos: Sin embargo, puesto que, por consiguiente, dado que, teniendo en cuenta, entonces, simultáneamente, posiblemente, en efecto, ya que, ahora bien, en cambio, en cuanto a, el siguiente punto es, así pues, recapitulando, en conclusión, en pocas palabras, a continuación, con motivo de, a saber, de la misma forma, en síntesis, así, para concluir, luego, resumiendo, de igual manera, al mismo tiempo, probablemente, etc.

Metodología

Materiales

Los materiales usados en la presente investigación cumplieron con los parámetros establecidos por las normas internacionales ASTM.

El cemento utilizado corresponde al Tipo I fabricado mediante molienda de clinker y yeso. Este cemento convencional es aplicable a obras de construcción en general. Presenta una densidad de 3.14 g/cm³, cumpliendo con la norma ASTM C-1157 (2010).

Para el agregado fino se tomaron muestras de dos canteras diferentes. Asimismo, para el agregado grueso se tomaron muestras de tres canteras. Los agregados cumplen con los requisitos granulométricos establecidos por la norma ASTM C-136 (2006) (ver Figuras 1 y 2).

El aditivo utilizado en la mezcla fue un súper plastificante reductor de agua de alto rango de trabajabilidad prolongada a base de policarboxilatos, con una densidad de 1.20 kg/L. Cumple con los requerimientos para super plastificante según la norma ASTM C 494, tipo D y tipo G.

Las nanoplaquetas de grafeno son de capa fina y están compuestas por un contenido de carbón mayor al 99% y contenido de cenizas menor al 1% en peso. Asimismo, en cuanto a su morfología tienen un tamaño lateral en la escala de 1-2 μm , un grosor de 1-6 nm y un tamaño de grano D50 de 56.17 μm aproximadamente. Además, presentan un contenido de humedad menor al 2% en peso y una densidad aparente en el rango de 0.06-0.09 g/cm³ (XFANANO, 2022). Cabe mencionar que todas las características mencionadas se extrajeron de la ficha técnica proporcionada por el fabricante, así como también la caracterización mostrada en la figura 3 dónde se observa una estructura plana y escamosa.

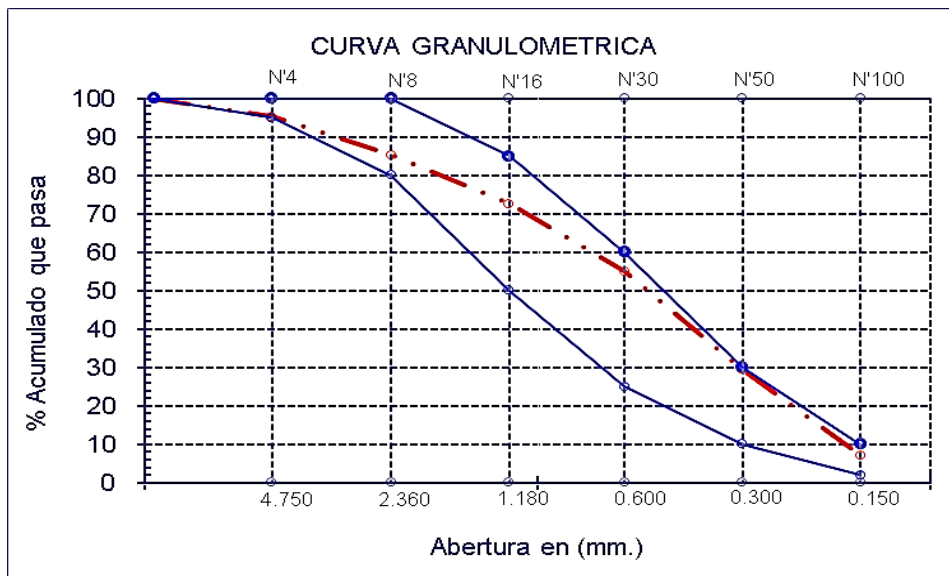


Figura 1. Distribución del tamaño de partículas del agregado fino.

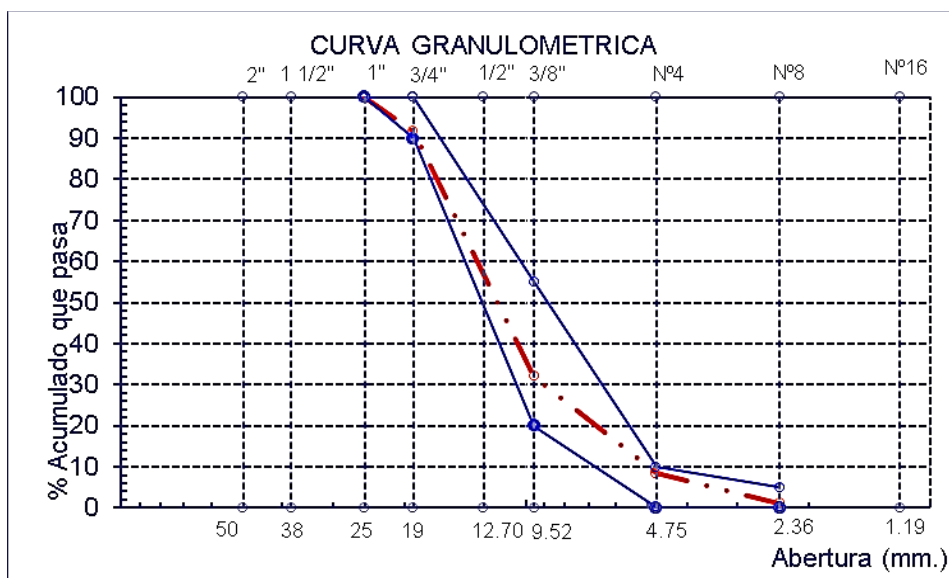
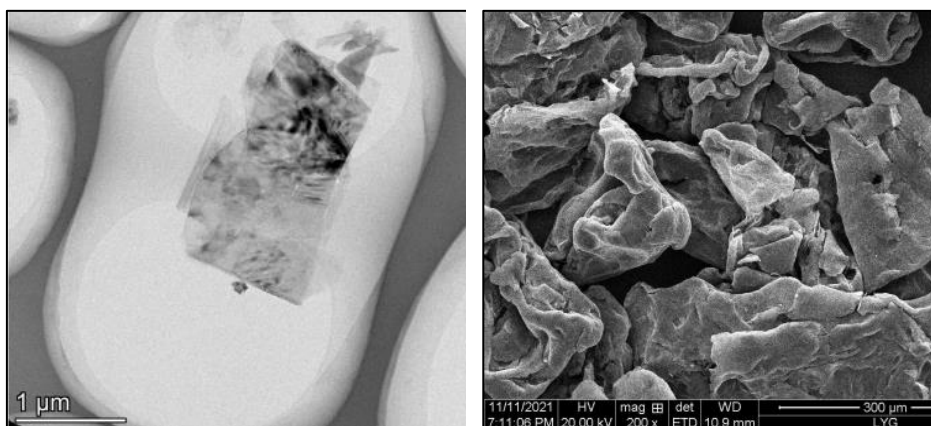


Figura 2. Distribución del tamaño de partículas del agregado grueso.



(a) Medida a 1µm

(b) Medida a 300µm

Figura 3. Cuadro de caracterización con medida a (a) 1µm y (b) 300µm. (XFNANO, 2022).

Dispersión de Nanoplaquetas de grafeno (NPG)

Existe una gran barrera para la incorporación de nanomateriales a base de carbono a compuestos cementantes, esto debido a la alta energía superficial y a las fuertes fuerzas de Van der Waal combinadas con la naturaleza hidrofóbica de las NPG [13], por lo que resulta difícil obtener una suspensión homogénea. Para abordar este problema en la presente investigación se propone una metodología de dispersión que busca evitar la aglomeración y la distribución desigual de las propiedades, para ello existen diferentes métodos físicos, como ultrasonidos, mezcla de alto cizallamiento y molienda de bolas, así como métodos químicos como funcionalización covalente y no covalente. A continuación, se detalla el proceso seguido con el método de ultrasonidos.

Se realizaron ensayos para determinar el tiempo y potencia óptimos de dispersión en agua, para asegurar uniformidad en la mezcla y evitar la aglomeración debido a sus propiedades electrostáticas. Para ello se realizaron 3 muestreos con los siguientes tiempos de dispersión: 20, 40 y 60 minutos (muestras M-20', M-40', M60', respectivamente). Asimismo, se optó por una potencia de 120W de aplicación constante, equivalente a la potencia media de la máquina.

En el procedimiento se optó por utilizar agua a una temperatura ambiente de 23°C, simulando condiciones reales de obra. Además, la proporción utilizada para las pruebas corresponde a 5g de NPG por 400 mL de agua, colocados en un vaso de precipitación.

La metodología aplicada para la elección de la muestra más óptima es cualitativa, y constó de fotografías tomadas al finalizar la dispersión, mediante la colocación del vaso de precipitación a contraluz. De esta manera se pudo medir de forma constante el porcentaje de aglomeración en un tiempo transcurrido de una, dos y tres horas, para finalmente realizar una última medición en un tiempo transcurrido de 12 horas. En las figuras 4, 5 y 6 se puede observar las 3 muestras registradas.

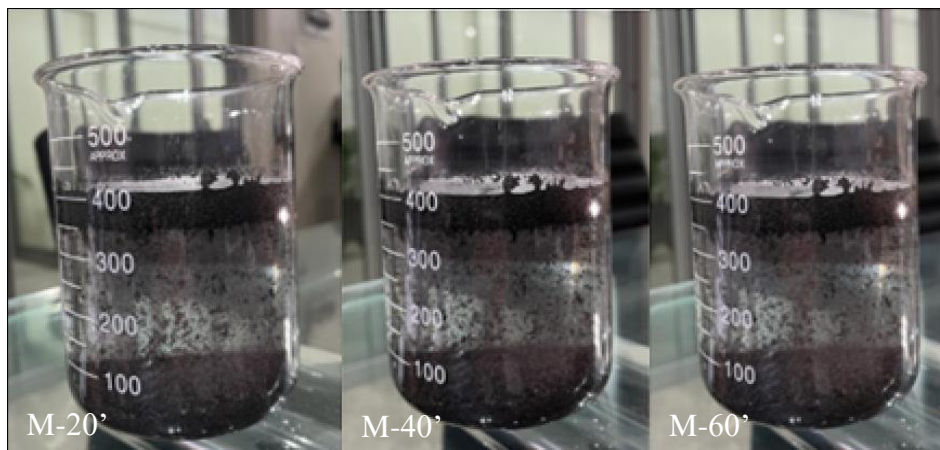


Figura 4. Muestras en reposo pre inicio de dispersión.

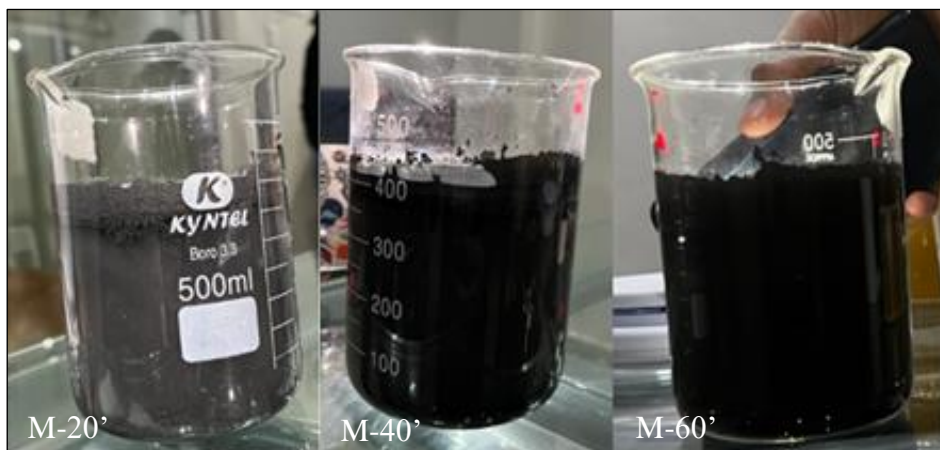


Figura 5. Muestras después de su respectivo tiempo de dispersión, recién retiradas de la máquina.

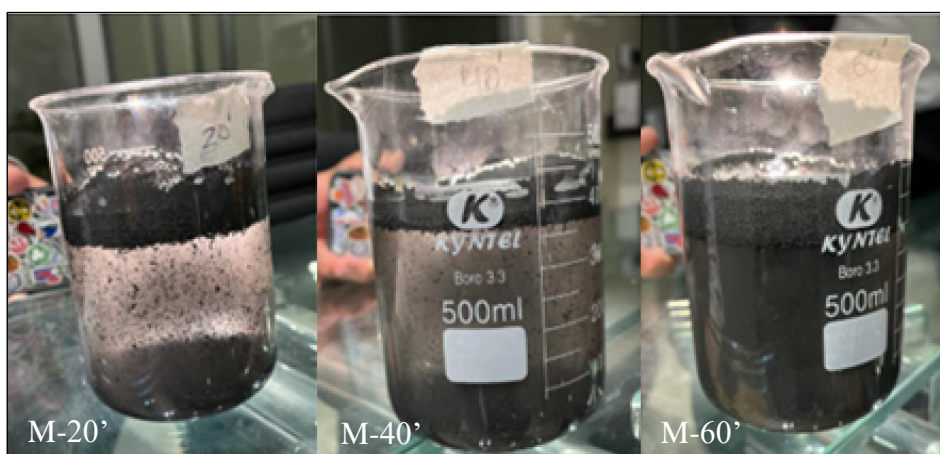


Figura 6. Muestras después una hora en reposo, tras dispersión.

Pese a que el procedimiento realizado nos permite tener una medida cualitativa, se debe medir el cambio de la densidad óptica de las muestras mediante un espectro de absorbancia con un espectrofotómetro UV-vis para exhibir una relación lineal con la concentración de partículas en la solución a lo largo del tiempo [14].

Diseño de Mezcla

El diseño de mezcla se realizó con el método semi empírico propuesto por el ACI 211.4 para concretos de peso normal y de una resistencia entre 450 kg/cm² y 840 kg/cm², buscando la trabajabilidad y consistencia en estado fresco, así como la resistencia y durabilidad en estado endurecido.

En cuanto al procedimiento se ha establecido un slump de entrada para mezclas con superplastificante de 2", y una dosificación de aditivo superplastificante de 1.65% del peso del

cemento. Finalmente, la dosificación final se obtuvo tras un reajuste con datos de las pruebas iniciales de mezclado.

El uso de un aditivo superplastificante de este tipo requiere de numerosos ensayos para obtener la mezcla deseada, debido a que las variables para el diseño de mezcla de un concreto de alta resistencia son diferentes. En un diseño de mezcla de concreto de resistencia convencional, el contenido óptimo de agregado grueso está en función del módulo de fineza y el tamaño máximo nominal. Sin embargo, en concretos de alta resistencia, debido al alto contenido de material cementante no dependiente del agregado fino la obtención de lubricación y compactibilidad de la mezcla. Finalmente, para estimar el agua de mezcla las nuevas variables que intervienen son: (1) el tamaño máximo nominal, (2) la forma de las partículas, (3) la gradación del agregado, (4) la cantidad de cemento y en mayor medida (5) el tipo de plastificante o superplastificante. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las cantidades utilizadas en cada constituyente que formó parte de las mezclas de concreto.

Tabla 1.

Diseño de mezcla por m³ de concreto con adición de 0.27% y 0.33% de NPG.

Materiales (kg/m ³)	f'c 500 kg/cm ²		
	Patrón	+0.27% NPG	+0.33% NPG
Cemento	464.60	464.60	464.60
Agua	208.96	208.96	208.96
Agregado Fino	777.88	777.88	777.88
Agregado Grueso	948.86	948.86	948.86
Aditivo	6.39	6.39	6.39
NPG	0.00	1.25	1.53

Elaboración de los especímenes de concreto

En la elaboración de los especímenes de concreto que se elaboraron para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas, el procedimiento de mezcla comenzó midiendo la temperatura de los materiales, así como la humedad mediante un medidor tipo Speedy, con el fin de realizar la corrección de la cantidad de agregado fino a colocar en la mezcladora de concreto tipo trompo. Seguidamente para el concreto patrón se colocó una primera porción del

agua de mezcla en la mezcladora previamente humedecida. Posteriormente, se colocó el agregado grueso y se removió durante 30 segundos para posteriormente agregar la arena y cemento. En la segunda y última parte de agua de mezcla se colocó el aditivo superplastificante, una vez disuelto fue vertido inmediatamente al trompo.

Para el ensayo de resistencia a la compresión simple, se utilizaron moldes plásticos de 4"x8" que cumplen con la norma ASTM C-31 y ASTM C470. Asimismo, el procedimiento de ensayo siguió los lineamientos facilitados en la norma ASTM C39. En cuanto al ensayo de resistencia a la flexión, se usaron moldes de vigas metálicos de 6"x6"x21" conforme con la norma ASTM C78, así como también se siguieron los lineamientos para el ensayo dados por la norma indicada anteriormente.

En cuanto a las propiedades físicas del concreto en estado fresco, el procedimiento de ensayo de densidad, asentamiento y temperatura se rigieron bajo las normas ASTM C138, ASTM C143 y ASTM C1064 respectivamente. Para las propiedades físicas del concreto en estado endurecido, la densidad, absorción y porcentaje de vacíos los procedimientos estuvieron bajo los lineamientos de la norma ASTM C642.

Resultados y discusión

Dispersión de Nanoplaquetas de Grafeno (NPG)

Los ensayos de dispersión para las muestras M-20', M-40' y M-60' mostraron que la muestra M-60' tarda más tiempo en aglomerarse, para una potencia de 120W.

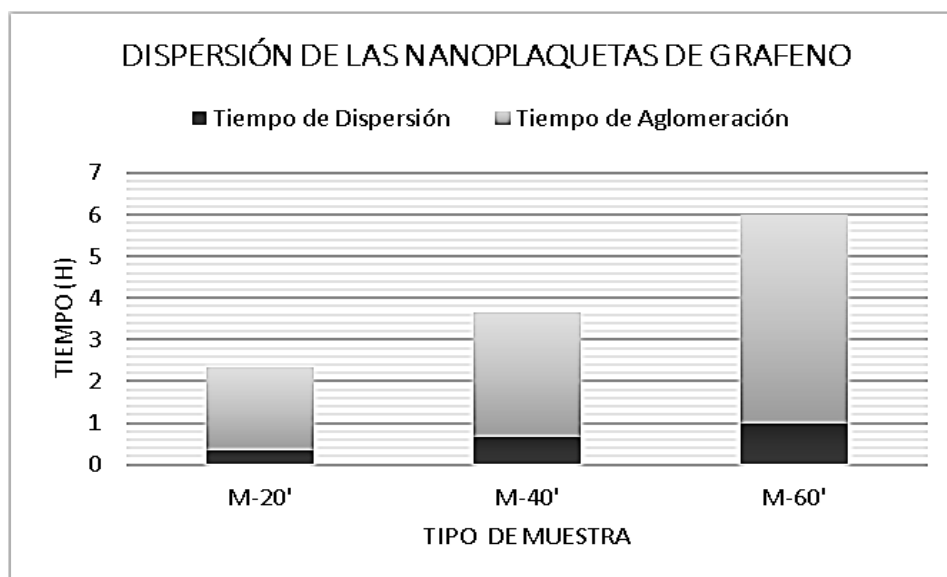


Figura 7. Gráfico de dispersión y tiempo de aglomeración de las NPG.

La muestra M-60', fue elegida para el desarrollo de los ensayos ya que resulta más beneficiosa para el concreto puesto que asegura que las NPG se podrán mezclar uniformemente con los demás materiales, manteniendo su condición dispersa durante el proceso de vaciado y endurecimiento. Esta decisión es contrastable con los resultados obtenidos en [9], ya que en dicha investigación se optó por el mismo tiempo de aplicación de 1 hora de aplicación de ondas ultrasónicas con una potencia de 210W.

Se seleccionó una potencia de 120W para evitar cambios en la morfología de las NPG. Aunque se logró una dispersión uniforme en agua, la eficacia para crear enlaces fuertes entre las partículas de cemento hidratado y las NPG y prevenir aglomeraciones en un ambiente cementoso fue limitada [9]. Se requieren estudios con equipo especial para ver a escala micro la forma adecuada de generar dichos enlaces.

Propiedades físicas en estado fresco

Densidad

Los resultados del ensayo de densidad para el concreto patrón y adicionado con NPG mostraron que para una adición de 0.27% de NPG este valor disminuye a 2596.1 kg/m³ respecto al patrón de 2640.0 kg/m³. Para la adición de 0.33% de NPG, el valor de densidad obtenido es intermedio y corresponde a 2615.6 kg/m³ (ver Figura 8).

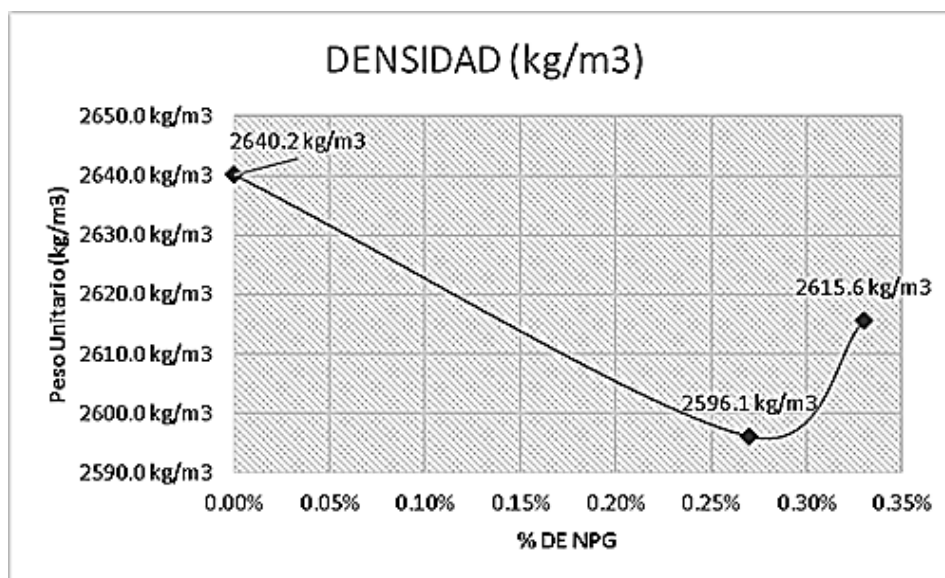


Figura 8. Gráfico de densidad obtenida para concreto patrón y adicionado con NPG.

Asentamiento

Los resultados del ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams mostraron que, para el concreto patrón, la adición del aditivo superplastificante en un porcentaje de 1.65% sobre el peso del cemento proporcionó un aumento de 1.5" sobre el slump de diseño de 2". Para la adición de 0.27% de NPG el aumento del slump fue considerablemente alto respecto al concreto patrón, debido a que se obtuvo un slump de 7.9". Por otra parte, la adición de 0.33% de NPG redujo sensiblemente el slump respecto de la adición de 0.27%, alcanzando un valor de 7.6". En general, se observa que la interacción entre el aditivo superplastificante y las NPG aumenta la fluidez del concreto de forma considerable.

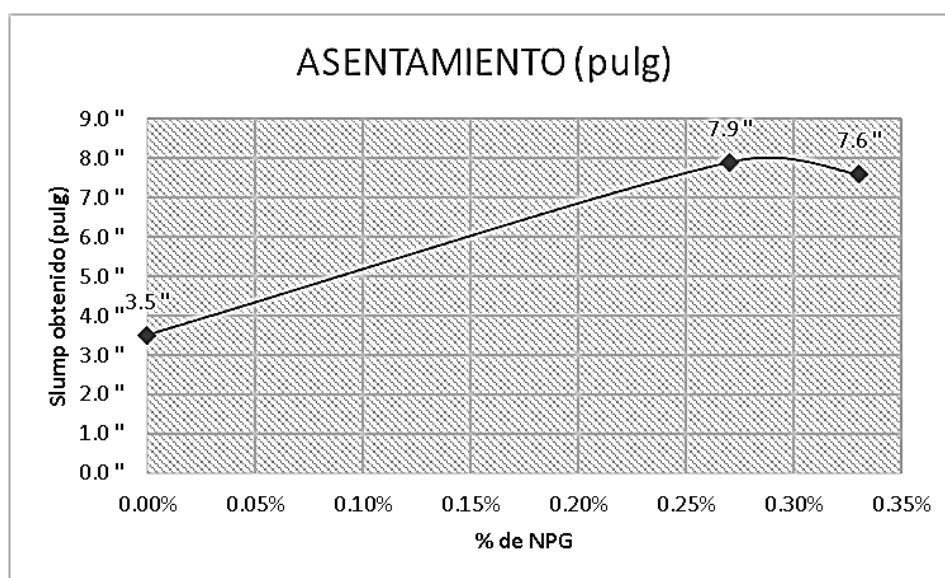


Figura 9. Gráfico de asentamiento en pulgadas, obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

La trabajabilidad obtenida en la pasta de cemento se debe al fenómeno de auto lubricación logrado durante la dispersión de las NPG [15]. Sin embargo, al compararla con otro material de la misma categoría, como los nanotubos de carbono (NTC), la dispersión de estos últimos por encima de una cierta relación de esfuerzo puede reducir significativamente la trabajabilidad de la pasta de cemento debido al enredo de los mismos [16].

Temperatura

En los resultados del ensayo de medición de temperatura para el concreto patrón y con adición de NPG no se observan cambios significativos ni alteración más que las producidas por la temperatura ambiente propias del entorno. Esto se puede deber, además, a que las NPG fueron dispersadas a la misma temperatura ambiente (ver Figura 10).

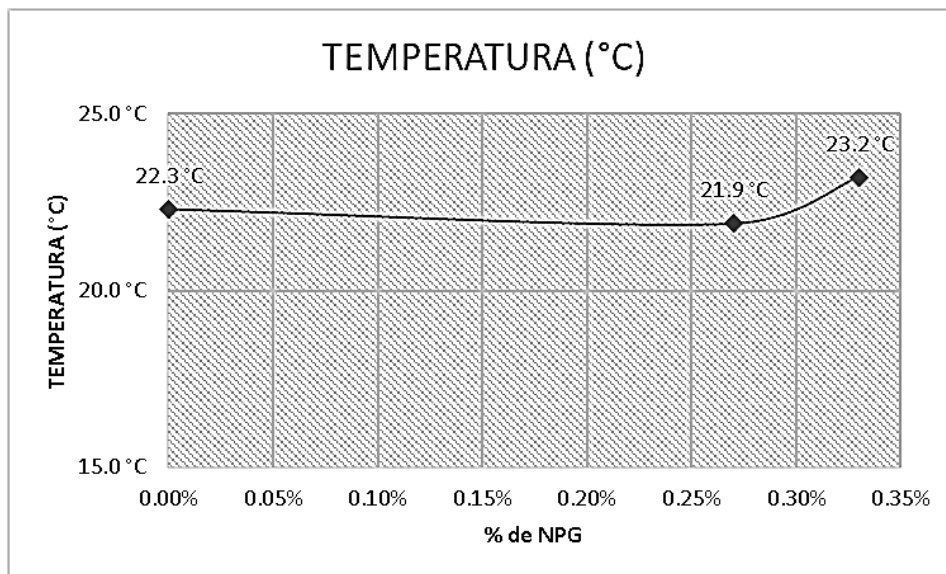


Figura 10. Gráfico de temperatura en °C, obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

Propiedades físicas en estado endurecido

Densidad

Los resultados del ensayo de densidad para un concreto con madurez de 28 días mostraron que existe un aumento en la densidad de 60 kg/m³ en la adición de 0.27% de NPG con respecto al concreto patrón. Sin embargo, la adición de 0.33% de NPG tiene un aumento menor con 36 kg/m³, siendo aproximadamente la mitad de lo obtenido por la primera adición (ver Figura 11).

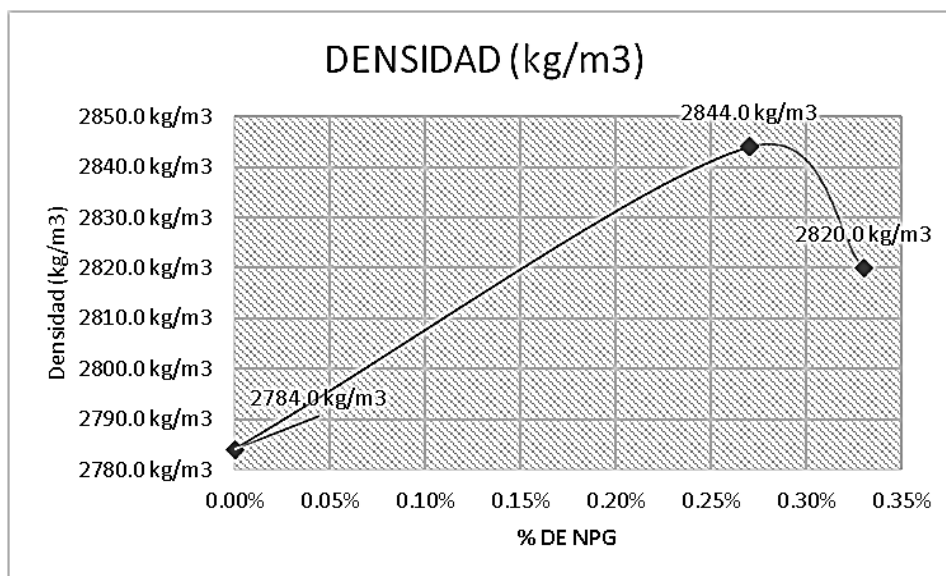


Figura 11. Gráfico de densidad en kg/m³, obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

Absorción

Los resultados del ensayo de absorción de agua mostraron que el concreto con adición de 0.27% de NPG presenta el menor porcentaje de absorción con un valor de 1.80%, seguido de la muestra con adición de 0.33% de NPG con 2.64% de absorción. Los dos valores de absorción de agua obtenidos con adición de NPG son menores al valor medido en concreto patrón que tiene un valor de 3.96% (ver Figura 12).

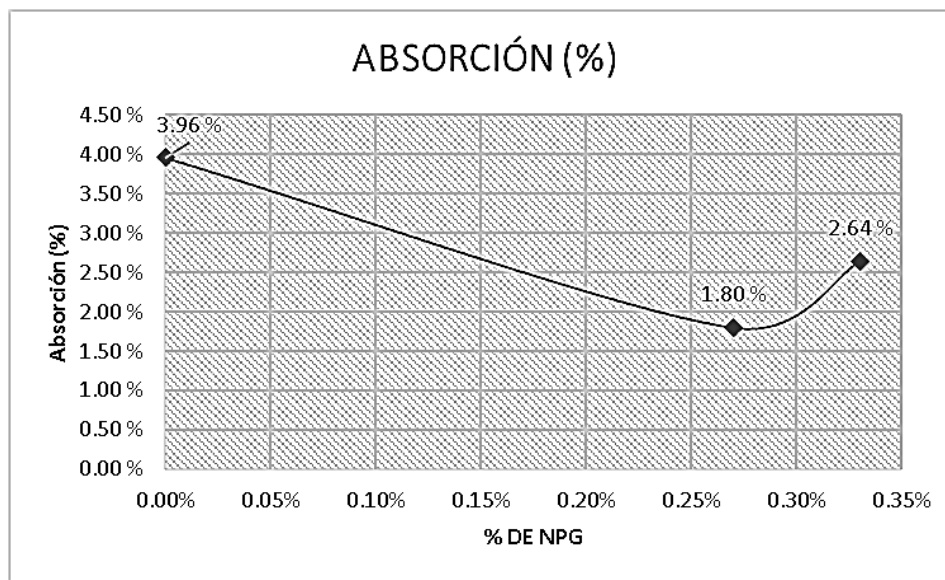


Figura 12. Gráfico de absorción en porcentaje, obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

Vacíos

Los resultados del ensayo de porcentaje de vacíos mostraron que el concreto con adición de 0.27% de NPG presenta el menor porcentaje de vacíos con un valor de 4.32%, seguido de la muestra con adición de 0.33% de NPG que cuenta con 6.24%. Ambos valores obtenidos son menores al medido en el concreto patrón que tiene un valor de 9.24% (ver Figura 13).

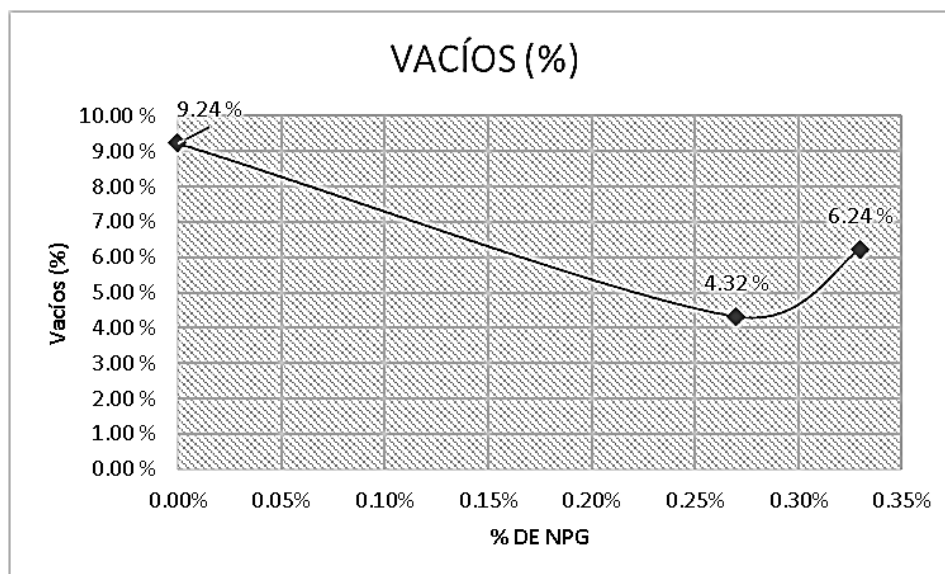


Figura 13. Gráfico de vacíos en porcentaje, obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

Realizando un contraste con [9], el porcentaje de vacíos en dicha investigación se redujo a valores de 37% para una adición de 1% de NPG. En la presente investigación, el porcentaje de vacíos disminuyó en un 46.75% para una adición de 0.27% de NPG con respecto al concreto patrón. Esto demuestra que mayores proporciones de NPG, no garantizan mejores resultados, debido a las diferentes variables que participan en la interacción y obtención de enlaces.

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión mostraron que para una adición de 0.27% de NPG el concreto presenta el mayor aumento de resistencia con una diferencia de 50.39 kg/cm² que representa un 10.03% sobre el concreto patrón. Sin embargo, el concreto con una adición de 0.33% de NPG presentó un aumento tan solo de 8.53 kg/cm² que representa un 1.70% sobre el concreto patrón, resultando en una mejora poco significativa (ver Figura 14).

En el desarrollo de la resistencia a la compresión, el concreto patrón alcanzó un 100.36% de la resistencia de diseño, así mismo, se puede observar que el 0.27% de NPG alcanza el mayor desarrollo con un valor de 110.44% seguido de la adición de 0.33% de NPG con un desarrollo de 102.06% de NPG (ver Figura 15).

Resistencia a la flexión

Como se puede observar en las Figuras 11, 12 y 13 las tres propiedades están directamente relacionadas. A una mayor densidad del concreto en estado endurecido, menor porcentaje de vacíos y menor absorción de agua.

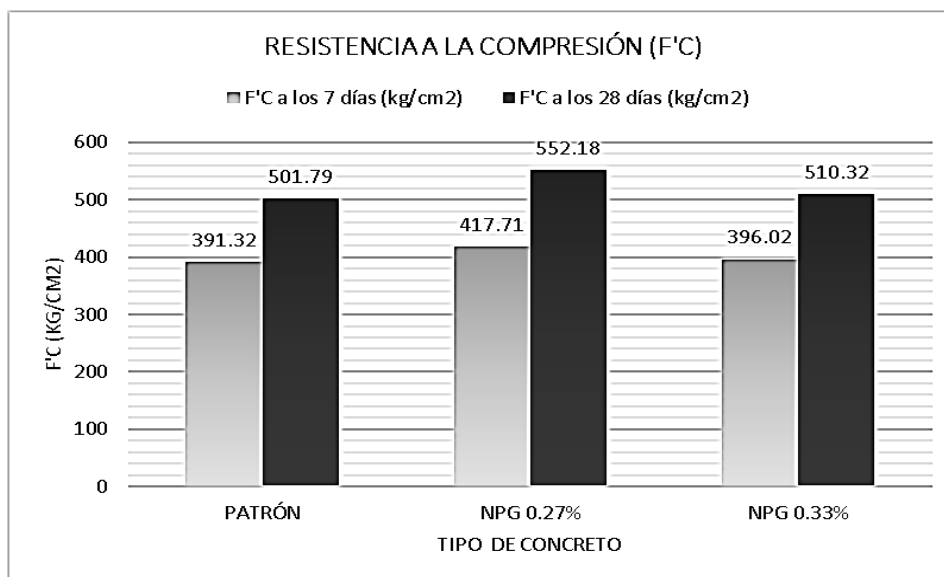


Figura 14. Gráfico de resistencia a la compresión en kg/cm², obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

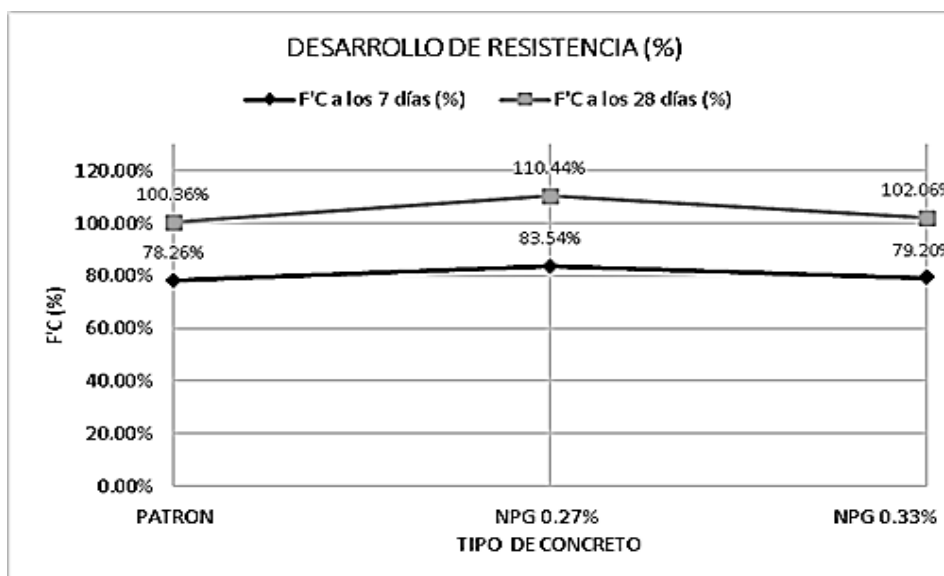


Figura 15. Desarrollo de resistencia en %, obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

Aunque la mejora en la resistencia a la compresión y flexión coincide con resultados previos que lograron un aumento máximo del 17% en resistencia a la compresión [8], en la presente investigación se obtuvo tan solo un aumento del 10.03% en el mismo ensayo. Esto puede deberse a que en la presente investigación el superplastificante se agregó directamente a la

mezcla, lo que afectó la uniformidad de la dispersión. Asimismo, no se utilizó un proceso adicional como la mezcla de alto cizallamiento. Además, si se realiza un contraste con [9], la potencia recomendada de ultrasonidos es de 210W y 300W con un pulso al 70%, en la presente investigación se usó 120W continuos, lo cual es menor, y por tanto cabe esperar una menor uniformidad en la mezcla.

Cómo se observa en los resultados de la presente investigación, y en contraste con los estudios mencionados no se observa ningún efecto significativo sobre las propiedades mecánicas del concreto, sin embargo, Dimov D.[17] en su investigación informó un aumento del 146% en la resistencia a la compresión y 79.5 % en la resistencia a la flexión, utilizando NPG con un tamaño lateral mayor a 2 μm , con un grosor promedio entre 8 y 15 μm y un área superficial entre 500 y 700 m^2/g , para dichos resultados utilizó una dispersión con dos horas de alzo cizallamiento a 5000 rpm para luego ser incorporado en la mezcla de concreto. Así mismo, se observó una disminución en la permeabilidad del agua en un 400%, que da como resultado un valor ideal para construcciones sujetas a inundaciones, la dosificación utilizada fue de 0.7g de NPG por cada 1 litro de agua de mezcla, que corresponde al 0.04% en peso de cemento. Si realizamos un contraste con los materiales y procedimientos utilizados en la presente investigación y lo comparamos con [17], las nanoplaquetas usadas tienen un tamaño lateral variable, mientras que en la investigación revisada tienen un tamaño lateral uniforme de 2 μm , además de ello el grosor es menor con una diferencia de escala importante con un valor entre 8 y 15 μm , a diferencia de la presente investigación donde tenemos un valor de 1-6 nm.

Evaluando los resultados de la presente investigación y las discusiones anteriores, se puede notar que entre los estudios revisados existen aumentos limitados o nulos [8], así como muy altos [17], y la diferencia entre los resultados se puede deber a las propiedades o características del nanomaterial, así como al procedimiento de dispersión.

Resistencia a la flexión

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión o módulo de rotura (M_r) mostraron que para una adición de 0.27% de NPG el concreto presenta el mayor aumento de resistencia con una diferencia de 4.74 kg/cm^2 que representa un 6.68% sobre el concreto patrón. Sin embargo, el concreto con una adición de 0.33% de NPG presentó un aumento tan solo de 0.96 kg/cm^2 que representa un 1.35% sobre el concreto patrón. A diferencia de los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión, en la resistencia a la flexión para las dos adiciones la mejora es insignificante y muy poco representativa (ver Figuras 16 y 17).

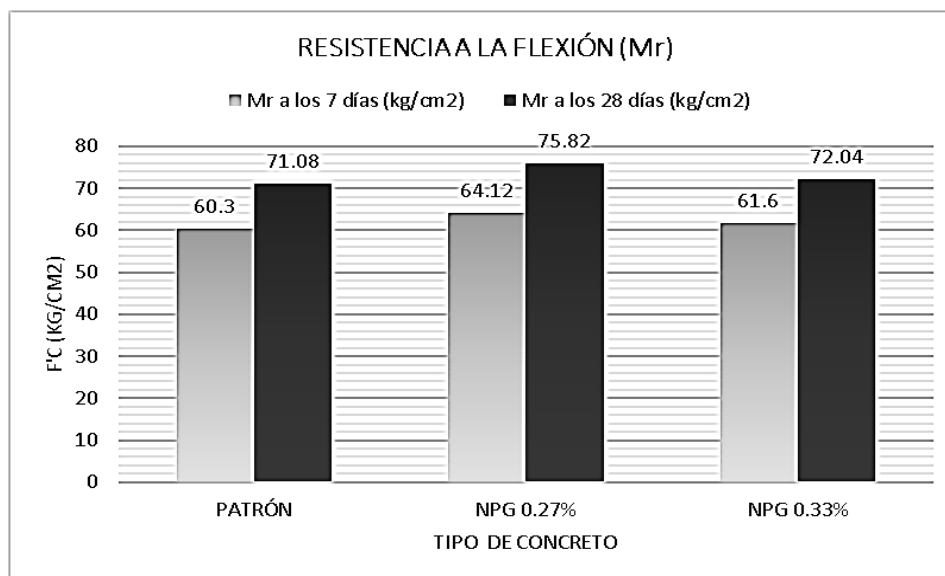


Figura 16. Gráfico de resistencia a la flexión o módulo de rotura en kg/cm², obtenido para concreto patrón y adicionado con NPG.

Tal y como se menciona en [8], la resistencia a la flexión con la adición de NPG no es muy alta a comparación del aumento obtenido en la resistencia a la compresión.

Si comparamos los cambios en las propiedades mecánicas, producto de la adición de NPG con la adición de nanotubos de carbono NTC [16], se observa que ambos nanomateriales dan como resultado una aceleración de la reacción de hidratación, sin embargo, para el refuerzo a flexión como resultado de la relación de aspecto más alta y su estructura cilíndrica que permite unir nanofisuras más fácilmente, los CNT dan como resultado un rendimiento mayor con las NPG.

Conclusiones

Tras realizar el ensayo de dispersión mediante ondas ultrasónicas el tiempo óptimo para conseguir una adecuada dispersión de nanoplaquetas de grafeno fue de 60 minutos para una potencia elegida de 120W. Se recomienda obtener el parámetro de potencia mediante la comparación de la caracterización pre y post aplicación de ondas ultrasónicas con microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los ensayos de resistencia a la compresión mostraron que la adición de 0.27% de NPG presentan como resultado un aumento del 10.03% sobre el concreto patrón, mientras que el 0.33% de NPG tan solo presenta un incremento del 1.70% respecto al concreto patrón. Además, se observó que el concreto patrón alcanzó un valor de resistencia a la compresión del 78.26% a los 7 días y del 100.36% a los 28 días. En contraste, el concreto con una adición de 0.27% de

NPG alcanzó un valor del 83.54% a los 7 días y del 110.44% a los 28 días, mientras que el concreto con una adición de 0.33% de NPG mostró un valor del 79.20% a los 7 días y del 102.06% a los 28 días..

Los ensayos de resistencia a la flexión mostraron que la adición de 0.27% de NPG presentan como resultado un aumento del 6.68% sobre el concreto patrón, mientras que el 0.33% de NPG tan solo incrementa un 1.35%.

En cuanto a las propiedades físicas del concreto, se observó que la adición de NPG aumentó significativamente el asentamiento en estado fresco, alcanzando un máximo de 7.9" para una concentración del 0.27% y de 7.6" para una concentración del 0.33%. Durante los ensayos, la temperatura se mantuvo estable con valores entre 22.3°C y 23.2°C, dependiendo de la temperatura ambiente. En el estado endurecido, se observó que la densidad aumentó con la adición de NPG, llegando a un máximo de 2844.0 kg/m³ para una concentración del 0.27% y de 2820.0 kg/m³ para una concentración del 0.33%. En el ensayo de absorción, se observó una disminución significativa de la absorción con la adición de NPG, alcanzando un mínimo de 1.80% para una concentración del 0.27% y de 2.64% para una concentración del 0.33%. Finalmente, en el ensayo de porcentaje de vacíos, se encontró que la adición de NPG disminuyó significativamente los vacíos, con una reducción del porcentaje de vacíos del 9.24% al 4.32% para una concentración del 0.27% y del 6.24% para una concentración del 0.33%.

Referencias

- [1] U. M. Angst *et al.*, “Present and future durability challenges for reinforced concrete structures,” *Materials and Corrosion*, vol. 63, no. 12, pp. 1047–1051, Dec. 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/maco.201206898>.
- [2] M. Amran, S. S. Huang, A. M. Onaizi, N. Makul, H. S. Abdelgader, and T. Ozbakkaloglu, “Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects,” *Constr Build Mater*, vol. 352, p. 129029, Oct. 2022, doi: [10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129029](https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129029).
- [3] J. Lee, S. Mahendra, and P. J. J. Alvarez, “Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations,” *ACS Nano*, vol. 4, no. 7, pp. 3580–3590, Jul. 2010, doi: [10.1021/nn100866w](https://doi.org/10.1021/nn100866w).
- [4] R. Sharma, J. G. Jang, and P. P. Bansal, “A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high-performance concrete,” *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103314, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103314>.
- [5] K. Janković, D. Bojović, and M. Stojanović, “Influence of nanoparticles on the strength of ultra-high performance concrete,” *Nanotechnology in Eco-efficient Construction: Materials, Processes and Applications*, pp. 13–42, Jan. 2019, doi: [10.1016/B978-0-08-102641-0.00002-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00002-5).
- [6] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, and E. Gartner, “Cement and carbon emissions,” *Mater Struct*, vol. 47, no. 6, pp. 1055–1065, 2014, doi: [10.1617/s11527-013-0114-5](https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5).
- [7] K. Yee and M. H. Ghayesh, “A review on the mechanics of graphene nanoplatelets reinforced structures,” *Int J Eng Sci*, vol. 186, p. 103831, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2023.103831>.
- [8] Z. Jiang, O. Sevim, and O. E. Ozbulut, “Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques,” *Constr Build Mater*, vol. 303, p. 124472, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124472>.
- [9] H. Du and S. D. Pang, “Dispersion and stability of graphene nanoplatelet in water and its influence on cement composites,” *Constr Build Mater*, vol. 167, pp. 403–413, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.046>.
- [10] I. Papanikolaou, L. Ribeiro de Souza, C. Litina, and A. Al-Tabbaa, “Investigation of the dispersion of multi-layer graphene nanoplatelets in cement composites using different

- superplasticiser treatments,” *Constr Build Mater*, vol. 293, p. 123543, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123543>.
- [11] F. I. Ismail *et al.*, “The behavior of graphene-nanoplatelets-based high-performance concrete under ambient curing,” *Structures*, vol. 47, pp. 694–708, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.086>.
- [12] J. Tao, X. Wang, Z. Wang, and Q. Zeng, “Graphene nanoplatelets as an effective additive to tune the microstructures and piezoresistive properties of cement-based composites,” *Constr Build Mater*, vol. 209, pp. 665–678, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.173>.
- [13] E. Shamsaei, F. B. de Souza, X. Yao, E. Benhelal, A. Akbari, and W. Duan, “Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review,” *Constr Build Mater*, vol. 183, pp. 642–660, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.201>.
- [14] J. H. Potgieter and C. A. Strydom, “Determination of the clay index of limestone with methylene blue adsorption using a UV-VIS spectrophotometric method☆☆This paper was originally submitted to Advanced Cement Based Materials. The paper was received by the Editorial Office of Cement and Concrete Research on 17 June 1999 and accepted in final form on 23 July 1999.” *Cem Concr Res*, vol. 29, no. 11, pp. 1815–1817, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00175-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00175-1).
- [15] A. Alatawna *et al.*, “The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites,” *Constr Build Mater*, vol. 232, p. 117141, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117141>.
- [16] M. D. C. Camacho, O. Galao, F. Baeza, E. Zornoza, and P. Garcés, “Mechanical Properties and Durability of CNT Cement Composites,” *Materials*, vol. 7, no. 10.3390/ma7031640, pp. 1640–1651, Feb. 2014.
- [17] D. Dimov *et al.*, “Ultra-high Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications,” *Adv Funct Mater*, vol. 28, no. 23, p. 1705183, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201705183>.