

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO PARA
MEJORAR LAS PROPIEDADES FÍSICO
MECÁNICAS DEL CONCRETO

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. FLORES ORIUNDO, JENIFER PAOLA

Bach. VASQUEZ SALAS, JULIO CESAR

ASESORA: Mg. Ing. CHAVARRÍA REYES, LILIANA JANET

LIMA-PERÚ

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de autor

1. FLORES ORIUNDO, JENIFER PAOLA

DNI

77103662

2. VASQUEZ SALAS, JULIO CESAR

DNI

48347782

Datos de asesor

1. Chavarría Reyes, Liliana Janet

DNI

25481792

Datos del jurado

1. Donayre Córdova, Oscar Eduardo; 06162939; 0000-0002-4778-3789
2. Pereyra Salardi, Enriqueta; 06743824; 0000-0003-2527-3665
3. Delgado Contreras, Genaro Alfredo Jesús; 06621687; 0000-0002-4612-0433
4. Huerta Campos, Carlos Alberto; 09313271; 0000-0003-3758-3126

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732267

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados de mi vida.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y ser quien soy. Tengo el privilegio de ser su orgulloso hijo, son los mejores padres.

A mi hermano Arturo por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindo a lo largo de esta etapa de mi vida.

A Jacob por ser mi hermano quien me cuida desde el cielo

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Julio C. Vásquez Salas.

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser mi fuerza, perseverancia, dedicación y deseo por lograr una de mis metas más deseadas.

A mi padre Héctor Flores por su soporte, sacrificio y amor incondicional, gracias a ti he podido superarme y ser quien soy en la vida, llevaré conmigo siempre el orgullo de ser tu hija, te amo papá.

A mi madre Sonia Oriundo por ser el apoyo y motivación para poder cumplir mis sueños y metas en la vida.

Y a mi abuelito Juan Oriundo que en paz descansa, porque formó parte de este resultado en mi vida, por sus constantes charlas, consejos y amor incondicional.

Jenifer Paola Flores Oriundo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ante todo a dios, a mi madre Ana María Salas Sarmiento, por su amor, su sacrificio inmenso de todos estos años y apoyo incondicional a pesar de las adversidades, a mi padre Cesar Vásquez Castillo, por su amor y su sacrificio constante por mí, a mi hermano Arturo por su apoyo, amor, tolerancia y comprensión a lo largo de mi vida.

De manera especial a mi novia Cristina por su amor, apoyo y dedicación a lo largo de mi carrera.

Agradezco también a mi Asesora de tesis y segunda madre la Mg. Ing. Liliana Janet Chavarría Reyes y a su familia, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente

A la Universidad Ricardo Palma por brindarme el mejor conocimiento, a todos mis docentes que sin ellos no sería quien soy.
Gracias

Julio C. Vásquez Salas.

A mi amada universidad que me dio la bienvenida al mundo como tal, las oportunidades que me ha brindado son incomparables, siempre tuve la mentalidad que este sueño se haría realidad.

Agradezco mucho a todos mis maestros que me han brindado sus amplios conocimientos, a mis compañeros, y la universidad por la instrucción que me ha otorgado a lo largo de los años.

A mi querida asesora Mg. Ing. Liliana Janet Chavarría Reyes, por su apoyo constante y su guía en la elaboración de este trabajo.

El amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban mis padres por el avance y desarrollo de este trabajo.

Jenifer Paola Flores Oriundo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1 Formulación del problema y delimitación del problema	2
1.1.1 Problema general.....	3
1.1.2 Problemas específicos.....	3
1.2 Objetivos de la investigación	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Importancia y justificación del estudio	4
1.3.1 Importancia del estudio.....	4
1.3.2 Justificación del estudio	5
1.4 Limitaciones del estudio.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Marco histórico.....	6
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	8
2.2.1 En el ámbito Internacional	8
2.2.2 En el ámbito Nacional.....	10
2.3 Estructura teórica y científica	11
2.3.1 Grafeno	11
2.3.2 Materiales cementantes.....	13
2.3.3 Resistencia a la compresión	13
2.3.4 Trabajabilidad	14
2.3.5 Vida útil del concreto.....	15
2.3.6 Durabilidad del concreto.....	16

2.3.7 Normativas para las propiedades del concreto	17
2.4 Definición de términos básicos	17
2.4.1 Cemento	17
2.4.2 Composición del Cemento Portland.....	17
2.4.3 Agregados	18
2.4.4 Agua	20
2.4.5 Aditivos	20
2.4.6 Adición	20
2.4.7 Nanopartículas.....	21
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS.....	23
3.1 Hipótesis general.....	23
3.2 Hipótesis específica.....	23
3.3 Variables	23
3.3.1 Variable independiente	23
3.3.2 Variables dependientes	23
3.3.3 Variables intervinientes.....	23
3.3.4 Definición conceptual	23
3.3.5 Definición operacional.....	24
3.3.6 Operacionalización de las variables	24
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	28
4.1 Método de investigación.....	28
4.2 Tipo de investigación	28
4.3 Nivel de investigación.....	28
4.4 Diseño de la investigación	28
4.5 Población y muestra	29
4.5.1 Población	29
4.5.2 Muestra	29

4.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	29
4.7 Descripción de procedimiento y análisis	30
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
5.1 Resultados de la Investigación	31
5.2 Análisis e Interpretación de los resultados	53
5.3 Contrastación de Hipótesis	69
5.3.1 Contrastación de la primera hipótesis	69
5.3.2 Contrastación de la segunda hipótesis.....	69
5.3.3 Contrastación de la tercera hipótesis.....	70
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN	71
6.1 Discusión	71
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Estructura de la red de grafeno: átomos de carbono hibridizados sp^2 posicionados en una red de colmena 2D. Este material no permite el paso de moléculas a través de su red, pero si es permeable a los electrones.	12
Figura N° 2 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con grafeno y en función del tamaño de partícula de grafeno (28 días).....	32
Figura N° 3 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con óxido de grafeno (28 días).	33
Figura N° 4 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en cemento con óxido de grafeno (28 días).....	34
Figura N° 5 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con óxido de grafeno (GO), óxido de grafeno reducido (rGO) o grafeno (G) (28 días)	35
Figura N° 6 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con grafeno funcionalizado con grupos silano (28 días).	36
Figura N° 7 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con óxido de grafeno, a diferentes niveles de la relación a/c (28 días).....	37
Figura N° 8 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con óxido de grafeno (28 días).....	38
Figura N° 9 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) del concreto con grafeno (28 días)	39
Figura N° 10 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) del concreto con grafito (28 días)	40
Figura N° 11 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (GO%).....	41
Figura N° 12 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno en polvo y solución	42
Figura N° 13 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (%GO).	43
Figura N° 14 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (%GO).....	44
Figura N° 15 Slump del concreto fresco en función al contenido del nanocompuesto de grafeno y silicio (%GOS).....	45
Figura N° 16 Slump del concreto fresco en función al contenido de grafeno.....	46
Figura N° 17 Coeficiente de difusión de ion cloruro a través del concreto	47
Figura N° 18 Sortividad del agua (en $mm/s^{1/2}$) en concretos tratados con óxido de grafeno por día.	48

Figura N° 19 Pérdidas de masa y área seccional en muestras de concreto modificado con GO tras 14 días de exposición a $C_6H_8O_7$ y H_2SO_4	49
Figura N° 20 Resistencia a la compresión ($f'c$, en MPa) en concreto con grafeno luego de exposición a 14 días en solución de sulfato de magnesio.....	50
Figura N° 21 Título: Efecto de la exposición al agua (H_2O), o a una solución con sulfato de sodio (Na_2SO_4) por 56 días, sobre la resistencia a la compresión ($f'c$) de bloques de concreto ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) con EEG.	51
Figura N° 22 Título: Profundidad de penetración del ión cloruro en un concreto con EEG expuesto a solución de cloruro de sodio.	52
Figura N° 23 Título: Medidas de adsorción de agua: sortividad primaria y secundaria para todas las muestras de concreto.	53
Figura N° 24 Efecto de la adición del grafeno y sus compuestos derivados sobre la resistencia a la compresión del concreto.	61
Figura N° 25 Efecto de la adición del grafeno y sus compuestos derivados sobre la slump del concreto fresco.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra	14
Tabla N° 2 Distribución del tamaño de partícula que deja pasar cada tamiz para agregado fino.	18
Tabla N° 3 Requisitos granulométricos del agregado grueso	19
Tabla N° 4 Parámetros permisibles del agua.....	20
Tabla N° 5 Resumen de operacionalización de las variables	24
Tabla N° 6 Operacionalización de las variables dependientes	25
Tabla N° 7 Operacionalización de la variable independiente	26
Tabla N° 8 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno y en función del tamaño de partícula del grafeno (28 días).....	32
Tabla N° 9 Resistencia a la compresión en concreto con óxido de grafeno (28 días). ..	33
Tabla N° 10 Resistencia a la compresión en concreto con óxido de grafeno (28 días) .	34
Tabla N° 11 Resistencia a la compresión en mezcla de concreto con óxido de grafeno, óxido de grafeno reducido y grafeno.....	35
Tabla N° 12 Resistencia a la compresión en concreto con grafeno funcionalizado con grupos silano (28 días)	36
Tabla N° 13 Resistencia a la compresión en concreto con óxido de grafeno, a diferentes niveles de la relación a/c (28 días)	37
Tabla N° 14 Resistencia a la compresión en concreto con óxido de grafeno (28 días).	38
Tabla N° 15 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno (28 días)	39
Tabla N° 16 Resistencia a la compresión del concreto con grafito (28 días).....	40
Tabla N° 17 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno	41
Tabla N° 18 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno en polvo solución.....	42
Tabla N° 19 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (%GO)	43
Tabla N° 20 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (%GO).	44
Tabla N° 21 Slump del concreto fresco en función al contenido del nanocompuesto de grafeno y silicio (%GOS).	45
Tabla N° 22 Slump del concreto fresco en función al contenido de grafeno.	46
Tabla N° 23 Efecto del contenido de óxido de grafeno (GO) y naranja de metilo (NM) sobre la difusión del ion cloruro en el concreto.	47
Tabla N° 24 Sortividad del agua en mezclas con óxido de grafeno.	48

Tabla N° 25 Pérdidas de masa y área seccional en muestras de concreto modificado con GO tras 14 días de exposición a Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) y Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)...	49
Tabla N° 26 Resistencia a la compresión en concreto con grafeno luego de exposición a 14 días en solución de sulfato de magnesio	50
Tabla N° 27 Efecto de la exposición al agua, o a una solución con sulfato de sodio (Na_2SO_4) por 56 días, sobre la resistencia a la compresión de bloques de concreto ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) con EEG.	51
Tabla N° 28 Profundidad de penetración del ión cloruro en un cemento con EEG expuesto a solución de cloruro de sodio.	52
Tabla N° 29 Medidas de adsorción de agua: sortividad primaria y secundaria para todas las muestras de concreto.....	52
Tabla N° 30 Resumen de los trabajos de la adición de grafeno y sus compuestos derivados sobre la resistencia a la compresión del concreto.....	57
Tabla N° 31 Resumen de los trabajos de la adición de grafeno y sus compuestos derivados sobre la trabajabilidad del concreto fresco.....	64

RESUMEN

Esta investigación lleva como título “Nanopartículas de grafeno para mejorar las propiedades físico mecánicas del concreto”. Tuvo como objetivo principal estudiar las nanopartículas de grafeno para mejorar las propiedades físico mecánicas del concreto tanto en estado fresco como endurecido. El método que sustenta esta investigación es de tipo documental, no experimental y transversal. Al estudiar la incorporación de este material nanotecnológico en distintos porcentajes a la mezcla de concreto esta mejora sus propiedades físico mecánicas como la resistencia a la compresión y la durabilidad ; pero no mejora la trabajabilidad.

En referencia a la resistencia a la compresión de acuerdo a la información aportada por las fuentes, se puede decir que porcentajes de grafeno entre 0.02%-0.04% con relación al peso de cemento empleado, conducen a un incremento desde el 10% en la resistencia a la compresión. Por el lado de la trabajabilidad la incorporación de grafeno a la mezcla de concreto en un aproximado de 0.05% disminuye el asentamiento entre el 3% y el 26% en comparación de la mezcla de concreto patrón sin grafeno. En el caso de la durabilidad el grafeno aumenta la durabilidad del concreto al disminuir la absorción de agua y de iones como el cloruro y el sulfato, también la presencia del grafeno en el concreto lo hace menos susceptible al ataque de sustancias ácidas provenientes del smog o la lluvia ácida y modifica la estructura de los poros evitando que el agua y las especies que vienen disueltas en ella, entren con facilidad al concreto y lo debiliten. Se puede concluir que la adición del grafeno y sus compuestos constituyen una gran oportunidad de innovación e investigación en relación a las mejoras del concreto fresco y el concreto endurecido.

Palabras clave: concreto, durabilidad, asentamiento, trabajabilidad, resistencia, nanomateriales.

ABSTRACT

This research is entitled "Graphene nanoparticles to improve the physical-mechanical properties of concrete". Its main objective was to study graphene nanoparticles to improve the physical-mechanical properties of concrete in both fresh and hardened states. The method that supports this research is documentary, non-experimental and cross-sectional. By studying the incorporation of this nanotechnological material in different percentages to the concrete mix, it improves its physical-mechanical properties such as compressive strength and durability; but does not improve workability.

In reference to the compressive strength according to the information provided by the sources, it can be said that percentages of graphene between 0.02%-0.04% in relation to the weight of cement used, lead to an increase from 10% in resistance. to compression. On the workability side, the incorporation of graphene to the concrete mix by approximately 0.05% decreases the settlement between 3% and 26% compared to the standard concrete mix without graphene. In the case of durability, graphene increases the durability of concrete by reducing the absorption of water and ions such as chloride and sulfate, also the presence of graphene in concrete makes it less susceptible to attack by acidic substances from smog or acid rain and modifies the structure of the pores preventing the water and the species that are dissolved in it from easily entering the concrete and weakening it. It can be concluded that the addition of graphene and its compounds constitute a great opportunity for innovation and research in relation to the improvements of fresh concrete and hardened concrete.

Keywords: concrete, durability, settlement, workability, resistance, nanomaterials.

INTRODUCCIÓN

El interés por el desarrollo de concretos más resistentes, está relacionado a la posibilidad de reducir el volumen de concreto necesario para el levantamiento de estructuras. La incorporación de nanomateriales, como las nanopartículas de grafeno, atrae actualmente la atención de la comunidad investigadora como forma de reducir la huella de carbono de los edificios. En ese sentido, la presente investigación busca establecer los aportes sobre la adición de materiales nanotecnológicos como el grafeno sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto.

La producción de 1000 kg de cemento emite aproximadamente 1 t de dióxido de carbono (CO₂) y la industria del cemento representa por sí sola alrededor del 10% del total de las emisiones antropogénicas del gas carbónico. Otra arista que le aporta un valor agregado a esta tecnología, es que los nanomateriales carbonosos se pueden sintetizar a partir de desechos plásticos y el caucho, reduciendo de esta manera el impacto en el medio ambiente en lo que a generación se refiere.

Aunque varios estudios ya han demostrado ganancias significativas en términos de rigidez, resistencia y durabilidad para los concretos que incorporan nanotubos de carbono o nanopartículas de grafeno, quedan por evaluar criterios extremadamente importantes, en particular la presencia de defectos y el comportamiento del concreto a la rotura. Actualmente, se desconoce la influencia de estos nanomateriales en el comportamiento del cemento Portland, o cualquiera de las formulaciones comerciales disponibles, haciendo necesario su estudio, para lo cual se requiere el empleo de nuevos métodos de caracterización de la fractura y desarrollar protocolos de síntesis alternativos para estudiar el impacto de estos nanomateriales carbonosos en las características fisicoquímicas y mecánicas del concreto. Para el desarrollo de estas investigaciones, se necesita construir un marco conceptual que agrupe los fundamentos sobre la durabilidad, asentamiento y la resistencia a la compresión, las cuales se desarrollaran en la presente contribución.

El trabajo de investigación, está constituido por seis capítulos: el primero presenta la situación del problema del estudio; el segundo es el marco teórico; el tercero se presentan las hipótesis y las variables; el cuarto se describe la metodología seguida para la búsqueda de la información y su posterior procesamiento; el quinto se presentan los resultados de la revisión y análisis; y finalmente, el sexto capítulo, la discusión, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Formulación del problema y delimitación del problema

El problema de la contaminación ambiental, se debe en parte al desconocimiento que tienen las personas sobre los efectos que originan al planeta y sus ecosistemas la excesiva e inadecuada deposición de desechos de todo tipo, que van a parar a cuerpos de agua, suelos y aire, ejerciendo sus efectos tóxicos. Por ello, los gobiernos, las instituciones universitarias y las empresas privadas señalan que por medio de la actualidad tecnológica están en búsqueda de materiales novedosos que produzcan cantidades mínimas de residuos nocivos para el medio ambiente en los procesos de producción, por lo cual utilizan materiales de desecho que parecen no tener utilidad, y convertirlos en productos útiles para la sociedad y la industria (Flores et al., 2011). En ese sentido, la producción y el consumo de cemento, principalmente en las naciones desarrolladas, del mismo modo como los proyectos de construcción, han aumentado considerablemente en las últimas décadas. Aunque el cemento es un material fundamental para el desarrollo económico de un país, los problemas medioambientales causados por su producción, tales como la emisión de CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y partículas en suspensión en el aire, han preocupado a muchos investigadores, por lo que la contaminación causada por la producción de cemento se transformó en uno de los inconvenientes ambientales más trascendentales de los últimos decenios (Sadeghi-Nik et al., 2017).

Durante décadas, el cemento Portland fue considerado, y sigue siendo, el principal componente aglutinante activo de todos los materiales que conforman el concreto. Hoy en día, varias materias cementantes secundarias, como, las cenizas de cáscara de arroz, las cenizas de bagazo, las cenizas volantes, residuos de alto horno granulada, el metacaolín, las cenizas volcánicas y el humo de sílice, se adicionan comúnmente en el concreto, como un componente adicional para reducir la cantidad cemento en la mezcla, y así disminuir el efecto en el ambiente de la industria y mejorar las propiedades del material (Praveenkumar et al., 2019).

Algunas deficiencias del concreto, como los bajos valores ductilidad, tenacidad y resistencia a la flexión, junto con los problemas de resistencia en la interacción con los productos químicos, suscitan dudas sobre la fiabilidad y la durabilidad de este material. Así, el uso de nanomateriales junto con los materiales cementantes puede

resolver estos problemas y aumentar significativamente las propiedades mecánicas del concreto (Karakouzian et al., 2021). Recientemente se han probado nanopartículas de óxido como nano-SiO₂, nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nano-Al₂O₃, nano-CaCO₃, nano-ZnO₂, nano-partículas de cemento de C₂S (alita) y C₃S (belita), nano-arcillas, nanotubos de carbono, grafeno y sus compuestos derivados, que mejoran el rendimiento del concreto. Sin embargo, las nanopartículas tienen una costa unitaria de 100 a 1000 veces mayor que el cemento Portland u otras materias primas convencionales empleadas para la producción de materiales a partir del cemento, un aspecto económico importante para el diseño de materiales (Mendes et al., 2015).

La investigación centrada en el nanoconcreto se ha centrado, por tanto, en la idoneidad de los distintos tipos de nanopartículas para mejorar las diferentes características de los concretos, sus dosis óptimas, su coste, entre otros. La principal característica de las nanopartículas es que tienen una elevada relación superficie-volumen, por lo cual se espera que haya más átomos en la superficie de las nanopartículas, lo que las hace muy reactivas. Además, estas nanopartículas pueden formar fácilmente aglomerados si no se distribuyen adecuadamente en la mezcla. Una mayor superficie de las partículas en el compuesto cementicio requiere más agua para ser humedecida, lo que resulta en una mínima proporción de agua libre de dispersión disponible en la mezcla en sistemas acuosos. Por lo tanto, la adición de nanopartículas en el concreto puede modificar significativamente el comportamiento no sólo en fresco, sino también en estado endurecido, así como el desarrollo físico/mecánico y de la microestructura (Paul et al., 2018).

Por lo tanto, la finalidad de este estudio es analizar los efectos que tiene la adición de nanopartículas de grafeno al concreto, específicamente en la trabajabilidad del concreto fresco, la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto.

1.1.1 Problema general

¿De qué manera la adición de nanopartículas de grafeno influye en las propiedades físicas y mecánicas del concreto?

1.1.2 Problemas específicos

a) ¿En qué medida el porcentaje de nanopartículas de grafeno influye en la resistencia a la compresión del concreto?

- b) ¿En qué medida el porcentaje de nanopartículas de grafeno influye en el asentamiento del concreto?
- c) ¿En qué medida la adición de nanopartículas de grafeno influye en la durabilidad del concreto?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Analizar las nanopartículas de grafeno para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la resistencia a la compresión del concreto.
- b) Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar el asentamiento del concreto.
- c) Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para incrementar la durabilidad del concreto.

1.3 Importancia y justificación del estudio

1.3.1 Importancia del estudio

La adición de materiales nanotecnológicos al concreto, como las nanopartículas de grafeno tiene relevancia, ya que no solo pueden mejorar las propiedades físico-mecánicas de este material, sino que además pueden incrementar la vida útil y otorgarle cierta resistencia a los efectos de sustancias químicas corrosivas u otras sustancias que pueden catalizar reacciones químicas de óxido reducción que debiliten la estructura interna de la estructura. De esta manera se pueden mejorar las construcciones convencionales en donde se emplee el concreto, requiriendo menos operaciones de mantenimiento y previniendo posibles daños.

1.3.2 Justificación del estudio

La presente investigación se justifica en cuanto aporta una sistematización del conocimiento reciente sobre aportes de la adición de nanopartículas de grafeno para la mejora de propiedades deseables en el concreto. Con esta revisión se aspira encontrar vías idóneas para la aplicación de esta tecnología, que disminuirá al largo plazo los costos por la disminución del mantenimiento, así como la construcción de estructuras más robustas y resistentes a los ataques de los elementos.

De igual forma, las nanopartículas de grafeno se pueden sintetizar a partir de materiales de desecho que tengan un alto contenido en carbono, tales como el caucho, residuos de alimentos, carbón vegetal y los plásticos. De esta manera, se puede disminuir la contaminación (aumentando la durabilidad del concreto y disminuyendo la cantidad de residuos y transformando otros) y se contribuye con el cuidado del medio ambiente.

1.4 Limitaciones del estudio

Actualmente esta investigación se realiza en un contexto social muy restrictivo con implicaciones sociales y sanitarias en el Perú (y en general a escala global) como lo es la pandemia del COVID-19. Por ello, esta investigación solo puede realizarse de forma descriptiva, mediante el empleo de medios electrónicos y bases de datos disponibles para obtención de los datos, que son todos de fuentes secundarias.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco histórico

La preparación y el uso de los concretos hidráulicos son muy antiguos y se atribuyen generalmente a los romanos. El concreto hidráulico romano era una mezcla de cal (CaO, fabricada mediante la combustión de piedra caliza) y ciertas cenizas volcánicas o puzolanas similares. Por diversas razones, el conocimiento de la fabricación y el uso de los concretos hidráulicos disminuyó drásticamente tras la caída del Imperio Romano, aunque los morteros de cal siguieron siendo populares. El interés por los concretos hidráulicos de alta calidad resurgió a mediados del siglo XVIII, y se probaron varios diseños de mezcla de concreto con piedra caliza, cal, arcilla y puzolanas naturales y artificiales (sobre todo, escoria de alto horno molida), en diversas condiciones de procesamiento y con éxito variable. El cemento natural (fabricado a partir de la combustión a relativamente baja temperatura de calizas ricas en arcilla) y los cementos de escoria-cal se desarrollaron y se utilizaron ampliamente, pero su calidad era muy variable a nivel regional (van Oss & Padovani, 2002).

Existe un cierto debate sobre quién, entre varios investigadores en los años finales del siglo XVIII e inicios del XIX en Inglaterra y Francia, merece el crédito por el desarrollo del concreto hidráulico moderno. Se suele atribuir el mérito a Joseph Aspdin por su patente de 1824 de un proceso para fabricar un cemento artificial superior a partir de una composición de piedra caliza y arcilla quemada a elevada temperatura. Aspdin bautizó el material resultante como "cemento portland", por su supuesto parecido con una popular piedra de construcción local extraída de la isla de Portland, en el sur de Inglaterra. Debido a su alta calidad, más consistente que la de los cementos naturales disponibles, la popularidad del cemento portland creció rápidamente, y pronto se registró una importante producción también en Francia y Alemania (van Oss & Padovani, 2002).

La producción comercial de cemento portland no comenzó en Estados Unidos hasta principios o mediados de la década de 1870, y en 1900, la producción estadounidense de cemento portland, aunque todavía era muy pequeña, alrededor de 1,5 Mt al año, finalmente superó la producción combinada del país de cementos naturales y de escorias. Los datos sobre la producción mundial de cemento hidráulico a principios del siglo XX son muy incompletos, pero a pesar de los constantes aumentos, la producción mundial total antes de la Primera Guerra Mundial probablemente nunca

superó los 100 Mt anuales. La producción mundial disminuyó significativamente durante y después de la Gran Depresión y se mantuvo en niveles bajos hasta el final de la Segunda Guerra Mundial; desde entonces la producción ha crecido de forma espectacular y actualmente supera los 1.600 Mt. La mayor parte de la producción mundial actual de cemento hidráulico es de cemento portland y de cementos mezclados o compuestos que tienen una base de cemento portland (estos se incluyen comúnmente bajo la designación de cemento portland en las tabulaciones estadísticas) (van Oss & Padovani, 2002).

El cemento sigue siendo un material esencial en la fabricación del concreto, pero en algunos concretos modernos ya no es el material más importante porque estos concretos son materiales compuestos. En un material compuesto, es imposible decidir cuál es el material más importante porque, por su naturaleza, un material compuesto tiene propiedades que son siempre mucho mejores que la simple suma aritmética de las propiedades individuales de cada componente (Aïtcin, 2000).

El concreto moderno es más que una simple mezcla de cemento, agua y agregados. El concreto moderno está constituido por números minerales con características muy específicas que dan propiedades concretas al concreto, y también aditivos químicos que tienen efectos aún más específicos. El concreto moderno se está convirtiendo en un material químico muy complejo en el que los productos minerales y amorfos, y no sólo el clinker molido y el sulfato de calcio, interactúan con moléculas orgánicas o polímeros. Estas moléculas orgánicas están especialmente desarrolladas para resaltar ciertas características del concreto o corregir ciertas deficiencias de los cementos actuales porque los cementos actuales pueden presentar algunas deficiencias en algunas de sus aplicaciones (Aïtcin, 2000).

La adición de nanopartículas al concreto y los productos de cemento relacionados han sido el centro de la investigación reciente, ya que se prevé que su área superficial y reactividad excepcionalmente altas puedan modificar beneficiosamente las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales a base de cemento. El efecto de la adición de nanomateriales sobre la trabajabilidad del concreto fresco ha sido variable, en algunos casos la ha aumentado, pero en otras la ha disminuido. La primera adición documentada de nanopartículas a un sistema basado en el cemento se produjo en 1964, quienes añadieron nano-SiO₂ a la pasta de alita pura, que es el sustituto más simplificado química y físicamente del concreto. Se observó que el nano-SiO₂ facilitaba una hidratación más rápida y completa, cuyo producto principal

es el silicato-hidrato de calcio (C-S-H). Este descubrimiento señaló el potencial del uso de estos materiales a escala nanométrica para modificar las propiedades de los materiales a base de cemento, ya que las redes poliméricas de C-S-H sirven de "pegamento" estructural del concreto y otros productos de cemento. También se observaron efectos similares en la pasta de cemento portland ordinario (OPC) en 1977. A pesar de estos prometedores resultados iniciales, el uso de las nanopartículas en los materiales a base de cemento no se desarrolló de forma apreciable hasta alrededor de 2004. En los años siguientes, se ha estudiado una variedad de nanopartículas, sobre todo de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ y arcillas- que se adicionan para modificar beneficiosamente las propiedades de los productos de concreto fresco y endurecido (Reches, 2018).

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 En el ámbito Internacional

Jiang et al. (2021) en su investigación titulada “Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques” traducida al español como “Propiedades mecánicas del concreto armado con nano plaquetas de grafeno preparada con diferentes técnicas de dispersión” del departamento de Sistemas de ingeniería y medio ambiente de la Universidad de Virginia en USA y del departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Kirikkale, Turquía respectivamente tenían como propósito general estudiar los efectos de la nano plaquetas de grafeno sobre las propiedades mecánicas de los composites cementosos con agregados gruesos. En el estudio se prepararon mezclas de concreto con concentraciones de GNPs (nanopartículas de grafeno) que iban desde 0.025% a 0.10% en peso del cemento, donde se realiza una técnica de dispersión húmeda que emplea mezcla de alto cizallamiento y superplastificante a base de poli carboxilato para dispersar los GNPs en agua. Se realizaron estudios de los efectos en varios parámetros de dispersión que incluyen diferentes duraciones de mezcla de alto cizallamiento, así como el uso de ultrasonidos junto con un mezclado de alto cizallamiento sobre la dispersión de los GNP. La calidad de la dispersión de los GNP se evalúa mediante microscopía óptica, espectroscopía Raman y pruebas de microscopía electrónica de barrido. Se llevan a cabo pruebas de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión para evaluar los efectos de

los GNP sobre las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas de hormigón reforzado con GNP.

Los resultados muestran que todos los procedimientos de dispersión considerados en este estudio pueden dispersar los GNP en agua sin causar ningún defecto basal o de vacancia en las láminas de grafeno y reducir el tamaño de las escamas de grafeno. Cuando los GNP se agregan a la mezcla de concreto en una dosis de 0.025%, se observa un aumento máximo del 17% en la resistencia a la compresión, mientras que no se nota un efecto significativo de los GNP sobre la resistencia a la flexión.

Li et al. (2021), en su investigación titulada “Fatigue behaviors of graphene reinforcing concrete composites under compression” que en español se traduce como “Comportamientos de fatiga de los compuestos de concreto armado de grafeno bajo compresión” de la escuela de Ingeniería Civil en la Universidad Tecnológica de Dalian, China y del Departamento de Ingeniería, de la Universidad de Cambridge, Reino unido respectivamente, tienen como fin estudiar los comportamientos de fatiga del hormigón en polvo reactivo reforzado con grafeno multicapa bajo cargas de compresión.

Los hallazgos exponen que incorporar las MLG (multicapas de grafeno) reduce significativamente la debilidad interna de RPC. Específicamente, las MLG disminuye la diferencia de temperatura y el estrés térmico dentro de los compuestos de concreto, refina los poros dañinos en la zona de agrietamiento por fatiga (diámetro superior a 100 nm), y estabiliza la composición química de la zona de transición interfacial. Al salvar las microgrietas y adherirse con una matriz de concreto endurecido, las MLG laminado ralentiza la generación de microgrietas en la etapa de acoplamiento de fluencia-fatiga, retrasa el inicio de la etapa de fatiga y aumenta la deformación por falla de fatiga.

En consecuencia, incluso al 0,075% en peso de contenido de MLG, la vida útil a la fatiga, la absorción de energía y el índice de daño del RPC (polvo reactivo reforzado) aumentan hasta un 49,3% (en términos de logaritmo), 33,1% y 22,23%, respectivamente.

Ávila (2018) realizó un trabajo novedoso en Ecuador que lleva por título “Evaluación del comportamiento en compresión de morteros reforzados con óxido de grafeno y costos inherentes al proceso productivo de la mezcla”. La Tesis de Grado para optar a Ingeniero Civil presentada en la Universidad de

Especialidades Espíritu Santo, evaluó un procedimiento químico para transformar esquistos grafitosos y grafito sintético en óxido de grafeno. Dado el bajo contenido de carbono del esquisto, solo pudo obtener el óxido de grafeno y la forma reducida a partir del grafito sintético, y encontró que la incorporación de estos materiales, hasta en un 0.06% del peso de cemento, aumenta la resistencia a la compresión del concreto en un 28.12% (para óxido de grafeno) y en un 42.87% (para óxido de grafeno reducido).

2.2.2 En el ámbito Nacional

Bartra (2019) en su investigación titulada “Evaluación de la influencia del grafeno como material nanotecnológico para mejorar la resistencia del concreto $f'c$ 210 kg/cm²” para obtener el título profesional de ingeniería civil de la Universidad César Vallejo de Tarapoto, tuvo como objetivo general medir el efecto del grafeno agregado a la mezcla de concreto para optimizar sus propiedades en estado fresco y endurecido.

En consecuencia, de los cuatro diseños de mezcla realizados, se desarrolló un diseño de mezcla estándar sin incluir grafeno, que a su vez sirvió para comparar los tres diseños a los que se añadieron contenidos de grafeno del 1.00%, 1.50% y 2.00% del peso total del cemento; el concreto estándar se diseñó para resistir 210 kg/cm² a los 28 días.

Finalmente, el autor concluye que el grafeno incrementa la resistencia del concreto en comparación con el concreto estándar y que la resistencia aumenta con el incremento del contenido de grafeno. Tras la adición de grafeno a la mezcla, se comprobó que no provoca ningún cambio en la trabajabilidad en fresco, y se constató que el desarrollo del efecto de resistencia se produce en el mínimo tiempo posible, apresurando el endurecimiento temprano.

Choque (2021) en su investigación titulada “Mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto $f'c=$ 210 kg/cm² agregando grafeno” para obtener el grado académico de doctor en ingeniería civil de la Universidad Nacional Federico Villarreal, presenta una propuesta técnica para el uso de métodos de diseño en la construcción, especialmente en lo que respecta a la optimización de las propiedades mecánicas del concreto.

El autor realizó un estudio de tipo aplicado y el diseño experimental donde se evaluaron 120 probetas de concreto, específicamente 90 cilíndricas y 30 prismáticas, incluyendo una probeta estándar con un diseño de $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, y sobre estas probetas con una dosificación de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% de grafeno, que fueron sometidas a ensayos de compresión, flexión y tensión. La resistencia se evaluó en ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días y en ensayos de flexión y tracción a los 7 y 28 días respectivamente.

En conclusión, el autor pudo afirmar que los hallazgos fueron óptimos con un bosquejo minucioso e inspeccionado, el diseño de la mezcla resultó útil, además se demostró que la adición de 0,4% de grafeno en relación con el peso del cemento después de 28 días tiene un valor elevado, ya que mejora significativamente la resistencia a la compresión, la flexión y los esfuerzos de tracción diametral en comparación con la muestra estándar.

Pérez et al. (2021) hicieron un trabajo de corte bibliográfico que lleva por título “Uso de Nanomateriales en la Producción del Concreto: Revisión Literaria”, siendo todos los autores proveniente de la Universidad Señor de Sipán. Su propósito era describir el uso actual de los nanomateriales en las tecnologías para la obtención de concreto y sus aplicaciones en diversos escenarios de la ingeniería. Aunque no revisan de forma específica las nanopartículas de grafeno si tienen en cuenta a una extensa familia de nanocompuestos como el dióxido de titanio, el dióxido de silicio, el óxido férrico y los nanotubos de carbono, destacando un panorama donde aún emergen posibilidades de seguir innovando en esta área. Las conclusiones a las que llegaron los investigadores apuntan a tres direcciones: el incremento en el desempeño de los materiales cementicios, el efecto negativo que tienen las nanopartículas sobre la trabajabilidad del concreto fresco por lo cual se deben añadir otros compuestos para mejorar esta propiedad, y por último, mejoras particulares en función al tipo de nanomaterial empleado.

2.3 Estructura teórica y científica

2.3.1 Grafeno

El grafeno es una placa conformada por átomos de carbono del grosor de un átomo, que posee una conformación de enlace químico hibridados sp^2 dispuestos en una red de panal o hexagonal, y además es el material 2D más

delgado (Ver Figura 1). Los orbitales π superpuestos del grafeno con una gran longitud de dispersión le confieren una alta movilidad electrónica a temperatura ambiente. Además, presenta una alta absorción óptica (2,3%), una alta conductividad térmica (25 veces la del átomo de silicio) y una alta resistencia mecánica (es el nanomaterial más resistente). Se ha utilizado en varias aplicaciones extraordinarias, sobre todo en el campo de la microelectrónica dado que posee estructura electrónica única, que puede ser controlada química y geoméricamente (Berry, 2013).

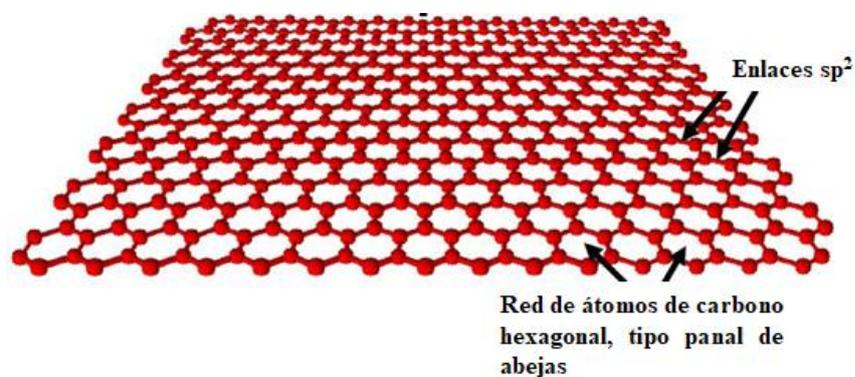


Figura N° 1 Estructura de la red de grafeno: átomos de carbono hibridizados sp^2 posicionados en una red de colmena 2D. Este material no permite el paso de moléculas a través de su red, pero si es permeable a los electrones.

Fuente: Berry (2013)

Los grafenos monocapa y bicapa se obtienen por escisión micromecánica del grafito a granel o del grafito pirolítico altamente orientado. Recientemente, se han obtenido grafenos monocapa y bicapa en fase gaseosa utilizando un reactor de plasma de microondas sin sustrato y a presión atmosférica. También se ha empleado la descomposición térmica (grafitización al vacío) del carburo de silicio (SiC) para obtener grafenos epitaxiales monocapa y bicapa. Los nanorribones de grafeno monocapa y bicapa (anchura $< 10 \text{ nm}$) pueden obtenerse por exfoliación térmica seguida de solubilización y centrifugación del grafito expandible. Se ha informado de que el grafeno monocapa se forma por sonicación en agua tras la reducción química del óxido grafitico con hidracina (Rao et al., 2009).

La rápida adopción del grafeno como material de interés radica en su disponibilidad real mediante la gama de técnicas y métodos antes descritos, pero también, y quizá principalmente, porque el grafeno monocapa, el de pocas capas y el óxido de grafeno poseen un conjunto diverso de propiedades inusuales. El grafito, el diamante y los nanotubos de carbono han batido récords por su solidez mecánica, y el grafeno es similar, aunque su propiedad mecánica es menos conocida que sus características ópticas y electrónicas. Esta elevada resistencia mecánica, combinada con el coste relativamente bajo del grafeno fino y la habilidad para mezclar el óxido de grafeno en las matrices, hace que estos materiales sean considerados adecuados como refuerzo mecánico (Soldano et al., 2010).

2.3.2 Materiales cementantes

Estos materiales suelen ser derivados de otros procesos o sustancias naturales. Pueden o no ser tratados antes de ser empleados en el concreto. Algunos de estos materiales son llamados puzolanas, que no tienen propiedades cementantes en sí mismas, sino que reaccionan con el cemento Portland para formar componentes de cemento. Otros materiales, como la escoria, tienen propiedades cementantes.

Para ser utilizados en el concreto, deben cumplir los requisitos establecidos en las normas. Pueden utilizarse solos o combinados con el concreto. Pueden añadirse a la mezcla de concreto el cemento (blended) o como un lote separado de ingredientes en una planta de concreto premezclado (National Ready Mixed Concrete Association [NRMCA], 2020).

2.3.3 Resistencia a la compresión

Puede definirse la resistencia a la compresión como la tensión máxima soportada por un material bajo carga de compresión. La resistencia a la compresión de un material que se quiebra (como el concreto) puede definirse como una propiedad autónoma dentro de unos límites relativamente estrechos. Por el contrario, la resistencia a la compresión de los materiales que no se fracturan bajo compresión se define como la cantidad de esfuerzo requerido para alterar el material en cualquier cantidad. La resistencia a la compresión se

determina dividiendo la tensión máxima por el área de la sección transversal original de la probeta comprimida (Instron, 2012).

Según diversas normas (por ejemplo, la británica o la india), la resistencia a la compresión del cemento es uno de los factores más importantes que afectan a la resistencia a la compresión del mortero y el concreto y debe tenerse en cuenta en la fabricación del cemento. Recientemente, se han utilizado clases de resistencia del cemento de 32,5, 42,5 y 52,5 MPa en diferentes tipos de estructuras con el mismo diseño, curado, pruebas y condiciones, dando como resultado diferentes valores de resistencia a la compresión del concreto. Además, parámetros como la relación agua/cemento (a/c), la relación arena/cemento, la edad y la forma de las probetas causan diferentes efectos (Eskandari-Naddaf & Kazemi, 2017). Por lo tanto, estos aspectos deben ser definidos y normalizados para que puedan ser comparados en pruebas similares.

Cada contenido de vacíos de aire reduce la resistencia del material en un 5% por cada aumento del 1% del contenido de vacíos de aire (Mather y Ozyildirim, 2004).

La Tabla N° 1 muestra algunas especificaciones de resistencia a la compresión esperada para concretos y las condiciones de estimación.

Tabla N° 1: Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones $f'cr \geq f'c + 1.34S$ $f'cr \geq f'c + 2.33S - 35$
$f'c > 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones $f'cr \geq f'c + 1.34S$ $f'cr \geq 0.90f'c + 2.35S$

Fuente: Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado

2.3.4 Trabajabilidad

Las pastas de concreto se utilizan para una extensa progresión de aplicaciones en el sector de la construcción. Estas pastas requieren una alta

trabajabilidad y para ello se adicionan sustancias superplastificantes. Se ha comprobado que algunos concretos frescos se comportan mejor (es decir, fluyen más rápido y son trabajables durante más tiempo sin sangrar ni segregarse) en algunos países que en otros. Estos problemas pueden resolverse de forma empírica cuando se presentan (Claisse et al., 2001). En ese sentido, el asentamiento es la medida que da la facilidad de trabajo, trabajabilidad o consistencia del concreto. En otras palabras, mide la facilidad del concreto para empujar, moldear y alisar.

Numerosos estudios sobre las características reológicas del concreto fresco han demostrado que estas propiedades dependen de muchos factores. Se han citado con frecuencia los siguientes: la relación agua/cemento (a/c), la superficie específica, la composición mineral, las condiciones durante las mediciones y su duración (es decir, la dependencia del tiempo, el tiempo de mezcla y la intensidad de mezcla) y la temperatura. Los investigadores anteriores descubrieron que el concreto tenía una mejor trabajabilidad cuando se utilizaba una relación a/c alta, un cemento de baja superficie específica y una velocidad de mezclado alta (Claisse et al., 2001).

2.3.5 Vida útil del concreto

La “vida útil” del concreto se define como el período de tiempo para el cual se diseña la estructura, y esta o parte de ella solo podría necesitar un mantenimiento anticipado pero sin que sea necesaria una reparación importante (Alexander & Beushausen, 2019). La vida útil de las configuraciones de concreto es dependiente de los elementos que conforman la estructuras y los que no la conforman. Entre los componentes no estructurales están los sistemas de drenaje, ciertas conexiones y los sistemas eléctricos e hidráulicos. Entre los elementos estructurales están los anclajes, los acoplamientos y los cables de tracción, que requieren asesoramiento y apoyo profesional, además de los servicios de los ingenieros estructurales. La vida útil de los accesorios por lo general tiene menor longevidad que la de la estructura, por lo que deben establecerse procedimientos de mantenimiento y renovación de estos componentes. Estos procedimientos deben incluirse en el mismo pliego de condiciones. (Cipriano, 2018).

2.3.6 Durabilidad del concreto

La durabilidad de las estructuras del concreto reforzado puede definirse como la propiedad de los componentes o estructuras para su soporte, sin una pérdida indebida de la capacidad de servicio o la necesidad de una reparación importante. La durabilidad tiene que ver con el rendimiento o el deterioro del material en el transcurso de su utilidad en la estructura en un entorno determinado, y no es una propiedad intrínseca del material: el concreto que es duradero en un entorno puede no serlo en otro (Alexander & Beushausen, 2019).

La mayoría de los problemas actuales de durabilidad del concreto reforzado están relacionados con la corrosión del acero de refuerzo, que es una amenaza para la vida útil y el valor económico de las estructuras afectadas por la oxidación corrosiva. Esta es una reacción electroquímica que requiere ciertas condiciones, la corrosión se produce debido a una alteración de la solución de los poros que rodea al acero, por lo que se impide la acción aislante de la solución de los poros, lo que conduce a una degradación del manto de óxido protector del acero. Los principales procesos que alteran la solución de los poros son la carbonización del concreto (debido a la entrada de CO₂ atmosférico), que provoca la acidificación (formación de ácido carbónico y posterior ionización), y la entrada de iones cloruro, que causan picaduras locales en el acero. Dado que estos agentes externos deben penetrar en el acero para que se inicie la corrosión, la capa de recubrimiento del concreto se convierte en la única "línea de defensa", y la calidad de esta capa rige en gran medida la vida útil de la estructura (junto con la profundidad del recubrimiento). El diseño de la durabilidad tiene que ver con la "compensación" entre la calidad y la cantidad del recubrimiento de concreto. Además, la calidad de la capa de recubrimiento no sólo depende de los componentes y las proporciones de la mezcla, sino también del proceso constructivo, es decir, la influencia de la compactación, el curado, el secado temprano y la penetración temprana de agentes ambientales agresivos (Alexander & Beushausen, 2019).

2.3.7 Normativas para las propiedades del concreto

Existen organismos nacionales e internacionales que proveen lineamientos sobre los parámetros que debe tener un concreto para una aplicación determinada. En el caso peruano se tiene la Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado la cual establece los procedimientos necesarios para la evaluación del concreto. También se tiene la NTP 339.034 que proporciona orientaciones para medir la resistencia a la compresión, y que se basa en la norma ASTM 39. Otras normas de interés, pero internacionales es la Norma ASTM C 1585- 04 que se emplea para medir el nivel de absorción de agua de los cementos hidráulicos.

2.4 Definición de términos básicos

2.4.1 Cemento

El cemento es un material de construcción finamente molido que consiste principalmente en componentes inorgánicos no metálicos con una composición definida dentro de límites estandarizados. Cuando se mezcla con agua, el cemento forma una pasta que se solidifica y endurece mediante reacciones de hidratación, que dan lugar principalmente a la formación de hidratos de silicato de calcio y de aluminato de calcio. Además de los cementos sin adición, existen otros tipos de cementos para aplicaciones especiales como los adicionados y los de performance. Las propiedades físicas y químicas de los cementos especificados en las normas se supervisan y controlan. El cemento se utiliza como agente aglutinante en morteros y hormigones para diversos fines (Sprung, 2008).

2.4.2 Composición del Cemento Portland

A continuación, se muestran los principales componente minerales del polvo de cemento: silicato tricálcico $[\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}]$ con 72.6%, silicato dicálcico $(\text{Ca}_2\text{SiO}_4)$ con 6.7%, y silicato de calcio, magnesio, hierro y aluminio $(\text{Ca}_2\text{MgO} \cdot 2\text{AlFeO} \cdot 6\text{SiO} \cdot 2^{\circ}5)$ con 5.6%. También están presentes otras sales en menor proporción que contribuyen con las propiedades macroscópica del producto final (Chandra & Björnström, 2002; Song et al., 2006).

2.4.3 Agregados

Se define como un grupo de partículas inorgánicas de origen natural o artificial cuyas dimensiones están definidas por la NTP 400.012 (Álvarez Huaynalaya, 2020). Es un conjunto de partículas, de origen natural o artificial, que pueden ser tratadas o elaboradas y cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados por la presente norma. Se les llama también áridos vigente (NTP 400.037, 2018).

- Agregado Fino

Es el agregado proveniente de la desintegración natural o artificial, que pasa el tamiz normalizado 9,5 mm (3/8 pulg) y queda retenido en el tamiz normalizado 75 μm (No. 200); deberá cumplir con los límites establecidos en la presente norma (NTP 400.037, 2018).

Tabla N° 2 Distribución del tamaño de partícula que deja pasar cada tamiz para agregado fino.

Malla	Diámetros	Porcentaje total de material que pasa (%)
9.52 mm	3/8''	100
4.76 mm	N° 4	95 a 100
2.36 mm	N° 8	80 a 100
1.18 mm	N° 16	50 a 85
595 μm	N° 20	25 a 60
297 μm	N° 50	10 a 30
149 μm	N° 100	2 a 10

Fuente: NTP 400.012 - ASTM C136

- Agregado Grueso

Es el agregado retenido en el tamiz normalizado 4,75 mm (No. 4) proveniente de la desintegración natural o mecánica de la roca, y que cumple con los límites establecidos en la presente NTP. (NTP 400.037, 2018).

Tabla N° 3 Requisitos granulométricos del agregado grueso

Tamaño nominal	% Pasa por los tamices normalizados												
	4''	3 1/2''	3''	2 1/2''	2''	1 1/2''	1''	3/4''	1/2''	3/8''	N° 4	N° 8	N° 16
	100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
3 1/2'' a 1 1/2''	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5					
2 1/2'' a 1 1/2''	-	-	100	90-110	35-70	0-15	-	0-5					
2'' a N° 4	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-301	-	0-5		
1 1/2'' a N° 4	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-301	0-5		
1'' a 3/8''	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-401	0-15	0-5		
1'' a N° 4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	26-60	-	0-10	0-5	
3/4'' a N° 4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	
2'' a 1''	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5				
1 1/2'' a 3/4''	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5			
1'' a 1/2''	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5			
3/4'' a 3/8''	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5		
1/2'' a N° 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	
3/8'' a N° 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: NTP 400.037 - ASTM C33

2.4.4 Agua

De acuerdo a Loya Olivera (2018) la Norma NTP 339.088 establece las consideraciones de la calidad del agua apta para la realización del curado del concreto, la característica de esta agua debe ser las descritas en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4 Parámetros permisibles del agua

Descripción	Límites permisibles	
Sólidos en suspensión	5000 ppm	Máximo
Materia orgánica	3 ppm	Máximo
Alcalinidad	1000 ppm	Máximo
Sulfatos	600 ppm	Máximo
Cloruros	100 ppm	Máximo
pH	5 a 8	-

Fuente: NTP 339.088

2.4.5 Aditivos

Según la norma ASTM C 125, un aditivo se define como un material, distinto del agua, los áridos, el cemento hidráulico o las fibras de refuerzo, cuya reacción con el agua cambia las características del concreto o del mortero y que se añade con fines de producción o de conservación de la energía. En algunos casos, la mezcla puede ser la única manera de conseguir los resultados deseados. En otros casos, las metas pueden alcanzarse cambiando la proporción o las características de la mezcla y son más económicos que el uso de aditivos (Gomero Cervantes, 2006).

2.4.6 Adición

La incorporación de diversas sustancias a la mezcla de concreto puede utilizarse para mejorar las propiedades en estado fresco y en estado endurecido. Se utilizan principalmente para mejorar propiedades físicas como la trabajabilidad, la durabilidad, y mecánicas, como la resistencia. Estos materiales permiten al fabricante diseñar la mezcla y adaptarla a la aplicación requerida. Las mezclas de concreto con una elevada proporción de cemento

Portland son propensas a agrietarse y a generar más calor. Los efectos mencionados se controlan hasta cierto punto adicionando otras sustancias a la mezcla.

Las sustancias que se adicionan a la mezcla de concreto, como las cenizas volantes, la escoria y el humo de sílice, permiten al sector de la construcción emplear cientos de millones de toneladas de derivados. Su uso, a su vez, minimiza el gasto del cemento Portland por unidad de concreto. La producción de cemento Portland está asociada a un elevado consumo energético y a emisiones. Este consumo de electricidad se reduce al disminuir la cantidad de cemento Portland utilizado en el concreto (NRMCA, 2020).

2.4.7 Nanopartículas

Las nanopartículas son partículas con al menos una dimensión inferior a 1 μm , y potencialmente tan pequeñas como las escalas de longitud atómica y molecular de 0.2 nm . Las nanopartículas pueden tener forma amorfa o cristalina, y sus superficies pueden actuar como portadoras de gotas de líquido o gases. Hasta cierto punto, la materia en forma de nanopartícula debe considerarse un estado de la materia distinto, además de los estados sólido, líquido, gaseoso y plasmático, debido a sus propiedades distintivas, gran superficie y efectos de tamaño cuántico. Ejemplos de materiales en forma de nanopartículas cristalinas son los fullerenos, el grafeno y los nanotubos de carbono, mientras que las formas sólidas cristalinas tradicionales son el grafito y el diamante. Muchos autores limitan el tamaño de los nanomateriales a 50 nm o 100 nm . La elección de este límite superior se justifica por el hecho de que algunas propiedades físicas de las nanopartículas se aproximan a las del grueso cuando su tamaño alcanza estos valores. Sin embargo, este umbral de tamaño varía según el tipo de material y no puede ser la base de una clasificación de este tipo. Una definición legítima amplía este límite superior de tamaño a 1 μm , clasificándose el rango submicrónico como nano (Buzea et al., 2007).

Hay dos constituyentes primordiales que hacen que los nanomateriales tengan un comportamiento muy distinto a los materiales convencionales: los efectos de superficie, que provocan una escala uniforme de propiedades debido a la fracción de átomos en la superficie, y los efectos cuánticos, que presentan una

conducta discontinua motivado a los efectos de aislamiento cuántico en materiales con electrones deslocalizados. Estos constituyentes afectan a la reactividad química de los materiales, así como a sus propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas y magnéticas. (Buzea et al., 2007).

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis general

Al analizar las nanopartículas de grafeno mejoran las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

3.2 Hipótesis específica

- a) Al analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno mejora la resistencia a la compresión del concreto.
- b) Al analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno mejora el asentamiento del concreto.
- c) Al analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno incrementa la durabilidad del concreto.

3.3 Variables

3.3.1 Variable independiente

Nanopartículas de grafeno

3.3.2 Variables dependientes

Propiedades físicas y mecánicas del concreto fresco y endurecido

3.3.3 Variables intervinientes

Relación agua-cemento, tipo de cemento, empleo de plastificantes, y proporciones de la fracción gruesa y fina de la arena.

3.3.4 Definición conceptual

El grafeno es un material nanométrico bidimensional, consistente en una sola capa de átomos de carbono fuertemente cohesionados mediante enlaces que presentan hibridación sp^2 y dispuestos en una superficie uniforme, ligeramente ondulada, con una estructura semejante a la de un panal de abejas por su configuración atómica hexagonal. El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono, como lo son también el grafito y el diamante. Así, un milímetro de grafito contiene tres millones de capas de grafeno. (El Grafeno,2017).

3.3.5 Definición operacional

El grafeno se puede extraer del grafito por simple exfoliación, pero también puede conseguirse a partir de diversas fuentes basadas en el carbono, uno de los materiales más abundantes de la Tierra. (El Grafeno,2017)

3.3.6 Operacionalización de las variables

El resumen de la operacionalización de las variables se observa en la Tabla 5, y en las Tablas 6 y 7 se muestra el desarrollo completo de la operacionalización.

Tabla N° 5 Resumen de operacionalización de las variables

Variable Dependiente		Variable Independiente
Propiedades del concreto		Nanopartículas de grafeno
Fresco	Trabajabilidad	Proporción (% en masa)
	Resistencia a la compresión	Tipo de grafeno
Endurecido	Durabilidad	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 6 Operacionalización de las variables dependientes

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Escala	Instrumento	Herramientas	Ítems	
Propiedades físicas y mecánicas del concreto	Son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otros, desde el punto de vista del comportamiento físico-mecánico de los materiales (Hibeller, 2005)	El concreto fresco tiene una viscosidad, plasticidad y trabajabilidad, que le permite ser usada para distintos propósitos en la construcción.	Concreto Fresco	Trabajabilidad	Manejabilidad	a/c	Adim.	Normativas y protocolos y metodologías que permiten las estimaciones de las variables.	ASTM C39	Contenido de la tesis	
					Traslado	h	Continua				
					Asentamiento	mm	Continua				
					Plasticidad	a/c	Adim.				
		Las reacciones que ocurren en la mezcla generan un material de consistencia sólida, que proporciona sostén a la estructura.	Concreto Endurecido	Durabilidad	Resistencia	Compresión	MPa		Continua		NTP 339.034
					Tracción	Mpa	Continua		Norma E060		
					Flexión	Mpa	Continua		GB/T 8077-2000		
					Compresión	Mpa	Continua		ASTM 1585-04:2009		
					Cloruro	%, mm	Continua		GB/T 50082-2009		
					Sortividad	mm/s ^{1/2}	Continua				
			Acidez	%	Continua						
			Vida útil	Tiempo	Años	Continua					

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

4.1 Método de investigación

En esta investigación el método empleado es el deductivo, ya que la finalidad es mejorar las propiedades físico mecánicas del concreto en relación a su variable independiente que son las nanopartículas de grafeno. Los datos se recopilan mediante información ya existente del tema de estudio.

4.2 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo experimental de nivel descriptivo, ya que los datos que fueron obtenidos de las diferentes investigaciones, permitieron demarcar una tendencia en cuanto al efecto del nivel de grafeno sobre ciertas propiedades del concreto fresco (trabajabilidad) y endurecido (resistencia a la compresión, durabilidad y vida útil), sin hacer pruebas de hipótesis basadas en la estadística inferencial ni generando información nueva a partir de la experimentación.

4.3 Nivel de investigación

En ese sentido, el nivel de la investigación es descriptiva, ya que describe el comportamiento del concreto al momento presente cuando se le ha adicionado grafeno. Por la misma razón, esta investigación no se planificó con detalle, estuvo circunscrita a los objetivos del trabajo, pero desde una perspectiva general, sin una planificación detallada y minuciosa (Hernández et al., 2010). Se empleó un diseño emergente, donde se realiza la codificación abierta de la cual emergen las categorías (que se generaron a partir de la revisión de la información registrada en los artículos) que luego fueron conectadas entre sí para determinar el efecto del grafeno sobre las propiedades del concreto fresco y endurecido.

4.4 Diseño de la investigación

Para dirigir la búsqueda de la información y seleccionar los artículos y las tesis que permitieron responder a las preguntas de la investigación, se siguieron las recomendaciones sugeridas por Moher et al. (2009) para la ejecución de revisiones sistemáticas y metanálisis. Se emplearon como palabras clave de búsqueda “concreto, grafeno, durabilidad, resistencia, vida útil” o “concrete, graphene, durability, strength, durability, service life” con los separadores booleanos “and” y

“or” (Cooper et al., 2009). Por limitaciones de tiempo para manejar el volumen de información, fueron seleccionadas las primeras 18 (15 artículos y tres tesis nacionales) referencias más relevantes en torno al tema de estudio, que incluyeran las palabras clave, en los idiomas y el intervalo de tiempo seleccionado.

4.5 Población y muestra

Esta tesis es una revisión bibliográfica en torno a la adición de nanopartículas de grafeno y sus efectos sobre ciertas propiedades del concreto.

4.5.1 Población

La población de estudio estuvo conformada por las revistas científicas y las tesis publicadas en los últimos cinco años (2018-2022), escritos en idioma inglés y español, y que estén alojados en la base de datos de Science Direct o en repositorios de tesis de diferente nivel, localizables mediante el motor de búsqueda académico Scholar Google.

4.5.2 Muestra

La muestra de esta investigación son los ensayos de resistencia a la compresión, asentamiento, durabilidad y vida útil realizados en los artículos de referencia.

4.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la elaboración de esta investigación se ejecutó un análisis documental, el cual consistió en una búsqueda sistemática, selección, organización y análisis de las publicaciones y las tesis que fueron de interés para establecer los efectos en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, por la adición de nanopartículas de grafeno a la mezcla. La técnica empleada en esta investigación es una observación documental, que reside en indagar, escoger, organizar y analizar un conjunto de artículos científicos para dar respuestas a las interrogantes de investigación planteadas (Tobon & Hernández, 2016). Dada las características de este trabajo, el autor de la investigación es la herramienta principal del estudio, ya que este fue quien diseñó, aplicó, seleccionó y analizó cada uno de los documentos que son la base para la presente tesis (Hernández et al., 2010). Para lograr recolectar los datos, se esbozó

una hoja de cálculo en Excel para recabar la data obtenida partir de la búsqueda de la información sensible, que permitió establecer las conclusiones del trabajo.

4.7 Descripción de procedimiento y análisis

Luego de seleccionar cada uno de los artículos, se revisó de forma exhaustiva para extraer los datos en torno a las variables dependientes del estudio. A partir de esos datos, se construyeron gráficos de barras que permitieron describir la tendencia observada y verificar cada una de las hipótesis previamente establecidas.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Resultados de la Investigación

Desde el desarrollo del concreto, los científicos han centrado incesantemente sus esfuerzos en mejorar su durabilidad, ya que las estructuras que se hacen con este material están continuamente expuestas a duras condiciones climáticas, así como a agentes agresivos y nocivos.

El desarrollo de materiales nanotecnológicos, representó un verdadero avance en la tecnología del concreto, y entre ellos, los derivados del grafeno surgieron como los componentes con mayor expectativa. Sin embargo, aunque numerosos investigadores ya han revelado la influencia beneficiosa del grafeno y sus derivados en las propiedades mecánicas, la microestructura y la porosidad de los compuestos de cemento, los estudios similares sobre las propiedades relacionadas con la durabilidad y otras propiedades de interés siguen siendo limitados. A continuación, se presentan los resultados de la revisión de la literatura reciente en relación a esta importante área de estudio.

Determinación del porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la resistencia a la compresión del concreto.

Artículo 1. Influencia del tamaño de las partículas de grafeno prístino en las propiedades fisicoquímicas, microestructurales y mecánicas de los morteros de cemento Portland (Ho et al., 2020).

- Tipo de grafeno: Se empleó una molécula de grafeno poco modificada denominada grafeno prístino, que por lo general se obtiene mediante exfoliación con poca alteración de los enlaces entre los átomos.
- Contenido de la mezcla: la mezcla de concreto se preparó de manera usual con arena, cemento y agua. La relación agua-cemento fue de 0,48, y se incorporó un superplastificante.
- Método de ensayo: La medida de la resistencia a la compresión ($f'c$) se realizó en cubos de cemento a los 7 y 28 días, de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C109/C109M-07.
- Resultados:

Tabla N° 8 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno y en función del tamaño de partícula del grafeno (28 días).

% Grafeno	Tamaño de partícula (μm)	f'c (MPa)
0,00	-	41.96
0.07	5	43.85
0.07	43	45.17
0.07	56	56.33
0.07	73	54.58

Fuente: Ho et al. (2020).

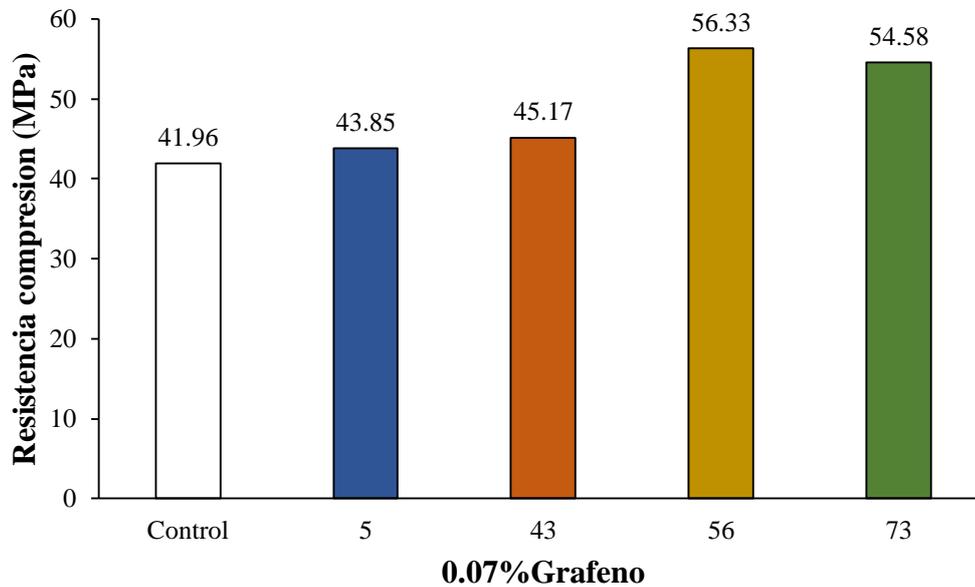


Figura N° 2 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno y en función del tamaño de partícula de grafeno (28 días)

Fuente: Ho et al. (2020).

Artículo 2. Estudio sistemático de los morteros premezclados EN-998-2 modificados con materiales a base de grafeno (Chougan et al., 2019).

- Tipo de grafeno: Se empleó óxido de grafeno (GO), obtenido mediante oxidación química del grafeno por el método de Hummer.
- Contenido de la mezcla: La mezcla de concreto se preparó con las proporciones de cemento, arena y limo sugeridas por la norma ASTM C109. Se trabajó con dos proporciones de agua-cemento: 0,18-0,20.
- Método de ensayo: La medida de la compresión se realizó en cubos de concreto a los 28 días, con las normas ASTM C348-02 y ASTM C349-02.
- Resultados:

Tabla N° 9 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno (28 días).

% Óxido de Grafeno	$f'c$ (MPa)	$f'c$ (MPa)
Control	30	30
0,01	24	24
0,1	27.5	27,5
0,2	32.5	32,5

Fuente: Chougan et al. (2019).

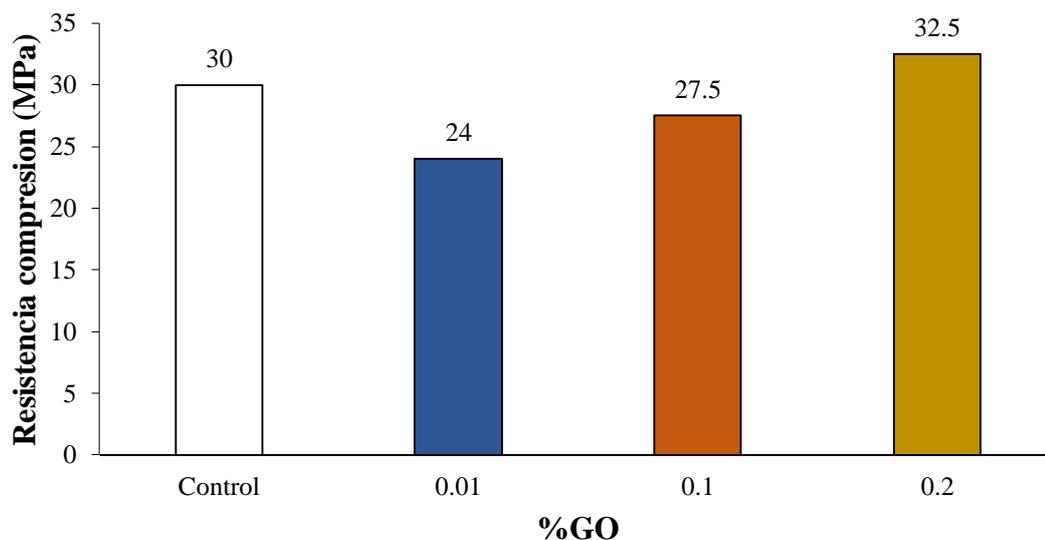


Figura N° 3 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno (28 días).

Fuente: Chougan et al. (2019).

Artículo 3. Síntesis, caracterización y aplicación del óxido de grafeno en sistemas cementantes autoconsolidantes (Ullah et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Se empleó óxido de grafeno (GO), obtenido mediante oxidación química de grafito comercial por el método de Hummer.
- Contenido de la mezcla: Se trabajó con relación agua-cemento de 0,45 y se adicionó una pequeña dosis de policarboxilato a la mezcla de concreto para tener una trabajabilidad adecuada.
- Método de ensayo: Se aplicó una fuerza constante de 0,25 MPa/seg a un bloque de concreto a los 28 días.
- Resultados:

Tabla N° 10 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno (28 días)

% Óxido de Grafeno	f'c (MPa)
Control	33,9
0,01	41,75
0,03	50,25
0,05	53,35

Fuente: Ullah et al. (2021).

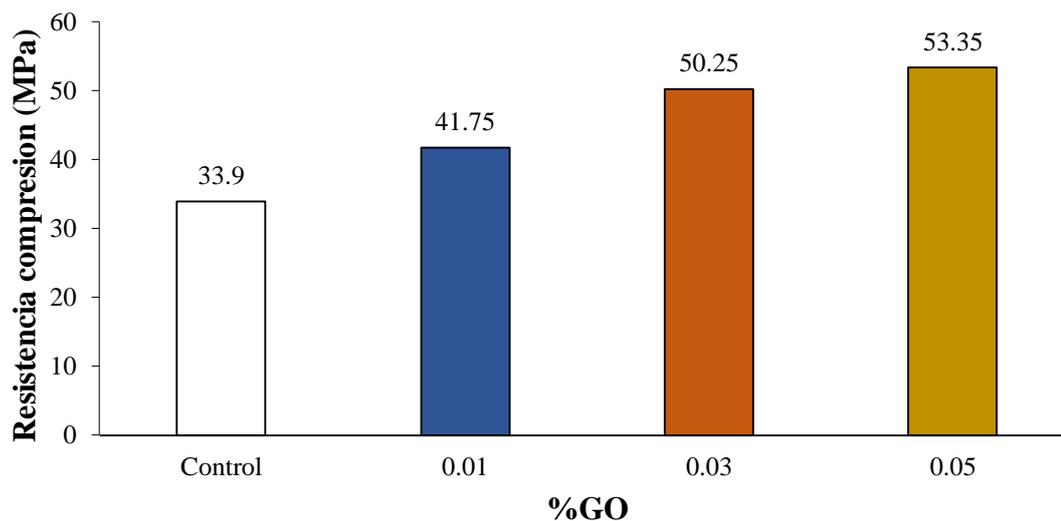


Figura N° 4 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno (28 días)

Fuente: Ullah et al. (2021).

Artículo 4. Compuesto de pasta de concreto nanoreforzado con grafeno funcionalizado y nanoplaquetas de grafeno prístinas (Qureshi & Panesar, 2020).

- Tipo de grafeno: Se utilizan tres tipos de grafeno: el natural pristino (G) en forma de nanoplaquetas, óxido de grafeno (GO), y óxido de grafeno reducido (rGO). La oxidación del grafeno se realizó con el método de Hummer modificado, y se obtuvo la forma reducida por reacción con el ion borohidruro.
- Contenido de la mezcla: Se trabajó con relación agua-cemento de 0,45 y el concreto se preparó de acuerdo a la norma ASTM C109.
- Método de ensayo: Se aplicó una fuerza constante de 2,4 KN/seg a un cubo de concreto de 50 mm de lado.
- Resultados:

Tabla N° 11 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno, óxido de grafeno reducido y grafeno. (28 días)

Contenido	f'c (MPa)		
	Óxido de Grafeno	Óxido de Grafeno reducido	Grafeno
Control	50	50	50
0,01	52,5	52	63
0,02	56	52,5	67,5
0,04	62,5	63	55
0,08	62,5	57,5	55
0,16	62,5	62,5	60

Fuente: Qureshi & Panesar (2020).

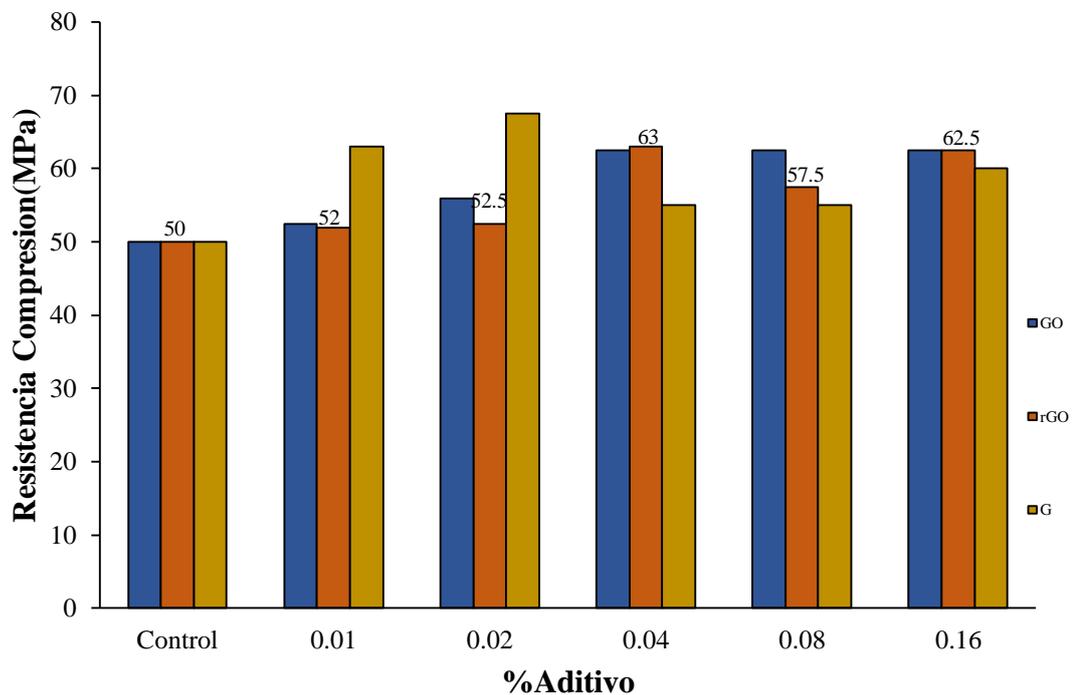


Figura N° 5 Resistencia a la compresión en concreto con óxido de grafeno (GO), óxido de grafeno reducido (rGO) o grafeno (G) (28 días)

Fuente: Qureshi & Panesar (2020).

Artículo 5. Caracterización mecánica y perceptiva de materiales compuestos de alto rendimiento a base de cemento con nanoplaquetas de grafeno tratadas con silano (Guo et al., 2020).

- Tipo de grafeno: Se trabajó con grafeno funcionalizado con grupos silano (ST-GNP).
- Contenido de la mezcla: Se trabajó con relación agua-cemento de 0,45 y el concreto se preparó de acuerdo a la norma ASTM C109.

- Método de ensayo: Se determinó la fuerza de compresión a los 28 días bajo la norma EN-196-1 en bloques de concreto de 40x40x160 mm de lado.
- Resultados:

Tabla N° 12 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno funcionalizado con grupos silano. (28 días)

%ST-GNP	f'c (MPa)
Control	125
0,01	128
0,05	140
0,1	120

Fuente: Guo et al. (2020).

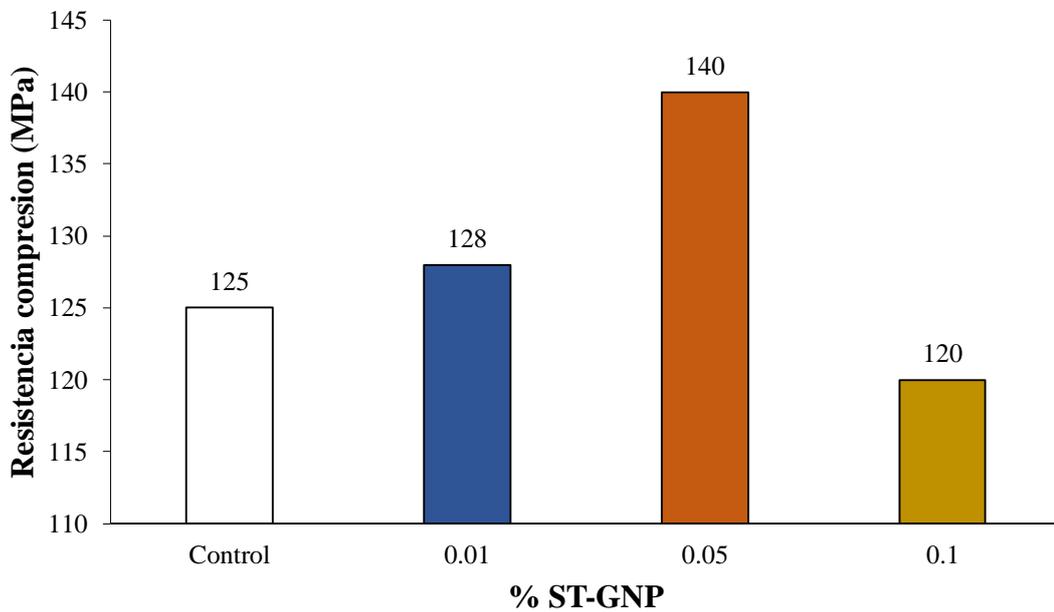


Figura N° 6 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno funcionalizado con grupos silano (28 días).

Fuente: Guo et al. (2020).

Artículo 6. Cinética de hidratación, estructura de los poros, red 3D del silicato de calcio y comportamiento mecánico de los compuestos de cemento reforzados con óxido de grafeno (Zhao et al., 2018).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno (GO), obtenido por el conocido método de Hummer.

- Contenido de la mezcla: Se evaluaron varias proporciones de agua-cemento (0,29; 0,36; 0,45; y 0,5). El concreto se preparó de acuerdo a la norma ASTM C1738-11 y ASTM c305-14).
- Método de ensayo: Se determinó la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, en bloques de concreto de 40x40x160 mm de lado.
- Resultados:

Tabla N° 13 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno, a diferentes niveles de la relación a/c (28 días)

a/c	f'c (MPa)			
	0,29	0,36	0,45	0,5
Control	85	75	58	55
0,05	90	88	62	60
0,1	98	95	70	65
0,2	95	90	68	70
0,3	90	88	65	65

Fuente: Zhao et al. (2018).

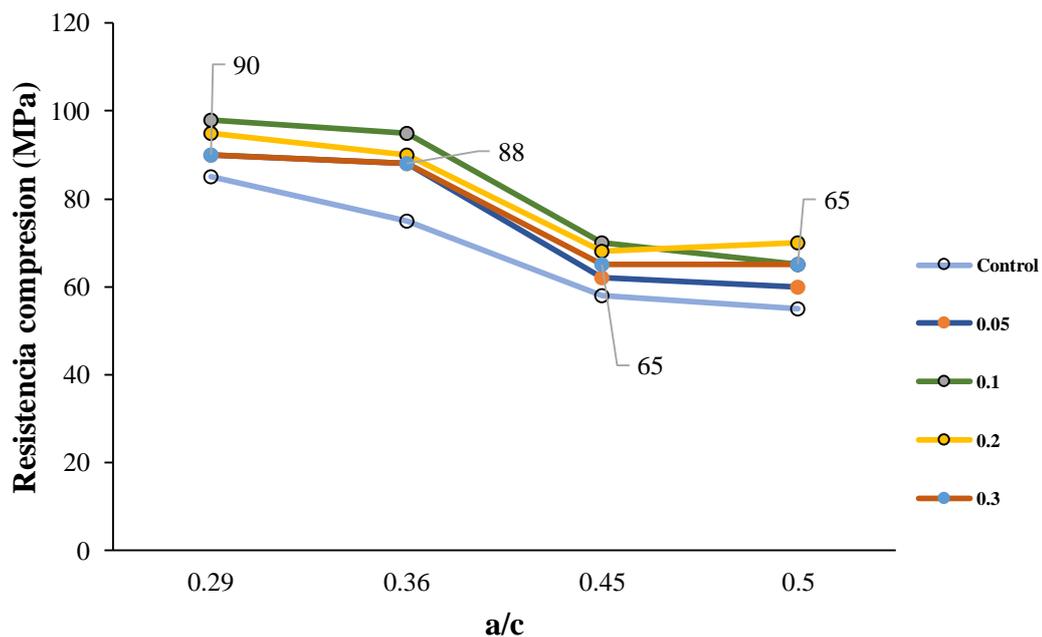


Figura N° 7 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno, a diferentes niveles de la relación a/c (28 días)

Fuente: Zhao et al. (2018).

Artículo 7. Dispersión de óxido de grafeno asistida por naranja de metilo en medio alcalino para mejorar las propiedades mecánicas y la fluidez de los compuestos de cemento portland ordinario (Sheng et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno (GO), obtenido por el método de Hummer.
- Contenido de la mezcla: La proporción de agua-cemento empleada fue de 0,37. Se incorporó un éter policarboxílico superplastificante a la mezcla de concreto.
- Método de ensayo: Se determinó la resistencia a la compresión a los 3 y 28 días, bajo la norma GB/T1767-1999.
- Resultados

Tabla N° 14 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno (28 días).

% Óxido de Grafeno	f'c (MPa)
Control	45
0,01	61
0,03	63
0,05	61

Fuente: Sheng et al. (2021).

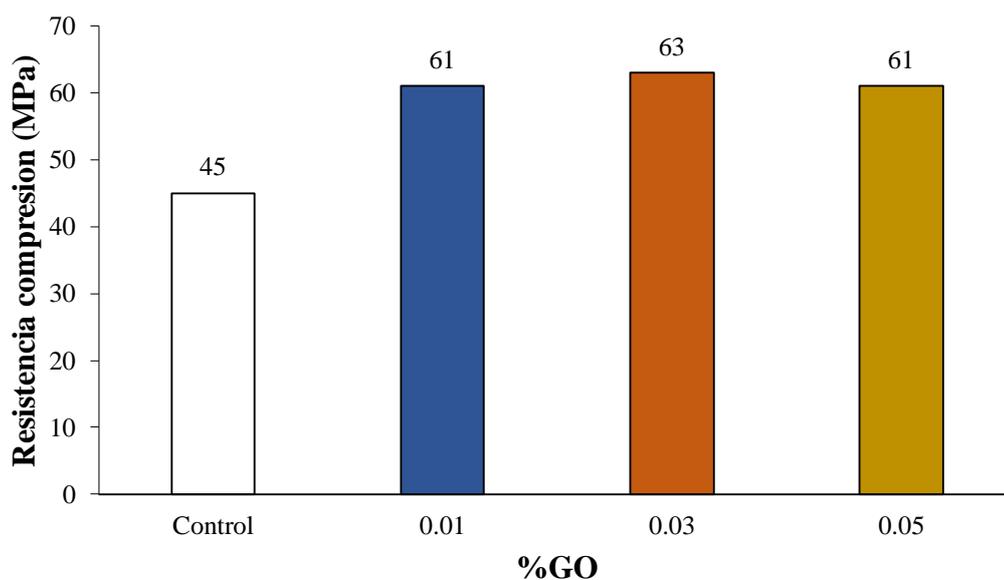


Figura N° 8 Resistencia a la compresión del concreto con óxido de grafeno (28 días)

Fuente: Sheng et al. (2021).

Artículo 8. Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019 (Apaza & Art, 2019).

- Tipo de grafeno: Grafeno comercial. Se emplearon dosis entre 0,05-0,10% en peso.
- Contenido de la mezcla: Se preparó el concreto de forma convencional, con una proporción agua-cemento: 0,6.

- Método de ensayo: La resistencia a la compresión se midió empleando la Norma Técnica Peruana NTP-339.034 basada en la ASTM C39/C39M-05.
- Resultados

Tabla N° 15 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno (28 días)

% Grafeno	f'c (MPa)
Control	21
0,05	23,7
0,1	24

Fuente: Apaza & Art (2019).

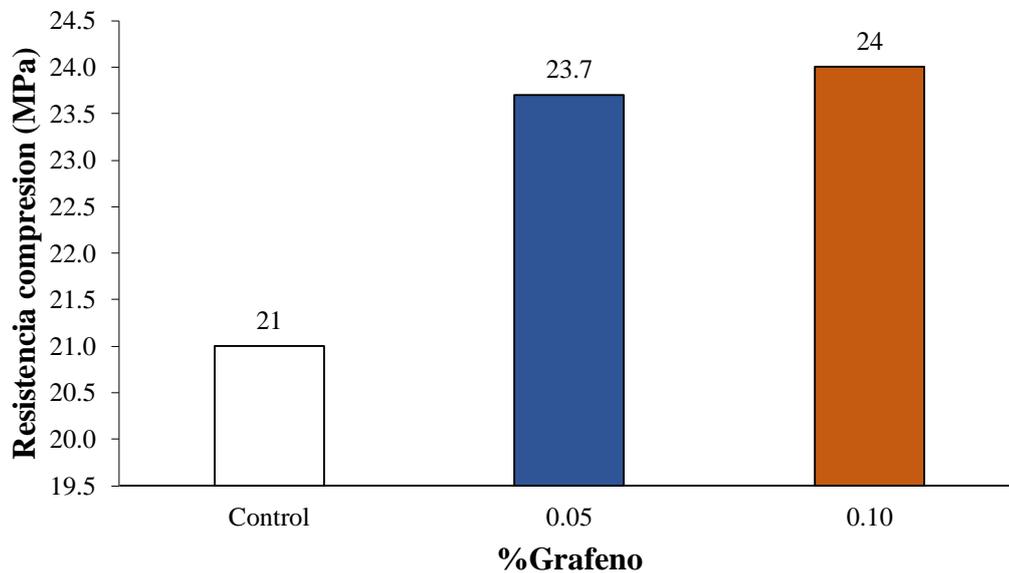


Figura N° 9 Resistencia a la compresión del concreto con grafeno (28 días)

Fuente: Apaza & Art (2019).

Artículo 9. Uso de polvo de grafito como aditivo en el concreto $f'c$ 210 kg/cm² a fin de mejorar las propiedades mecánicas del concreto (Alvarado & Roque, 2020).

- Tipo de grafeno: Grafito comercial en forma de polvo. Se adicionaron cantidades entre 2,0; 2,5 y 3,0% en peso.
- Contenido de la mezcla: Se preparó el concreto de forma convencional, con una proporción agua-cemento: 0,57.
- Método de ensayo: La resistencia a la compresión se midió empleando la Norma Técnica Peruana NTP-339.034 basada en la ASTM C39/C39M-05.
- Resultados

Tabla N° 16 Resistencia a la compresión del concreto con grafito (28 días)

%Grafito	f'c (MPa)
Control	28,4
2,0	28,7
2,5	29,2
3,0	29,6

Fuente: Alvarado & Roque (2020).

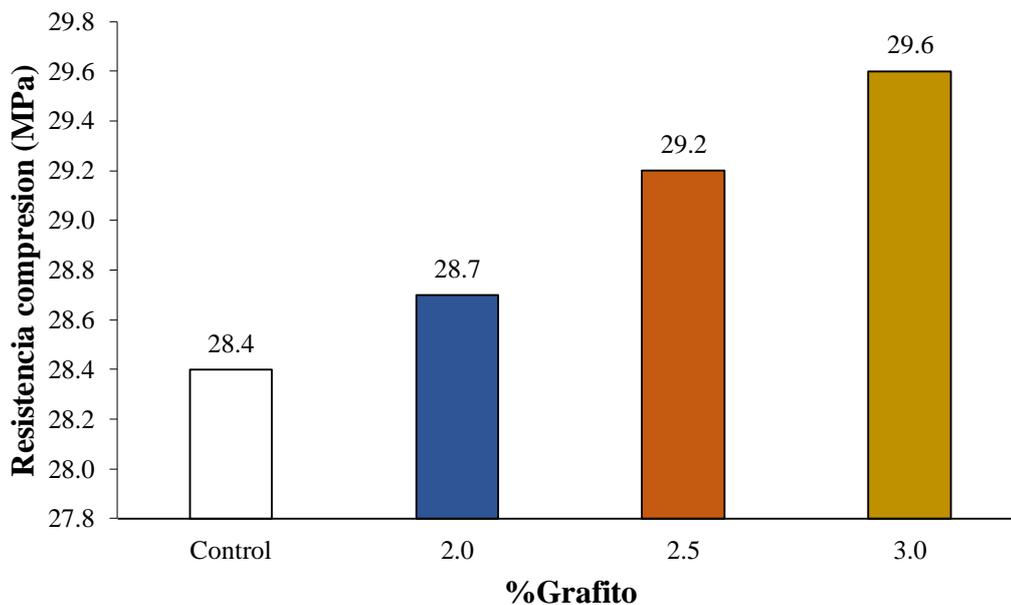


Figura N° 10 Resistencia a la compresión del concreto con grafito (28 días)

Fuente: Alvarado & Roque (2020).

Determinación del porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la trabajabilidad del concreto.

Artículo 10. Propiedades físicas del hormigón con nanohojas de óxido de grafeno (Wu et al., 2019).

- Tipo de grafeno: Nanohojas de óxido de grafeno sintetizado por el método de Hummer modificado. Se emplearon dosis entre 0,02-0,08% en peso.
- Contenido de la mezcla: Se preparó el concreto de forma convencional, con una proporción agua-cemento: 0,5.
- Método de ensayo: El asentamiento se midió empleando el método GB/T50080-2002
- Resultados

Tabla N° 17 Slump del concreto fresco con óxido de grafeno

% Óxido de Grafeno	Slump (mm)
Control	183
0,02	176
0,03	171
0,04	168
0,06	162
0,08	154

Fuente: Wu et al. (2019).

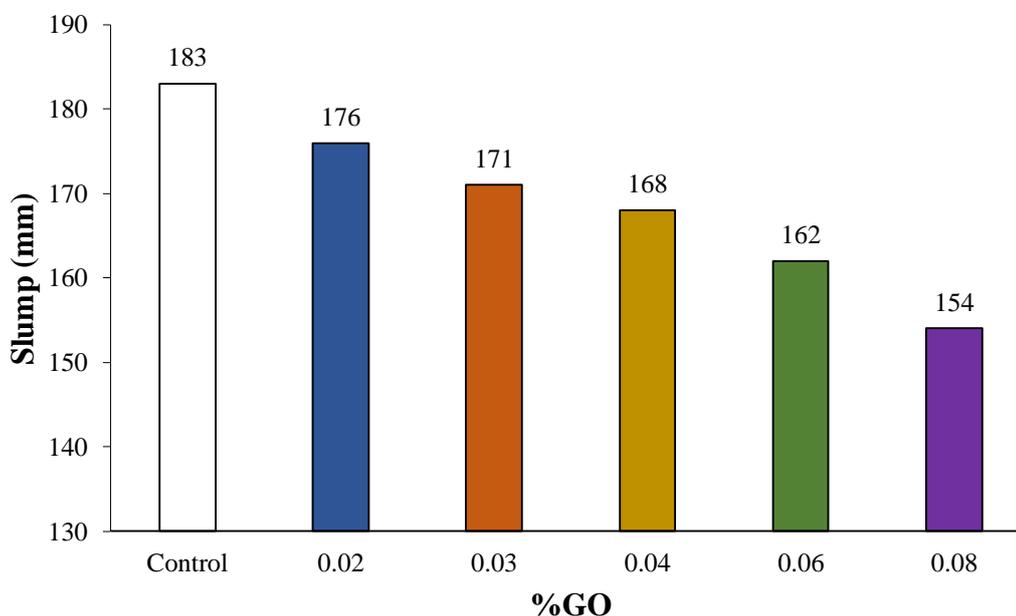


Figura N° 11 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (GO%)

Fuente: Wu et al. (2019).

Artículo 11. Viabilidad de la adición de nanoescamas de óxido de grafeno (GONF) en un compuesto de cemento (An et al., 2018).

- Tipo de grafeno: Nanoescamas de óxido de grafeno (GONF) producidas por un proceso mecánico-químico. Se aplicaron dosis entre 0,01-1%.
- Contenido de la mezcla: Mezcla de concreto convencional con relación agua-cemento de 0,5
- Método de ensayo: Ensayo de mini-volumen (mini-slump test)
- Resultados

Tabla N° 18 Slump del concreto con oxido de grafeno en polvo solución

%GONF	Slump (mm)	
	Polvo	Solución
Control	155,48	155,48
0,01	155,32	155,42
0,05	121,28	129,05
0,1	116,61	122,83
0,5	107,28	111,95
1	93,29	105,73

Fuente: An et al. (2018).

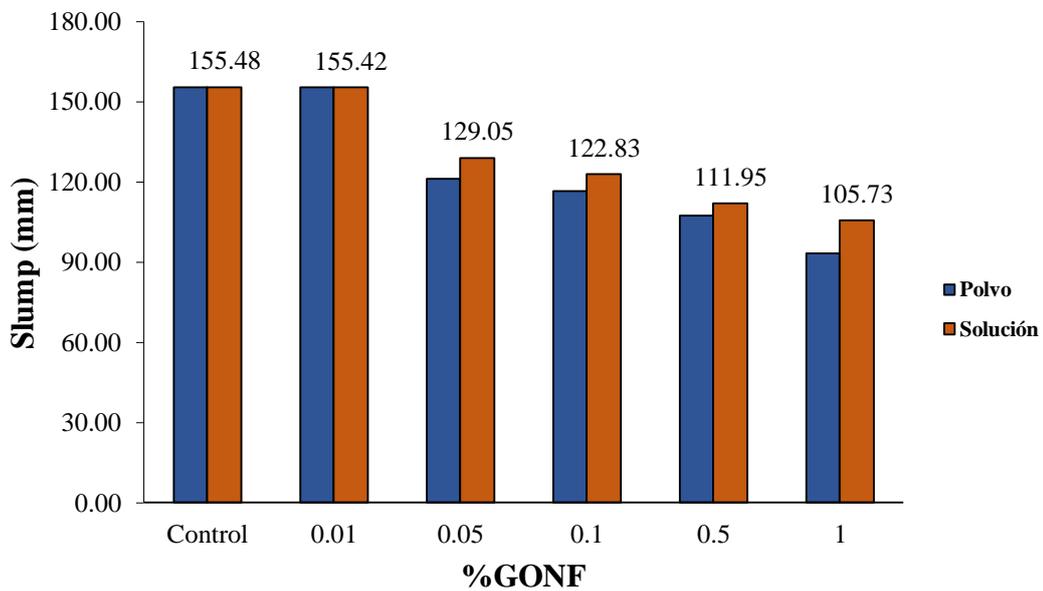


Figura N° 12 Slump del concreto con oxido de grafeno en polvo y solución

Fuente: An et al. (2018).

Artículo 12. Avances en la investigación sobre el efecto individual del óxido de grafeno en materiales a base de cemento y su efecto sinérgico con otros nanomateriales (Liu et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno
- Contenido de la mezcla: Concreto
- Método de ensayo: Ensayo de mini-volumen
- Resultados

Tabla N° 19 Slump del concreto fresco con oxido de grafeno (%GO)

%GO	Slump (mm)
Control	180
0,01	175
0,03	170
0,05	160
0,08	140
0,1	130

Fuente: Liu et al. (2021).

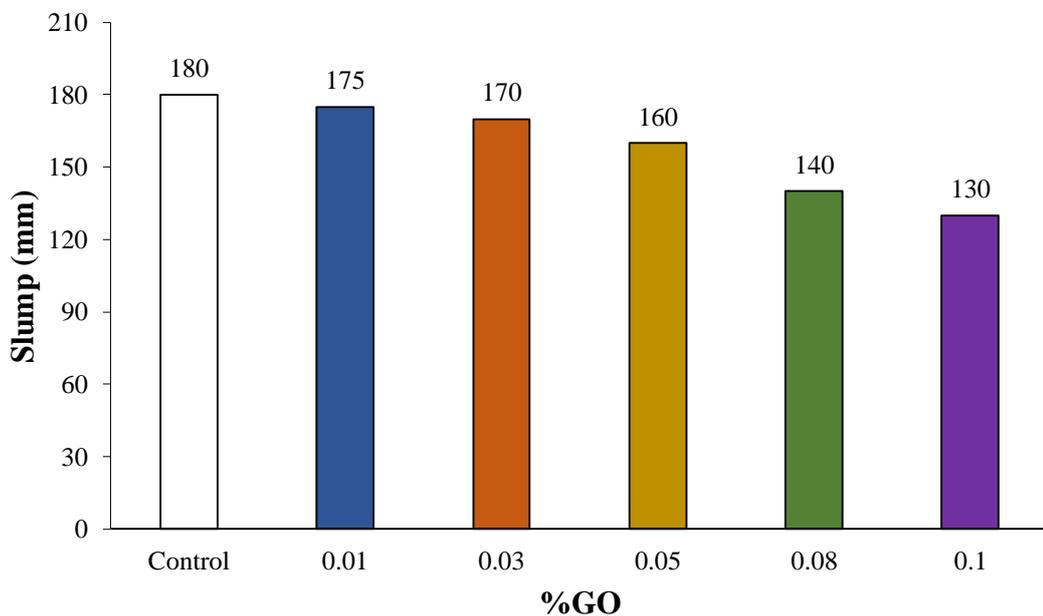


Figura N° 13 Slump del concreto con oxido de grafeno (%GO).

Fuente: Liu et al. (2021).

Artículo 13. Efecto del óxido de grafeno en las prestaciones mecánicas y de durabilidad del concreto (Devi & Khan, 2020).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno obtenido por oxidación química. Se trabajo en el intervalo de concentraciones de 0,02-0,08.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, con una relación agua-cemento: 0,5.
- Método de ensayo: Se evaluó con un cono de asentamiento, con la norma 15:6461(Parte VII)-1973.
- Resultados

Tabla N° 20 Slump del concreto con oxido de grafeno (%GO).

%GO	Slump (mm)
Control	100
0,02	97,5
0,04	96,5
0,06	96
0,08	95

Fuente: Devi & Khan (2020).

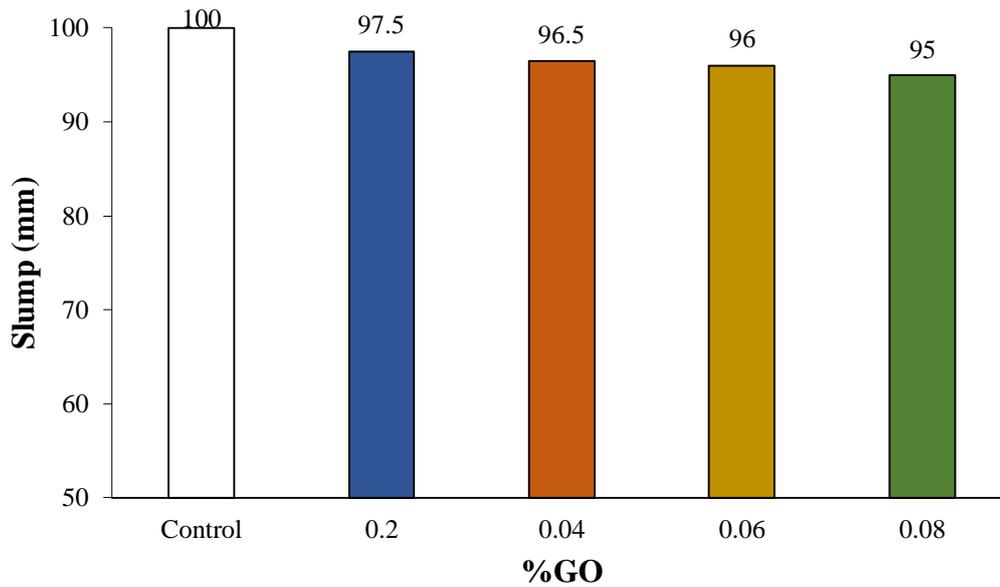


Figura N° 14 Slump del concreto con oxido de grafeno (%GO)

Fuente: Devi & Khan (2020).

Artículo 14. Los efectos de los nanohíbridos de óxido de grafeno y sílice sobre la trabajabilidad, la hidratación y las propiedades mecánicas de la pasta de cemento Portland (Mowlaei et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Nanohojas de silicio y grafeno (GOS) obtenidas por el método del solgel. Se trabajo en el intervalo de concentraciones de 0,025-0,10.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, con una relación agua-cemento: 0,5.
- Método de ensayo: Se evaluó el asentamiento con el mini-slump test.
- Resultados

Tabla N° 21 Slump del concreto en función al contenido del nanocompuesto de grafeno y silicio (%GOS).

%GOS	Slump (mm)
Control	130
0,025	97,5
0,05	96,5
0,1	96

Fuente: Mowlaei et al. (2021).

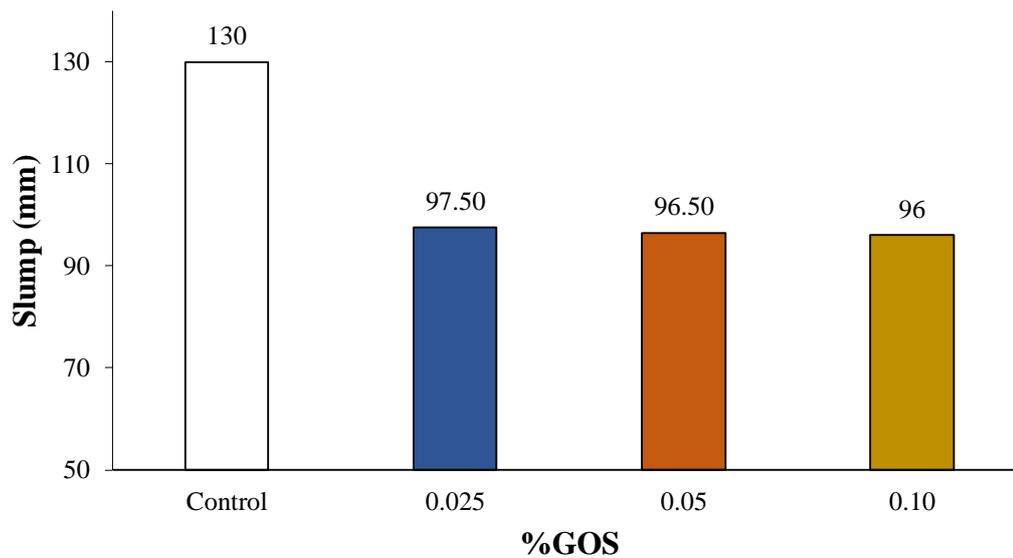


Figura N° 15 Slump del concreto en función al contenido del nanocompuesto de grafeno y silicio (%GOS).

Fuente: Mowlaei et al. (2021).

Artículo 15. Estudio de las propiedades de dispersión, mecánicas y de microestructura de la pasta de cemento que incorpora láminas de grafeno (Liu et al., 2019).

- Tipo de grafeno: El grafeno se trabajó en el intervalo de concentraciones de 0,01-0,05.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, con una relación agua-cemento: 0,5. Se agregó como tensoactivo el dodecilsulfonato de sodio.
- Método de ensayo: Se evaluó con un cono de asentamiento, con la norma GB/T 8077-2000.
- Resultados:

Tabla N° 22 Slump del concreto en función al contenido de grafeno.

% Grafeno	Slump (mm)
0,01	104
0,025	100
0,05	95

Fuente: Liu et al. (2019).

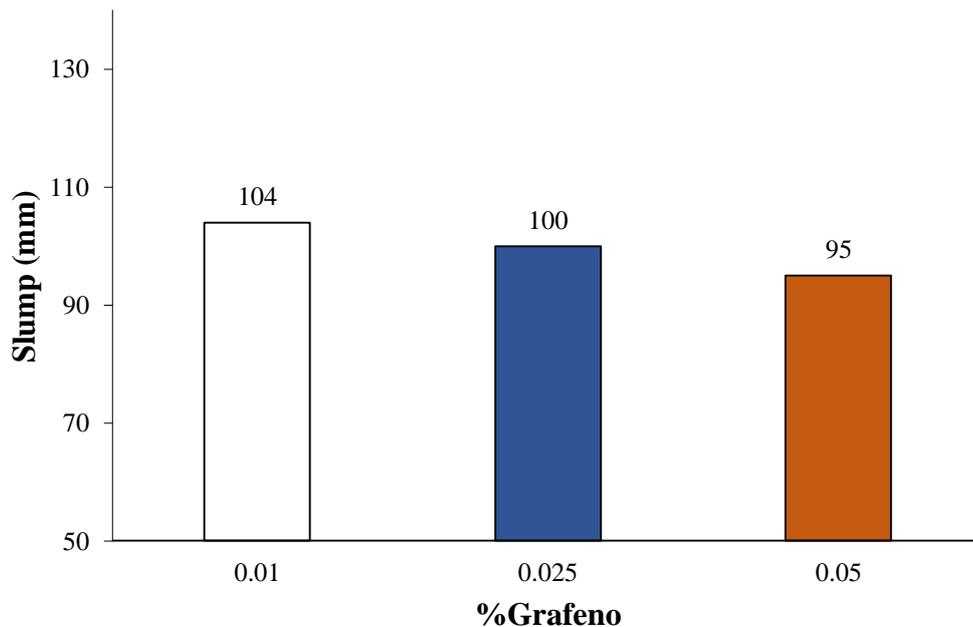


Figura N° 16 Slump del concreto en función al contenido de grafeno.

Fuente: Liu et al. (2019).

Determinación del porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la durabilidad y la vida útil del concreto.

Artículo 16. Dispersión de óxido de grafeno asistida por naranja de metilo en medio alcalino para mejorar las propiedades mecánicas y la fluidez de los compuestos de cemento portland ordinario (Sheng et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno (GO), obtenido por el conocido método de Hummer.
- Contenido de la mezcla: La proporción de agua-cemento empleada fue de 0,37. Se adicionó un éter policarboxílico superplastificante a la mezcla de concreto.
- Método de ensayo: Se determinó el flujo eléctrico para evaluar la penetración del cloruro, bajo la norma GB/T 50082-2009.
- Resultados

Tabla N° 23 Efecto del contenido de óxido de grafeno (GO) y naranja de metilo (NM) sobre la difusión del ion cloruro en el concreto.

Adición	%	Coefficiente de difusión del ión cloruro ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
Control	0	6,1
NM	0,03	6,5
GO	0,03	5,2
NM-GO	0.03/0.03	4,8

Fuente: Sheng et al. (2021).

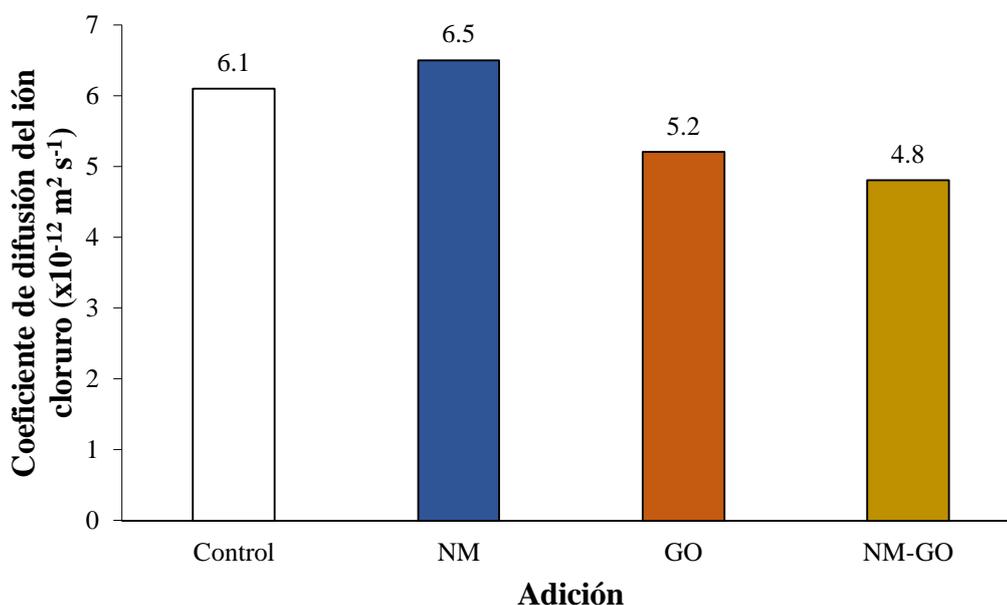


Figura N° 17 Coeficiente de difusión de ion cloruro a través del concreto

Nota. Control, sin aditivo; NM, con anaranjado de metilo; GO, con 0,03% de óxido de grafeno; NM + GO ambos al 0,03%. Fuente: Sheng et al., (2021).

Artículo 17. Efecto del óxido de grafeno en las prestaciones mecánicas y de durabilidad del concreto (Devi & Khan, 2020).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno obtenido por oxidación química. Se trabajó en el intervalo de concentraciones de 0,02%-0,08%.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, con una relación agua-cemento: 0,5.
- Método de ensayo: Se evaluó la sortividad del agua con la norma ASTM 1585-04:2009.
- Resultados

Tabla N° 24 Sortividad del agua en mezclas con óxido de grafeno.

Días	OF0RCA	OF100RCA	OF100RCA 0.05GO	OF100RCA 0.1GO	OF100RCA 0.05GO _{bm}	OF100RCA 0.1GO _{BM}
28	0,033	0,041	0,038	0,036	0,038	0,035
56	0,028	0,038	0,036	0,033	0,036	0,032
90	0,018	0,034	0,028	0,025	0,029	0,022
120	0,015	0,028	0,023	0,019	0,022	0,017

Fuente: Devi & Khan (2020).

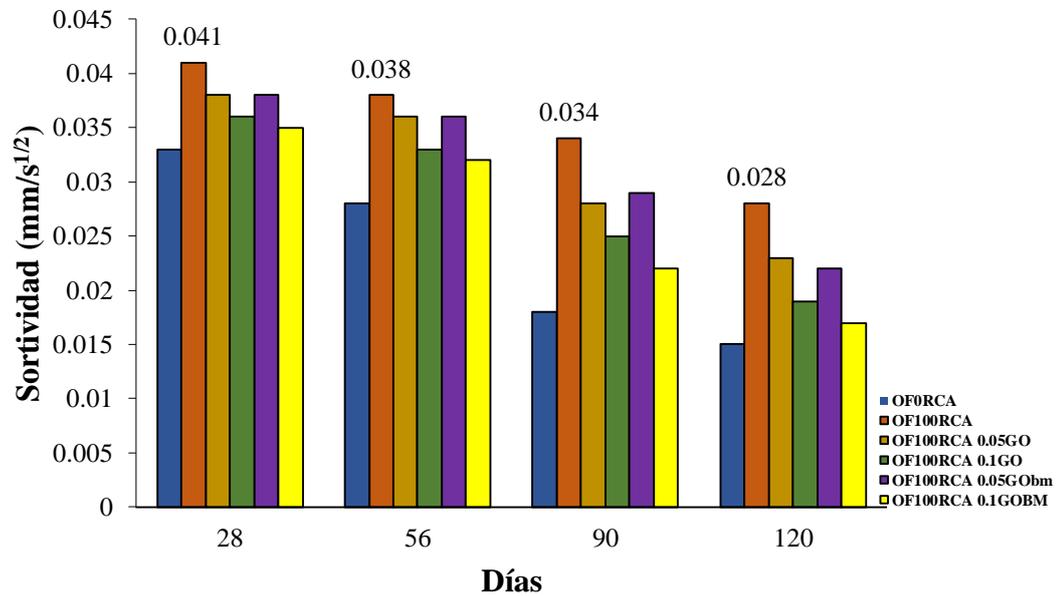


Figura N° 18 Sortividad del agua (en mm/s^{1/2}) en concretos tratados con óxido de grafeno por día.

Nota. OF0RCA y OF100RCA son blancos; los demás contienen GO en las cantidades indicadas en la imagen en porcentaje; RC, concreto reciclado; bm, es un tipo de GO.

Fuente: Devi y Khan (2020)

Artículo 18. Efecto del óxido de grafeno en el deterioro de las pastas de concreto expuestas a los ácidos cítrico y sulfúrico (Muthu et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Óxido de grafeno obtenido por oxidación química. Se trabajó en el intervalo de concentraciones de 0,15%-0,90%.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, con una relación agua-cemento de 0,35.

- Método de ensayo: Exposición del concreto a solución acida de ácido fuerte (solución de ácido sulfúrico) y de ácido débil (solución de ácido cítrico).
- Resultados

Tabla N° 25 Pérdidas de masa y área seccional en muestras de concreto modificado con GO tras 14 días de exposición a Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$) y Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)

Adición	%	Ácido Sulfúrico		Ácido Cítrico	
		%Masa Perdida	%Área Perdida	%Masa Perdida	%Área Perdida
GO-0	0	59	69	54	58
GO-1	0,015	56	67	51	55
GO-2	0,03	55	65	49	54
GO-3	0,045	53	63	46	52
GO-4	0,06	52	62	45	51
GO-5	0,075	51,5	61	43	50
GO-6	0,09	51	60	39	48

Fuente: Muthu et al. (2021).

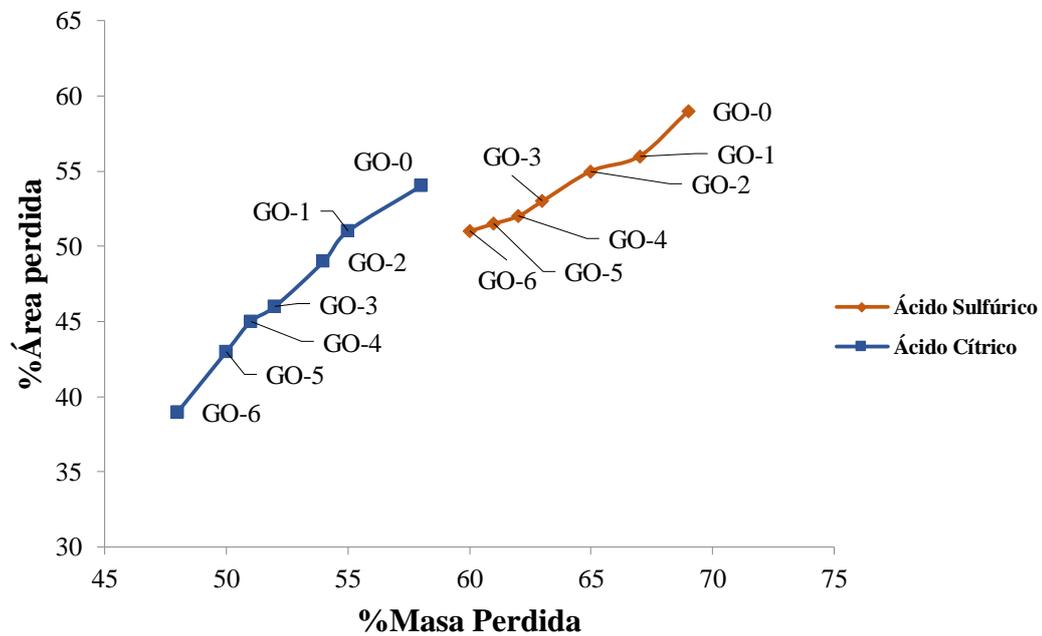


Figura N° 19 Pérdidas de masa y área seccional en muestras de concreto modificado con GO tras 14 días de exposición a $C_6H_8O_7$ y H_2SO_4

Fuente: Muthu et al. (2021).

Artículo 19. Análisis de la influencia del grafeno en la propiedad de durabilidad del concreto F'C 210 kg/cm² Lima- 2020 (Montañez & Zavala, 2020).

- Tipo de grafeno: Grafeno grado reactivo. Se empleó entre 0,5 y 1,0.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, con una relación agua-cemento: 0,60.
- Método de ensayo: Solución de sulfato. Se evaluó la resistencia a la compresión a los 14 días d exposición.
- Resultados

Tabla N° 26 Resistencia a la compresión en concreto con grafeno luego de exposición a 14 días en solución de sulfato de magnesio

%Grafeno	<i>f'c</i> (MPa)
0,0	16,0
0,5	18,8
1,0	17,6

Fuente: Montañez & Zavala (2020).

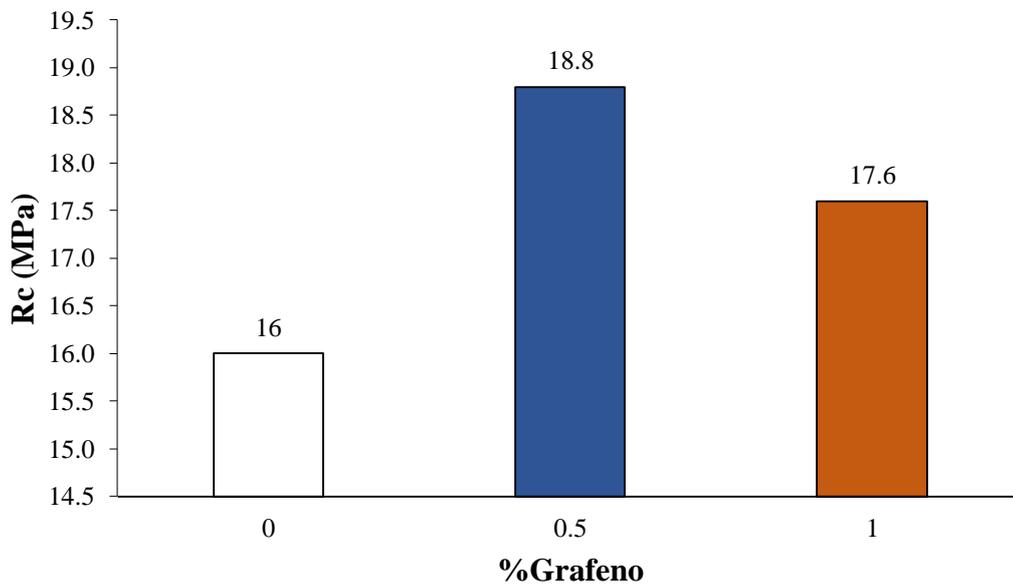


Figura N° 20 Resistencia a la compresión en concreto con grafeno luego de exposición a 14 días en solución de sulfato de magnesio

Fuente: Montañez & Zavala (2020).

Artículo 20. Grafeno exfoliado electroquímicamente para compuestos de cemento de alta durabilidad (Krystek et al., 2021).

- Tipo de grafeno: Se trabajó con grafeno exfoliado electroquímicamente (EEG), en concentraciones que van desde 0,01% hasta 0,10%.
- Contenido de la mezcla: Mezcla para concreto convencional, al que se le adicionó el grafeno.
- Método de ensayo: No se indican los detalles de los experimentos realizados.
- Resultados

Tabla N° 27 Efecto de la exposición al agua, o a una solución con sulfato de sodio (Na_2SO_4) por 56 días, sobre la resistencia a la compresión de bloques de concreto ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) con EEG.

%EEG	Rc	
	H ₂ O	Na ₂ SO ₄
0	49	45
0,010	49	46
0,030	50	47
0,050	52	50
0,075	50	48
0,100	49	48

Fuente: Krystek et al. (2021).

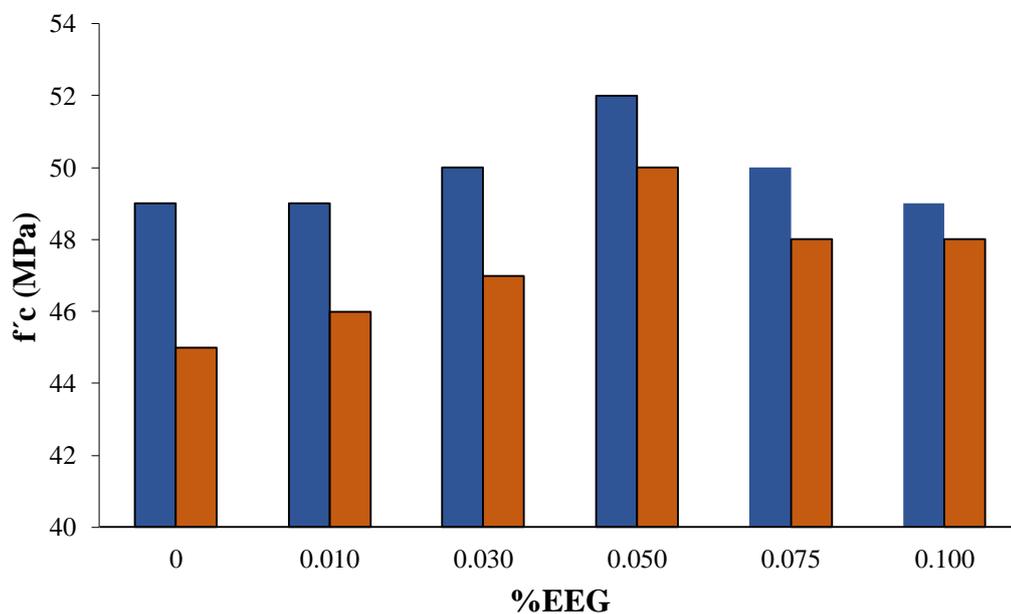


Figura N° 21 Título: Efecto de la exposición al agua, o a una solución con sulfato de sodio (Na_2SO_4) por 56 días, sobre la resistencia a la compresión de bloques de concreto ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) con EEG.

Fuente: Krystek et al. (2021).

Tabla N° 28 Profundidad de penetración del ión cloruro en un cemento con EEG expuesto a solución de cloruro de sodio.

%EEG	Penetración del cloruro (mm)
0,00	8
0,01	7
0,03	5
0,05	4
0,08	6
0,10	8

Fuente: Krystek et al. (2021)

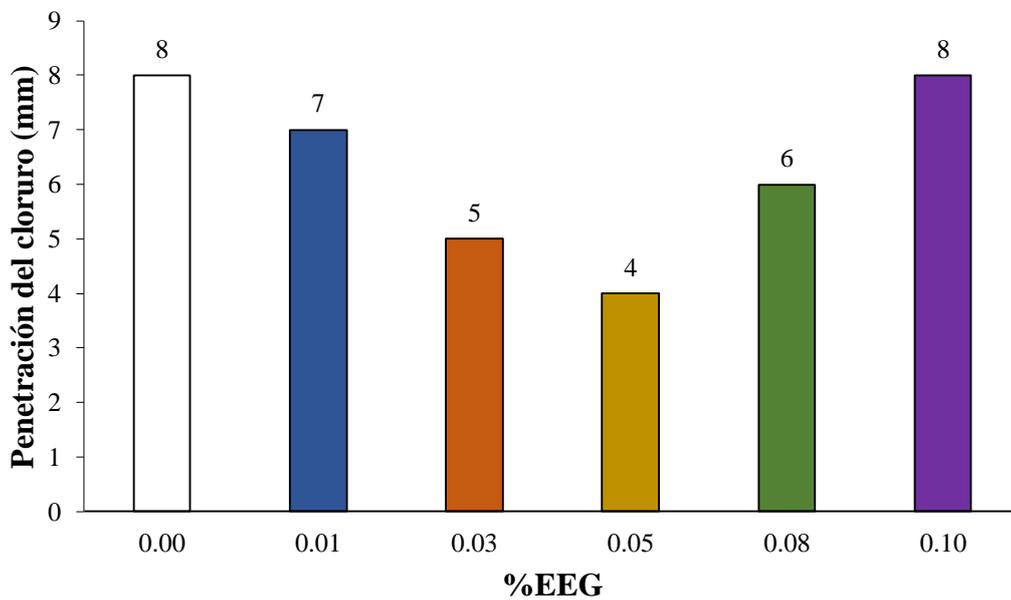


Figura N° 22 Título: Profundidad de penetración del ión cloruro en un concreto con EEG expuesto a solución de cloruro de sodio.

Fuente: Krystek et al. (2021)

Tabla N° 29 Medidas de adsorción de agua: sortividad primaria y secundaria para todas las muestras de concreto.

%EEG	Sortividad Inicial ($\mu\text{m}/\text{s}^{1/2}$)	Sortividad Secundaria ($\mu\text{m}/\text{s}^{1/2}$)
0,000	18,5	16,3
0,010	17,5	16
0,030	17	15,7
0,050	14	15,7
0,075	16,5	16
0,100	18,5	16,2

Fuente: Krystek et al. (2021).

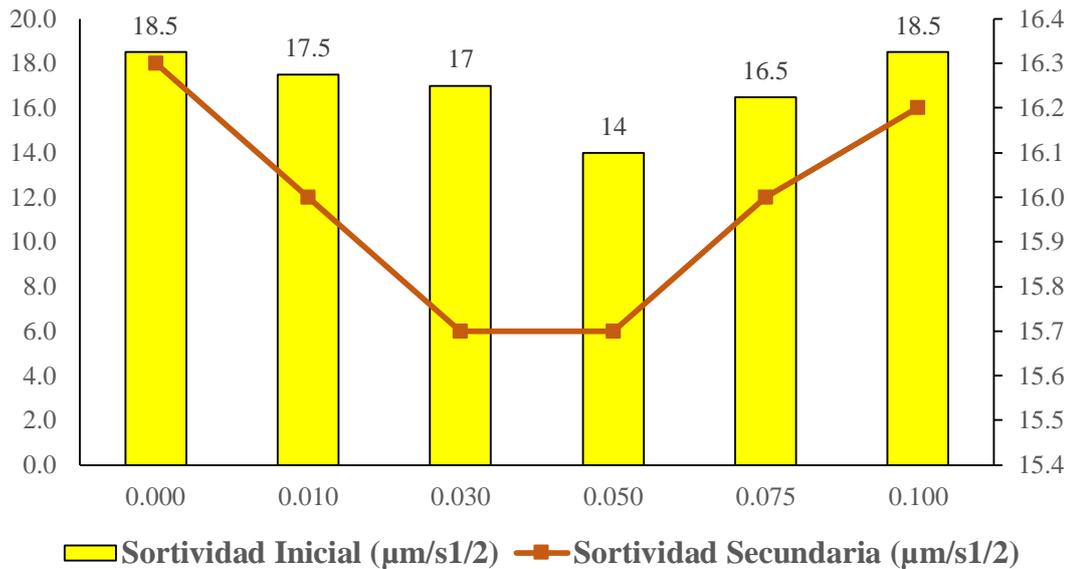


Figura N° 23 Título: Medidas de adsorción de agua: sortividad primaria y secundaria para todas las muestras de concreto.

Fuente: Krystek et al. (2021).

5.2 Análisis e Interpretación de los resultados

Determinación del porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la resistencia a la compresión del concreto.

Artículo 1. Influencia del tamaño de las partículas de grafeno prístino en las propiedades fisicoquímicas, microestructurales y mecánicas de los morteros de cemento Portland (Ho et al., 2020).

En la Figura 2 se observó que la resistencia a la compresión del concreto depende del tamaño de la partícula de grafeno, a un nivel del 0,07% en peso del nanocompuesto. De acuerdo con estos resultados un tamaño de partícula de entre 56 μm y 73 μm parece adecuado para alcanzar un incremento apreciable en la resistencia en el material, que puede alcanzar valores de 56 MPa cuando se compara con el concreto control cuya resistencia es ligeramente inferior a 42 MPa.

Artículo 2. Estudio sistemático de los morteros premezclados EN-998-2 modificados con materiales a base de grafeno (Chougan et al., 2019).

En la Figura N° 3 se observa que pequeñas adiciones de óxido de grafeno a la mezcla de concreto tienen un efecto negativo sobre la resistencia del material a no soportar altas presiones sin fracturarse (disminuye la resistencia a la compresión de 30 MPa en el concreto control hasta 24 MPa en el concreto con 0,01% de óxido de grafeno);

sin embargo, ya en 0,2% de adición del nanocompuesto se alcanza una prestación superior a control (se incrementa hasta 32.5 MPa), lo que sugiere que se puede seguir investigando en esa área.

Artículo 3. Síntesis, caracterización y aplicación del óxido de grafeno en sistemas cementantes autoconsolidantes (Ullah et al., 2021).

En la Figura N° 4 se mantiene la tendencia de lo comentado, en que la presencia de la nanopartícula de óxido de grafeno incrementa la resistencia a la compresión del concreto. En el caso de este mortero autoconsolidante, ya con solo 0,03% de óxido de grafeno se supera de forma significativa la f'_c para la muestra control, que pasa de 33,9 MPa a 53,35 MPa, lo que se traduce en un aumento del 57%.

Artículo 4. Compuesto de pasta de cemento nanoreforzado con grafeno funcionalizado y nanoplaquetas de grafeno prístinas (Qureshi & Panesar, 2020).

En este trabajo se compara las propiedades que otorga la presencia de grafeno y algunos de sus compuestos sobre la resistencia a la compresión del concreto. Estas modificaciones permiten por un lado introducir grupos funcionales a las moléculas de grafeno que sean más polares (tipo oxidrilo), y por otro, que se pueda disminuir el uso de sustancias dispersantes como los surfactantes, para poder incorporar el grafeno prístino. De todos esos compuestos (G, GO y rGO) el grafeno por sí solo muestra un comportamiento superior y con solo 0,02% se aumenta en más de un 30% la resistencia del concreto, pasando de 50 MPa para el material control a 67,5 MPa.

Artículo 5. Caracterización mecánica y perceptiva de materiales compuestos de alto rendimiento a base de cemento con nanoplaquetas de grafeno tratadas con silano (Guo et al., 2020).

El tratamiento químico con derivados del silano para introducir grupos funcionales al grafeno puede generar resultados interesantes, como el que se observa en la Figura N° 6, donde incluso se puede trabajar con bajas concentraciones del derivado del grafeno con silano. Se puede destacar que ya con solo 0,1% del nanocompuesto, se afecta negativa y significativamente la resistencia a la compresión del concreto, disminuyendo de 125 MPa a 120 MPa; por lo que hay que ser muy cuidadosa la evaluación, preparación e incorporación de estos materiales. Con este

nanocompuesto, con la adición de un 0,05% se incrementa la resistencia a la compresión del concreto en un 12% (pasa de 125 MPa a 140 MPa).

Artículo 6. Cinética de hidratación, estructura de los poros, red 3D del silicato de calcio y comportamiento mecánico de los compuestos de cemento reforzados con óxido de grafeno (Zhao et al., 2018).

La relación agua-cemento se debe vigilar cuando se trabaja con el óxido de grafeno, ya que puede tener efectos importantes en muchas propiedades del concreto. Como se ve en la Figura N° 7, las menores cargas de agua favorecen la resistencia. De esta manera, con una relación agua/cemento de 0,29 y 0,10% de óxido de grafeno, la resistencia a la compresión del concreto aumenta de 85 MPa (control) hasta 98 MPa, lo que indica un aumento del 15%.

Artículo 7. Dispersión de óxido de grafeno asistida por naranja de metilo en medio alcalino para mejorar las propiedades mecánicas y la fluidez de los compuestos de cemento portland ordinario (Sheng et al., 2021).

En la Figura N° 8 se muestra que la incorporación del GO con el reactivo naranja de metilo se logra una buena dispersión del nanocompuesto y se alcanza un incremento de la resistencia a la compresión de al menos el 39%, incluso con 0,01% de GO. Además, el naranja de metilo es un reactivo que se emplea como indicador muy comercializado, no es tóxico, por lo tanto no influye en el costo de aplicarlo en el concreto.

Artículo 8. Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019 (Apaza & Art, 2019).

Esta investigación destaca, no solo por lo interesante de los resultados, sino porque fue realizado en un contexto local con bienes y materiales que se están revalorando. Como muestra la Figura N° 9, se incrementa la resistencia de esos morteros, con tan solo 0,05% de grafeno. En ese sentido la $f'c$ aumenta desde 21 MPa para el concreto con 0% de grafeno, hasta 24 MPa con 0,1% de grafeno.

Artículo 9. Uso de polvo de grafito como aditivo en el concreto $f'c$ 210 kg/cm² a fin de mejorar las propiedades mecánicas del concreto (Alvarado & Roque, 2020).

El grafeno proviene del grafito, por lo que resulta interesante estudiar el comportamiento del concreto al adicionarle este material. Como muestra la Figura N° 10, se logra un cambio positivo en la resistencia del concreto, pero con cantidades de grafito que son un orden de magnitud superiores a las que usualmente se emplean con los compuestos de la familia del grafeno. Por ejemplo, al cambiar la cantidad de grafito del 2 al 3%, la resistencia solo aumenta en un casi 2%; no obstante, cuando se compara con el concreto control, se logra un aumento del 4% en la f_c .

Tabla N° 30 Resumen de los trabajos de la adición de grafeno y sus compuestos derivados sobre la resistencia a la compresión del concreto.

N°	Autor	Título	Adición	Tratamiento	Dosis (%)	f'c (MPa)
1	Van Dac Ho, Ching-Tai Ng, Togay Ozbakkaloglu, Andy Goodwin, Craig McGuckin, Ramesh U. Karunagaran, Dusan Losic	Influence of pristine graphene particle sizes on physicochemical, microstructural and mechanical properties of Portland cement mortars	Grafeno (G) (a/c = 0.48)	Control	0	41,96
				G-5	0,07	43,85
				G-43	0,07	45,17
				G-56	0,07	56,33
				G-73	0,07	54,58
2	Mehdi Chougan, Emanuele Marotta, Francesca R. Lamastra, Francesco Vivio, Giampiero Montesperelli, Ugo Ianniruberto, Alessandra Bianco	A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials	Óxido de grafeno (GO) (a/c = 0.18-0.20)	Control	0	30
				GO-0,01	0,01	24
				GO-0,1	0,1	27,5
				GO-0,2	0,2	32,5
3	Majeed Ullah, Shahzada Burhan Ahmad Imtiaz, Rao Arsalan Khushnood, Erum Pervaiz, Wisal Ahmed, Asad Ullah, Zarar Ali Qureshi	Synthesis, characterization and application of graphene oxide in self consolidating cementitious systems	Óxido de grafeno (GO) (a/c = 0.45)	Control	0	33,9
				GO-0,01	0,01	41,75
				GO-0,03	0,03	50,25
				GO-0,05	0,05	53,35
4	Tanvir S. Qureshi, Daman K. Panesar	Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets	Óxido de grafeno (GO) (a/c = 0.45)	Control	0	50
				GO-0,01	0,01	52,5
				GO-0,02	0,02	56
				GO-0,04	0,04	62,5
				GO-0,08	0,08	62,5
GO-0,16	0,16	62,5				

N°	Autor	Título	Adición	Tratamiento	Dosis (%)	f'c (MPa)
			Óxido de grafeno reducido (rGO) (a/c = 0.45)	Control	0	50
				rGO-0,01	0,01	52
				rGO-0,02	0,02	52,5
				rGO-0,04	0,04	63
				rGO-0,08	0,08	57,5
				rGO-0,16	0,16	62,5
			Grafeno (G) (a/c = 0.45)	Control	0	50
				G-0,01	0,01	63
				G-0,02	0,02	67,5
				G-0,04	0,04	55
				G-0,08	0,08	55
				G-0,16	0,16	60
5	Liping Guo, Jiandong Wu, Hong Wang	Mechanical and perceptual characterization of ultra-high-performance cement-based composites with silane-treated graphene nano-platelets	Grafeno-Silano (ST-GNP) (a/c = 0.45)	Control	0	125
				ST-GNP-0,01	0,01	128
				ST-GNP-0,05	0,05	140
				ST-GNP-0,1	0,1	120
6				Control	0	85

N°	Autor	Título	Adición	Tratamiento	Dosis (%)	f'c (MPa)
	Li Zhao, Xinli Guo, Yuanyuan Liu, Yuhong Zhao, Zhongtao Chen, Yunsheng Zhang, Liping Guo, Xin Shud, Jiaping Liu	Hydration kinetics, pore structure, 3D network calcium silicate hydrate, and mechanical behavior of graphene oxide reinforced cement composites	Óxido de grafeno (GO) (a/c = 0.29)	GO-0,05 GO-0,1 GO-0,2 GO-0,3	0,05 0,1 0,2 0,3	90 98 95 90
7	Kuang Sheng, Danni Li, Xiaoya Yuan	Methyl orange assisted dispersion of graphene oxide in the alkaline environment for improving mechanical properties and fluidity of ordinary portland cement composites	Óxido de grafeno (GO) (a/c = 0.37)	Control GO-0,01 GO-0,03 GO-0,05	0 0,01 0,03 0,05	45 61 63 61
8	Ricardo Apaza y Art Rodríguez	Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019	Grafeno (G) (a/c = 0.60)	Control G-0,05 G-0,1	0 0,05 0,1	21 23,7 24
9	José Alvarado y Bryan Roque	Uso de polvo de grafito como aditivo en el concreto f'c 210 kg/cm2 a fin de mejorar las propiedades mecánicas del concreto	Grafito (Gra) (a/c = 0.57)	Control Gra-2 Gra-2,5 Gra-3	0 2 2,5 3	28,4 28,7 29,2 29,6

Fuente: Elaboración propia

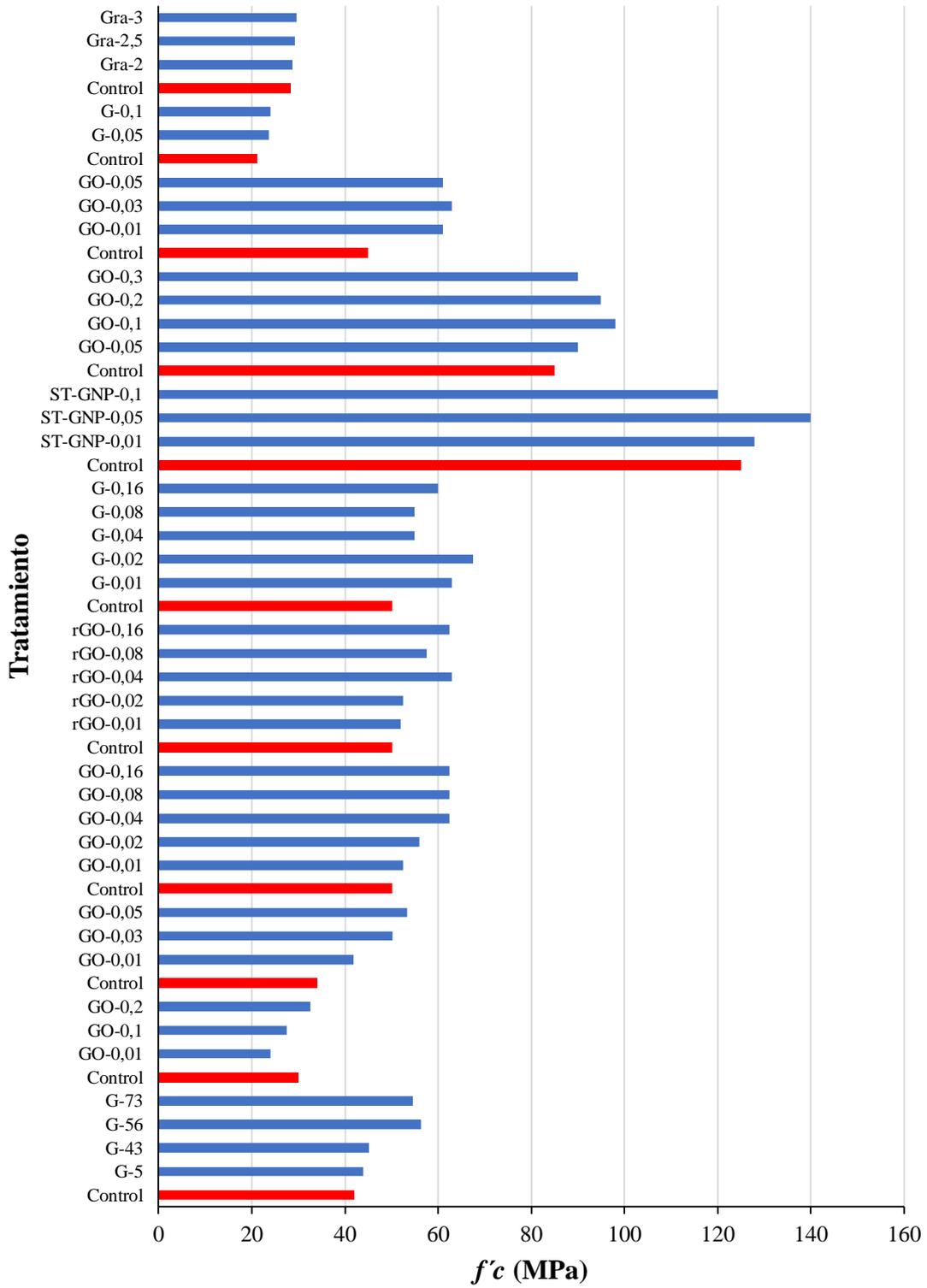


Figura N° 24 Efecto de la adición del grafeno y sus compuestos derivados sobre la resistencia a la compresión del concreto.

Fuente: Elaboración propia

Determinación del porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la trabajabilidad del concreto

Artículo 10. Propiedades físicas del hormigón con nanohojas de óxido de grafeno (Wu et al., 2019).

La incorporación del grafeno y sus compuestos derivados tienen un efecto negativo sobre la trabajabilidad del concreto fresco, como se deduce de la Figura N° 11. Este comportamiento se ha atribuido al área superficial que tiene el grafeno y las interacciones que realiza con moléculas como el agua, sobre todo cuando el grafeno se incorpora como óxido o silano, como previamente fue descrito. De momento, los incrementos en resistencia a la compresión en el concreto que fueron descritos en apartados anteriores tienen que balancearse con los posibles efectos a otras variables como el asentamiento, que disminuye desde 183 mm en el control hasta 154 mm en el concreto fresco con 0,08% de óxido de grafeno.

Artículo 11. Viabilidad de la adición de nanoescamas de óxido de grafeno (GONF) en un compuesto de cemento (An et al., 2018).

Otra línea de estudio que se ha visualizado en la revisión de estos artículos, es la forma en que se añade el grafeno a la mezcla de concreto. En este caso se realiza bajo la forma de nanoescamas y en dos momentos de la preparación de la mezcla. Como se observa en la Figura N° 12, es indiferente la forma de adicionar el nanomaterial y de ambas maneras, llevan a una disminución de la fluidez de la mezcla. Sin embargo, cuando el nanomaterial se agrega en forma de polvo a la mezcla de concreto, el asentamiento disminuye hasta un 40% (desde 155,48 mm hasta 93,29 mm con 1% del nanomaterial).

Artículo 12. Avances en la investigación sobre el efecto individual del óxido de grafeno en materiales a base de cemento y su efecto sinérgico con otros nanomateriales (Liu et al., 2021).

Como se observa en la Figura N° 13, se mantiene la misma tendencia en todos estos trabajos, en donde aún a bajas concentraciones del nanomaterial añadido, se produce una baja en la fluidez y trabajabilidad del concreto fresco. Aquí, la adición de 0,01% de GO puede ser una opción, dado que se mejora la resistencia de diseño.

Artículo 13. Efecto del óxido de grafeno en las prestaciones mecánicas y de durabilidad del hormigón (Devi & Khan, 2020).

Este trabajo sigue en la misma línea de los ya mencionados, donde el aumento en la cantidad añadida de GO produce una disminución en el asentamiento. No obstante, en este caso la caída no es tan significativa, pudiéndose trabajar con un 0,04% del GO, ya que el asentamiento solo disminuye un 3,5%.

Artículo 14. Los efectos de los nanohíbridos de óxido de grafeno y sílice sobre la trabajabilidad, la hidratación y las propiedades mecánicas de la pasta de cemento Portland (Mowlaei et al., 2021).

En este caso, la pasta de cemento Portland donde fue ensayada la adición de estas especies químicas del grafeno con el silicio, resultaron en una caída importante en la trabajabilidad, como se muestra en la Figura N° 15. Esta caída puede atribuirse al carácter más hidrofílico que tiene el silicio y la forma en como interacciona con el agua de la mezcla, la de hidratación y la que permita que la mezcla fluya. En ese sentido, como 0,1% del nanomaterial el asentamiento disminuye desde 130 mm hasta 96 mm, lo que representa una caída del 26%. Por lo tanto, hay que insistir en la búsqueda de puntos de conveniencia en relación a las propiedades deseadas tanto en el concreto fresco como en el concreto endurecido.

Artículo 15. Estudio de las propiedades de dispersión, mecánicas y de microestructura de la pasta de cemento que incorpora láminas de grafeno (J. Liu et al., 2019).

El comportamiento del grafeno es diferente, en el sentido que se requiere añadir otra especie que contribuya con la dispersión en la mezcla. Por ello, es difícil establecer cuál es su aporte a las propiedades macroscópicas del material. En este caso 0,025% de grafeno no disminuye significativamente la trabajabilidad (un cambio menor al 4%).

Tabla N° 31 Resumen de los trabajos de la adición de grafeno y sus compuestos derivados sobre la trabajabilidad del concreto fresco.

N°	Autor	Título	Adición	Tratamiento	Dosis (%)	Slump (mm)
10	Yu-You Wu, Longxin Que, Zhaoyang Cui, Paul Lambert	Physical Properties of Concrete Containing Graphene Oxide Nanosheets	Óxido de grafeno (GO)	GO-Control	0	183,0
				GO-0,02	0,02	176,0
				GO-0,03	0,03	171,0
				GO-0,04	0,04	168,0
				GO-0,06	0,06	162,0
				GO-0,08	0,08	154,0
11	Jinwoo An, Matthew McInnis, Wonseok Chung, Boo Hyun Nam	Feasibility of Using Graphene Oxide Nanoflake (GONF) as Additive of Cement Composite	Óxido de grafeno (GO) Polvo (P)	GO-P-Control	0	155,48
				GO-P-0,01	0,01	155,32
				GO-P-0,05	0,05	121,28
				GO-P-0,1	0,1	116,61
				GO-P-0,5	0,5	107,28
				GO-P-1	1	93,29
			Óxido de grafeno (GO) Solución (S)	GO-S-Control	0	155,48
				GO-S-0,01	0,01	155,42
				GO-S-0,05	0,05	129,05
				GO-S-0,1	0,1	122,83
				GO-S-0,5	0,5	111,95
GO-S-1	1	105,73				
12	Changjiang Liu, Fulian Chen, Yuyou Wu, Zhoulian Zheng, Jingwei Yang, Bo Yang, Jiangying	Research progress on individual effect of graphene oxide in cement-based materials and its synergistic effect with other nanomaterials	Óxido de grafeno (GO)	GO-Control	0	180,0
				GO-0,01	0,01	175,0
				GO-0,03	0,03	170,0
				GO-0,05	0,05	160,0
				GO-0,08	0,08	140,0
				GO-0,1	0,1	130,0

N°	Autor	Título	Adición	Tratamiento	Dosis (%)	Slump (mm)
	Yang, David Hui and Yuanbing Luo					
13	S. C. Devi y R. A. Khan	Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete	Óxido de grafeno (GO)	GO-Control GO-0,2 GO-0,04 GO-0,06 GO-0,08	0 0,2 0,04 0,06 0,08	100,0 97,5 96,5 96,0 95,0
14	Roosbeh Mowlaei, Junlin Lin, Felipe Basquiroto de Souza, Amirsina Fouladi, Asghar Habibnejad Korayem, Ezzatollah Shamsaei, Wenhui Duan	The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste	Óxido de Grafeno-Sílice (SGO)	SGO-Control SGO-0,025 SGO-0,05 SGO-0,1	0 0,025 0,05 0,1	130,0 97,5 96,5 96,0
15	Jintao Liu, Jiali Fu, Yang Yang, Chunping Gu	Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets	Grafeno (G)	G-0,01 G-0,025 G-0,05	0,01 0,025 0,05	104,0 100,0 95,0

Fuente: Elaboración propia

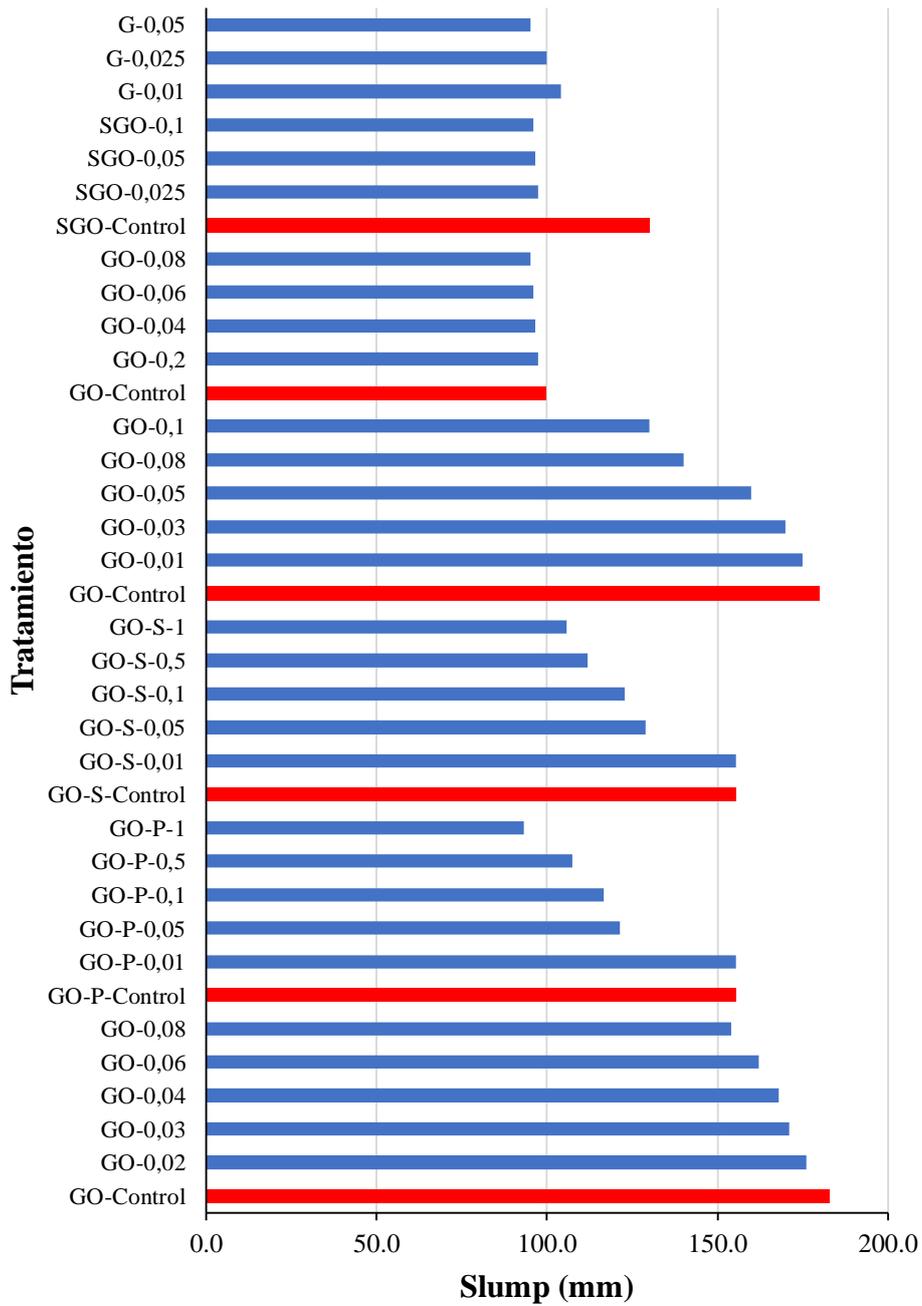


Figura N° 25 Efecto de la adición del grafeno y sus compuestos derivados sobre la slump del concreto fresco.

Nota. En color rojo se colocan las muestras de concreto sin la adición del grafeno y sus compuestos.

Determinación del porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la durabilidad y la vida útil del concreto

Artículo 16. Dispersión de óxido de grafeno asistida por naranja de metilo en medio alcalino para mejorar las propiedades mecánicas y la fluidez de los compuestos de cemento portland ordinario (Sheng et al., 2021).

Uno de los factores que puede tener un efecto adverso sobre la durabilidad y la vida útil del concreto es la porosidad, ya que, al penetrar distintos componentes a la matriz amorfa del concreto endurecido, puede causar fisuras, grietas y otras deformaciones, que motivan a que esta área de la investigación continúe creciendo. Como muestra la Figura N° 17, la mezcla entre el GO-NM en proporciones iguales (0,03% en ambos), disminuye el ingreso de un ion como el cloruro al concreto endurecido, lo que evita su rápido deterioro y sus efectos sobre las estructuras internas de hierro y acero, produciendo reacciones redox que las corroen y debilitan.

Artículo 17. Efecto del óxido de grafeno en las prestaciones mecánicas y de durabilidad del hormigón (Devi & Khan, 2020).

La humedad también puede ser un problema relevante que es pertinente abordar, sobre todo para el concreto que está expuesto a la intemperie. El agua y la diversidad de iones que transporta puede afectar el concreto y como se ve en la Figura N° 18 la sortividad del agua disminuye con la incorporación de GO hasta en 0,05%. En este caso, la nanopartícula es impermeable al agua y no adsorbe humedad, lo que hace que el concreto endurecido sea un poco más inerte a la humedad relativa.

Artículo 18. Efecto del óxido de grafeno en el deterioro de las pastas de concreto expuestas a los ácidos cítrico y sulfúrico (Muthu et al., 2021).

Un problema de nuestra época es la lluvia ácida, y en el caso de los concretos y los materiales parecidos, pueden sufrir los embates de corrosión y disolución, por lo tanto, acá el grafeno y sus compuestos, pueden proveer protección contra estos problemas. Como se muestra la Figura N° 19, el GO, atenúa el ataque de dos ácidos muy activos, indicando que la naturaleza de la protección no es solo física sino química. En este caso, con un 0.09% de óxido de grafeno, el concreto se hace más resistente al ataque del ácido sulfúrico y el ácido cítrico.

Artículo 19. Análisis de la Influencia del grafeno en la propiedad de durabilidad del concreto F'C 210 kg/cm² Lima- 2020 (Montañez & Zavala, 2020).

Continuando con la revisión sobre los aportes de durabilidad de concreto, se constató que el grafeno protege contra otros iones, como el sulfato, el cual es muy abundante en los sistemas acuosos. Como se observa en la Figura N° 20, la resistencia a la compresión se mantiene en concretos que fueron tratados con grafeno con respecto a los que no fueron tratados y expuestos a soluciones de sulfato. De acuerdo con los resultados presentados, con 0,5% de grafeno la $f'c$ es de 18,8 MPa, mientras que el concreto con 0% de grafeno tiene una $f'c$ de 16,0 MPa. Por ello se puede afirmar, que la incorporación de grafeno al concreto aumenta la durabilidad y se disminuyen los requerimientos de mantenimiento de estos materiales.

Artículo 20. Grafeno exfoliado electroquímicamente para compuestos de cemento de alta durabilidad (Krystek et al., 2021).

La Figura N° 21 indica que al añadir hasta el 0,05% en peso de grafeno en la mezcla de concreto, se mejora la resistencia a la compresión en el concreto resultante que ha sido expuesto a agua o a una solución de sulfato de sodio (Na₂SO₄); valores de grafeno por encima de 0,05% tienen un efecto contrario y la resistencia a la compresión disminuye a valores similares a los del concreto sin grafeno. En este estudio también se evidencia que el ion cloruro penetra hasta un 50% menos en concretos con 0,05% de grafeno, con respecto a un concreto convencional (ver Figura N° 22). De igual manera, y a la misma proporción de grafeno ya mencionada, se obtiene la menor sortividad de agua, tanto la inicial como la secundaria (ver Figura N° 23). Este efecto que tiene el grafeno al prevenir la penetración de iones como el cloruro, el sulfato y el sodio, a su vez que atenúa la adsorción de agua, permite afirmar que el concreto será más durable y con una vida útil más larga.

5.3 Contrastación de Hipótesis

5.3.1 Contrastación de la primera hipótesis

HIPÓTESIS 1: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno mejora la resistencia a la compresión del concreto.

Hipótesis auxiliar:

H0: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno no se mejora la resistencia a la compresión.

H1: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno si mejora la resistencia a la compresión.

La Figura 24 muestra cómo se comporta la resistencia a la compresión con la concentración en %m/m del grafeno y sus compuestos. Los valores en rojo señalan al concreto patrón (sin la adición de grafeno), lo que permite descartar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, en atención a la revisión de la literatura realizada, ya que a valores entre 0,04% y 0,1% de grafeno o cualquiera de sus derivados, pueden proveer unas buenas características de resistencia a una variedad de mezclas de concreto, para diferentes aplicaciones. Por lo tanto, se puede afirmar que adicionar grafeno en proporciones no mayores a 0,1% mejora la resistencia a la compresión del concreto endurecido. Se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alterna (H1) ya que como se demuestra las nanopartículas de grafeno mejoran la resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido.

5.3.2 Contrastación de la segunda hipótesis

HIPÓTESIS 2: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno mejora la trabajabilidad del concreto.

Hipótesis auxiliar:

H0: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno no se mejora la trabajabilidad del concreto.

H1: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno si mejora la trabajabilidad del concreto.

La Figura 25 describe los datos presentados en el trabajo que reflejan la variación en la trabajabilidad del concreto fresco con respecto al contenido de grafeno y sus derivados.

Se acepta la hipótesis nula (H0) y se rechaza la hipótesis alterna (H1) ya que como se demuestra en todas las pruebas, las nanopartículas de grafeno y sus compuestos asociados al ser adicionadas al concreto disminuye la trabajabilidad del mismo, en comparación a un concreto sin dicho material.

5.3.3 Contrastación de la tercera hipótesis

HIPÓTESIS 3: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno mejora la durabilidad y la vida útil del concreto.

Hipótesis auxiliar:

H0: Al determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno no se mejora la durabilidad y la vida útil del concreto.

H1: Al determinar el porcentaje de nanopartícula de grafeno si mejora la durabilidad y la vida útil del concreto.

Se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alterna (H1) ya que como se demuestra en los datos recabados en diferentes estudios (ver Figuras de la 17 a la 23), al incorporar este material se mejora la durabilidad y la vida útil del concreto en función de la sortividad de agua, penetración de cloruro en la matriz del concreto y daños estructurales por sales como el sulfato.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

En este apartado corresponde discutir los hallazgos más resaltantes en los artículos revisados. De forma general, uno de los aspectos a destacar es la versatilidad de las nanopartículas de grafeno, ya que pueden emplearse de manera directa o pueden modificarse sus propiedades fisicoquímicas para hacerlo compatible con las mezclas de concreto. En la literatura consultada, para mejorar la compatibilidad del grafeno o sus derivados con la mezcla de concreto, se añaden diferentes sustancias, tales el cómo dodecilmecanosulfonato de sodio (Liu et al., 2019), superplastificantes a base de policarboxilato (Muthu et al., 2021; Zhao et al., 2018), eter-policarboxílico (Sheng et al., 2021) y el Master Glenium SKY 8100 (Ho et al., 2020). En otros trabajos, se prepara una suspensión del grafeno que puede tardar al menos 3 horas (Krystek et al., 2021). Estos requerimientos son importantes, ya que se debe garantizar que el acoplamiento del grafeno en la mezcla de concreto sea lo más homogénea posible. Como se discutirá en los siguientes apartados, el grafeno afecta las propiedades físico-mecánicas como la trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad.

6.1 Discusión

a) Cuando se tiene en cuenta el efecto de la adición de grafeno o sus derivados en la mezcla de concreto, se tiene que incrementan la resistencia a la compresión del concreto endurecido (ver **Tabla N° 30**), que en términos porcentuales puede ser mayor al 20%. Estos cambios positivos que ocurren en los concretos tratados con grafeno o sus derivados, pueden atribuirse a mejoras en el proceso de hidratación del cemento debido a la mejor propagación del agua de los G, GO, rGO o cualquiera de los miembros, en una matriz de cemento, y la reducción de las distancias entre las partículas de cemento en los geles de cemento debido al efecto de las fuerzas de van der Waals entre los compuestos de grafeno. También puede indicarse que la mayor parte de las fuerzas de adhesión mecánica creadas a partir de las fuerzas de fricción entre las superficies de las moléculas de grafeno y los geles de cemento, lo que sugiere que el tamaño de las nanopartículas puede modular su comportamiento macro, como de hecho se reportó en uno de los trabajos (Ho et al., 2020). Por lo tanto, el grafeno y sus compuestos pueden reforzar los geles de cemento en el concreto, resultando en la mejora de las microestructuras de los morteros y contribuyendo a

una mejor capacidad en la distribución de tensiones y propagación de grietas de estas mezclas de concreto-grafeno.

b) Por otro lado, la incorporación de grafeno o sus derivados al concreto puede afectar negativamente la trabajabilidad, como se observó en la **Figura N° 25** (ver **Tabla N° 31**). Esto puede deberse a la gran área superficial de las nanopartículas de grafeno y sus diferentes compuestos, lo que provoca una disminución de la disponibilidad de agua en el concreto fresco a partir de la humectación. Este efecto sobre el asentamiento debe considerarse en atención a los requerimientos técnicos que debe tener la mezcla fresca para la obra o verificar si cumplen con las especificaciones de una norma determinada. Sobre este aspecto se debe seguir investigando para que los logros alcanzados en la resistencia a la compresión del concreto endurecido, no implique una afectación significativa en los valores de asentamiento del concreto fresco.

c) Los estudios que se analizaron en esta investigación sobre durabilidad del concreto, tienen en cuenta la degradación de este material considerando los efectos de la fuerza iónica, la humedad y los ataques de sustancias ácidas; en estos tres apartados, la adición del grafeno y sus compuestos incrementaron los indicadores de durabilidad evaluados. En ese sentido, disminuyó el ingreso de iones cloruro (ver **Figura N° 17** y **Figura N° 22**) y la sortividad del agua (ver **Figura N° 18** y **Figura N° 23**), y se observaron pocas afectaciones de la humedad y de los iones sulfato sobre la resistencia a la compresión (ver **Figura N° 20** y **Figura N° 21**). Adicionalmente, el efecto de las soluciones de ácido fuerte (ácido sulfúrico) y ácido débil (ácido cítrico) fueron atenuadas por la presencia del grafeno (ver **Figura N° 19**). Este comportamiento puede explicarse al tener en cuenta la porosidad del material y al refinamiento significativo de los grandes poros capilares que ocurre cuando el grafeno está presente. A las concentraciones apropiadas, el grafeno puede constituir una barrera física y química que previene el ingreso de sustancias cáusticas y corrosivas al interior del concreto, previniendo cualquier cambio en la red cristalina o de la composición del material originario, que se traduzca en la aparición de microfracturas y agrietamientos, además de prevenir la corrosión en el acero de refuerzo. Por esto, el grafeno y sus compuestos pueden ser una alternativa económica para incrementar la vida útil del concreto.

CONCLUSIONES

- 1) Se concluye, de manera general, que la adición de grafeno y sus compuestos derivados disminuyen la trabajabilidad del concreto fresco y mejoran la resistencia a la compresión, la durabilidad y la vida útil del concreto endurecido. Por lo tanto, el grafeno afecta de forma significativa las propiedades físico-mecánicas del concreto.
- 2) Se puede incrementar la resistencia a la compresión del concreto mediante la incorporación de grafeno y sus compuestos relacionados, como se observa en la **Tabla N° 30** y **Figura N° 24**, al comparar el concreto control con respecto a aquellos a los que se le adicionó grafeno. El incremento de las fuerzas intermoleculares atribuibles a la gran área superficial de las nanopartículas de grafeno, refuerzan la red cristalina aumentando así la resistencia a la fractura del concreto endurecido. En general, la resistencia a la compresión del concreto endurecido aumenta por la adición de entre el 0,01%-0,04% del nanomaterial de grafeno entre el 8% y el 57%. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la relación agua-cemento, ya que, al incrementar esta relación, disminuye de manera significativa la resistencia a la compresión en el concreto endurecido, así como el efecto de la adición del nanomaterial a base de grafeno y sus compuestos relacionados.
- 3) El grafeno y sus compuestos relacionados disminuyen la trabajabilidad del concreto fresco (ver **Tabla 31** y **Figura N° 25**), por lo que la incorporación de este aditivo debe realizarse con cautela y después de haber realizado numerosos ensayos de prueba. La incorporación de grafeno a la mezcla de concreto en un aproximado de 0,05% disminuye el asentamiento entre el 3% y el 26% en comparación de la mezcla de concreto patrón sin grafeno. Tal efecto se atribuye a la disminución del agua de hidratación disponible haciendo que el concreto fresco sea menos trabajable.
- 4) El grafeno aumenta la durabilidad del concreto al disminuir la absorción de agua y de iones como el cloruro y el sulfato (ver las **Figuras desde la 17 a la 23**), los cuales pueden alterar la red cristalina del concreto endurecido y promover reacciones de oxidación-reducción en los metales internos de la estructura. También la presencia del grafeno en el concreto lo hace menos susceptible al ataque de sustancias ácidas provenientes del smog o la lluvia ácida, lo cual es ideal en estos tiempos, donde la contaminación atmosférica y el cambio climático constituyen una seria amenaza a las estructuras hechas a base de concreto. La presencia del grafeno en el concreto

modifica la estructura de los poros y evitan que el agua y las especies que vienen disueltas en ella, entren con facilidad al concreto y lo debiliten.

RECOMENDACIONES

- 1) Se sugiere la realización de estudios de mayor duración para verificar el comportamiento del concreto con estos aditivos en condiciones reales, ya que todos los estudios revisados fueron a escala de laboratorio. Aunque los estudios a escala real pueden ser complicados debido a la variabilidad de las condiciones atmosféricas y los cambios de temperatura, pueden proveer información valiosa sobre los efectos reales de la adición de grafeno y sus compuestos relacionados. Sin embargo, la adición de alrededor de 0,04% de grafeno apunta a un incremento de la resistencia a la compresión del concreto endurecido que puede alcanzar el 57% más que el concreto convencional.
- 2) La incorporación del grafeno debe hacerse con cuidado, ya que afecta la trabajabilidad del concreto fresco. Aunque este parámetro depende de múltiples factores, de acuerdo con los datos revisados con 0,05% de grafeno la disminución de la trabajabilidad puede alcanzar el 26% (medido a través de la prueba de asentamiento), lo cual debe tenerse en cuenta para el uso que se le dará a la mezcla fresca, preparación y traslado de la misma.
- 3) La adición de grafeno a la mezcla de concreto, puede a largo plazo, disminuir la frecuencia de mantenimiento de las estructuras, así como la tasa de fracturas y fisuras, lo que hace necesarios estudios económicos sobre la viabilidad de esta tecnología a largo plazo para la mejora de las estructuras de concreto.

Se recomienda que en futuras investigaciones relacionadas con el presente tema se deberían orientar a estudiar los posibles efectos fotocatalíticos y otros de tipo antimicrobiano, lo que podría ampliar el rango de uso de este nanomaterial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitcin, P.-C. (2000). Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1349-1359. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. *Cement and Concrete Research*, 122, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>
- Alvarado, J., & Roque, B. (2020). *Uso de polvo de grafito como aditivo en el concreto f'c 210 kg/cm2 a fin de mejorar las propiedades mecánicas del concreto* [Tesis de Grado, Universidad de San Martín de Porres]. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/7017>
- Álvarez Huaynalaya, R. J. (2020). *Agregados en la ingeniería civil. Capítulo I: Agregados*. <https://sites.google.com/site/alvarezhuaynalayarafaeljordy/agregados-en-la-ingenieria-civil>
- An, J., McInnis, M., Chung, W., & Nam, B. H. (2018). Feasibility of Using Graphene Oxide Nanoflake (GONF) as Additive of Cement Composite. *Applied Sciences*, 8(3), 419. <https://doi.org/10.3390/app8030419>
- Apaza, R., & Art, R. (2019). *Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019* [Tesis de Grado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51746>
- Ávila, J. (2018). *Evaluación del comportamiento en compresión de morteros reforzados con óxido de grafeno y costos inherentes al proceso productivo de la mezcla* [Tesis de Grado, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. <http://repositorio.uees.edu.ec/handle/123456789/2917>
- Bartra, D. (2019). *Evaluación de la influencia del grafeno como aditivo nanotecnológico para mejorar la resistencia del concreto f'c 210 kg/cm2 Tarapoto, 2018* [Tesis de Grado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39521>
- Berry, V. (2013). Impermeability of graphene and its applications. *Carbon*, 62, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.05.052>

- Buzea, C., Pacheco, I. I., & Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*, 2(4), MR17-MR71. <https://doi.org/10.1116/1.2815690>
- Chandra, S., & Björnström, J. (2002). Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars—Part II. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1613-1619. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00838-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00838-4)
- Choque, L. (2021). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto $F'C = 210$ KG/CM², agregando grafeno* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5000>
- Chougan, M., Marotta, E., Lamastra, F. R., Vivio, F., Montesperelli, G., Ianniruberto, U., & Bianco, A. (2019). A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials. *Construction and Building Materials*, 227, 116701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116701>
- Cipriano. (2018). Vida útil de estructuras en concreto: ¿de qué depende? *Agro 360*. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/vida-util-de-estructuras-en-concreto-de-que-depende>
- Claisse, P., Lorimer, J., & Omari, M. (2001). Workability of Cement Pastes. *ACI Materials Journal*, 98(6), 476-482.
- Cooper, H., Hedges, L., & Valentine, J. (2009). *The Handbook of Research Synthesis and Meta-Analysis* (Segunda). Sage. <https://www.russellsage.org/publications/handbook-research-synthesis-and-meta-analysis-second-edition>
- Devi, S. C., & Khan, R. A. (2020). Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. *Journal of Building Engineering*, 27, 101007. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101007>
- El Grafeno. (2017, Julio). Graphenano. <https://www.graphenano.com/wp-content/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
- Eskandari-Naddaf, H., & Kazemi, R. (2017). ANN prediction of cement mortar compressive strength, influence of cement strength class. *Construction and Building Materials*, 138, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.132>
- Gomero Cervantes, B. W. (2006). *Aditivos y adiciones minerales para el concreto* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3159>

- Guo, L., Wu, J., & Wang, H. (2020). Mechanical and perceptual characterization of ultra-high-performance cement-based composites with silane-treated graphene nanoplatelets. *Construction and Building Materials*, 240, 117926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117926>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta). McGraw-Hill.
- Hibbeler, R. C. (2005). *Mechanics of materials*, sixth edition. Prentice Hall.
- Ho, V. D., Ng, C.-T., Ozbakkaloglu, T., Goodwin, A., McGuckin, C., Karunakaran, R. U., & Losic, D. (2020). Influence of pristine graphene particle sizes on physicochemical, microstructural and mechanical properties of Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, 264, 120188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120188>
- Instron, R. Resistencia a la compresión. Recuperado de: <https://www.instron.com.ar/our-company/library/glossary/c/compressivestrength>.
- Jiang, Z., Sevim, O., & Ozbulut, O. E. (2021). Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques. *Construction and Building Materials*, 303, 124472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124472>
- Karakouzian, M., Farhangi, V., Farani, M. R., Joshaghani, A., Zadehmohamad, M., & Ahmadzadeh, M. (2021). Mechanical Characteristics of Cement Paste in the Presence of Carbon Nanotubes and Silica Oxide Nanoparticles: An Experimental Study. *Materials*, 14(6), 1347. <https://doi.org/10.3390/ma14061347>
- Krystek, M., Pakulski, D., Górski, M., Szojda, L., Ciesielski, A., & Samorì, P. (2021). Electrochemically Exfoliated Graphene for High-Durability Cement Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(19), 23000-23010. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04451>
- Li, L., Zheng, Q., Han, B., & Ou, J. (2021). Fatigue behaviors of graphene reinforcing concrete composites under compression. *International Journal of Fatigue*, 151, 106354. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106354>
- Liu, C., Chen, F., Wu, Y., Zheng, Z., Yang, J., Yang, B., Yang, J., Hui, D., & Luo, Y. (2021). Research progress on individual effect of graphene oxide in cement-based materials and its synergistic effect with other nanomaterials. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 1208-1235. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0080>

- Liu, J., Fu, J., Yang, Y., & Gu, C. (2019). Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets. *Construction and Building Materials*, 199, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.006>
- Loya Olivera, L. F. (2018). *Evaluación de la resistencia a la compresión del curado de concreto en obra y laboratorio, en el distrito de Yanacancha, Pasco – 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/867/1/TESIS%20CURADO%20DEL%20CONCRETO%20FINAL%20OK%20-%20LFLO.pdf>
- Mather, S. y Ozyildirim H. Selección de materiales para el concreto. En su investigación. American Concrete Institute. UNIVERSIDAD DE MICHIGAN. 2004
- Mendes, T., Hotza, D., & Repette, W. (2015). Nanoparticles in cement based materials: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 40, 89-96.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Altman, D., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement (Chinese edition). *Journal of Chinese Integrative Medicine*, 7(9), 889-896. <https://doi.org/10.3736/jcim20090918>
- Montañez, B., & Zavala, A. (2020). *Análisis de la Influencia del grafeno en la propiedad de durabilidad del concreto F'C 210 kg/cm2 Lima- 2020* [Tesis de Grado]. Universidad Cesar Vallejo.
- Mowlaei, R., Lin, J., Basquiroto de Souza, F., Fouladi, A., Habibnejad Korayem, A., Shamsaei, E., & Duan, W. (2021). The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste. *Construction and Building Materials*, 266, 121016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121016>
- Muthu, M., Yang, E.-H., & Unluer, C. (2021). Effect of graphene oxide on the deterioration of cement pastes exposed to citric and sulfuric acids. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104252>
- National Ready Mixed Concrete Association [NRMCA]. (2020). *El concreto en la práctica ¿qué, por qué y cómo? CIP 30—Adiciones al cemento*. National Ready Mixed Concrete Association.

- Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado, E.060 (2009).
- Norma Técnica Peruana 400.037: AGREGADOS. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto (2018).
- Paul, S. C., van Rooyen, A. S., van Zijl, G. P. A. G., & Petrik, L. F. (2018). Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, *189*, 1019-1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.062>
- Pérez, S. P. M., Vargas, Y. M. T., Santisteban, K. J. G., & Pérez, Y. A. V. (2021). Uso de Nanomateriales en la Producción del Concreto: Revisión Literaria. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, *6*(4), 74-87. <https://doi.org/10.25286/rep.v6i4.1676>
- Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M., & Meddah, M. S. (2019). Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO₂ nanoparticles and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, *217*, 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.045>
- Qureshi, T. S., & Panesar, D. K. (2020). Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets. *Composites Part B: Engineering*, *197*, 108063. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063>
- Rao, C. N. R., Biswas, K., Subrahmanyam, K. S., & Govindaraj, A. (2009). Graphene, the new nanocarbon. *Journal of Materials Chemistry*, *19*(17), 2457-2469. <https://doi.org/10.1039/B815239J>
- Reches, Y. (2018). Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. *Construction and Building Materials*, *175*, 483-495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214>
- Sadeghi-Nik, A., Berenjian, J., Bahari, A., Safaei, A. S., & Dehestani, M. (2017). Modification of microstructure and mechanical properties of cement by nanoparticles through a sustainable development approach. *Construction and Building Materials*, *155*, 880-891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.107>
- Sheng, K., Li, D., & Yuan, X. (2021). Methyl orange assisted dispersion of graphene oxide in the alkaline environment for improving mechanical properties and fluidity of ordinary portland cement composites. *Journal of Building Engineering*, *43*, 103166. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103166>

- Soldano, C., Mahmood, A., & Dujardin, E. (2010). Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, 48(8), 2127-2150. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.058>
- Song, J.-S., Mante, F. K., Romanow, W. J., & Kim, S. (2006). Chemical analysis of powder and set forms of Portland cement, gray ProRoot MTA, white ProRoot MTA, and gray MTA-Angelus. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 102(6), 809-815. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2005.11.034>
- Sprung, S. (2008). Cement. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/14356007.a05_489.pub2
- Tobon, S., & Hernández, H. (2016). Análisis documental del proceso de inclusión en la educación. *Ra Ximhai*, 12, 399-420. <https://doi.org/10.35197/rx.12.01.e3.2016.27.hh>
- Ullah, M., Imtiaz, S. B. A., Khushnood, R. A., Pervaiz, E., Ahmed, W., Ullah, A., & Qureshi, Z. A. (2021). Synthesis, characterization and application of graphene oxide in self consolidating cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 296, 123623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123623>
- Van Oss, H. G., & Padovani, A. C. (2002). Cement Manufacture and the Environment: Part I: Chemistry and Technology. *Journal of Industrial Ecology*, 6(1), 89-105. <https://doi.org/10.1162/108819802320971650>
- Wu, Y.-Y., Que, L., Cui, Z., & Lambert, P. (2019). Physical Properties of Concrete Containing Graphene Oxide Nanosheets. *Materials*, 12(10), 1707. <https://doi.org/10.3390/ma12101707>
- Zhao, L., Guo, X., Liu, Y., Zhao, Y., Chen, Z., Zhang, Y., Guo, L., Shu, X., & Liu, J. (2018). Hydration kinetics, pore structure, 3D network calcium silicate hydrate, and mechanical behavior of graphene oxide reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 190, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.105>

ANEXOS

Anexo 1.

Título: Nanopartículas de grafeno para mejorar las propiedades físico mecánicas del concreto						
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Índicadores	Instrumentos	Metodología
¿De qué manera las nanopartículas de grafeno influyen en las propiedades físico mecánicas del concreto?	Analizar las nanopartículas de grafeno para mejorar las propiedades físico mecánicas del concreto	Al analizar las nanopartículas de grafeno mejoran las propiedades físico mecánicas del concreto.	Nanopartículas de grafeno	Porcentaje de nanopartículas de grafeno	Normas nacionales e internacionales - Norma E060 Concreto armado	Investigación documental, cualitativa, descriptiva
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente			
a) ¿En qué medida el porcentaje de nanopartículas de grafeno influye en la resistencia a la compresión del concreto?	a) Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la resistencia a la compresión del concreto.	a) Al Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno mejora la resistencia a la compresión del concreto.	Propiedades físico mecánicas del concreto	Resistencia a la compresión	NTP 339.034 ASTM C 39	Análisis de contenido, participación activa del investigador
b) ¿En qué medida el porcentaje de nanopartículas de grafeno influye en el asentamiento del concreto?	b) Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar el asentamiento del concreto.	b) Al Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno se mejora el asentamiento del concreto.		Slump (mm)	ASTM C39 NTP 339.034	
c) ¿En qué medida el porcentaje de nanopartículas de grafeno influye en la durabilidad del concreto?	c) Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para incrementar la durabilidad del concreto.	c) Al Analizar el porcentaje de nanopartículas de grafeno se incrementa la durabilidad del concreto.		Durabilidad	ASTM 1585-04:2009 GB/T 50082-2009	

durabilidad del
concreto?

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Matriz 1

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
1	Influencia del tamaño de las partículas de grafeno prístino en las propiedades fisicoquímicas, microestructurales y mecánicas de los morteros de cemento Portland	Van Dac Ho, Ching-Tai Ng, Togay Ozbakkaloglu, Andy Goodwin, Craig McGuckin, Ramesh U. Karunagaran, Dusan Losic	Dependencia de las propiedades macroscópicas observadas en función del tamaño de partícula del grafeno.	Compresión	Falta considerar un diseño factorial para verificar la interacción entre los factores estudiados	La adición del aditivo PRG a los morteros de concreto mejora sus resistencias a la compresión y a la tracción, siendo esto dependiente del tamaño de la partícula y del arreglo de la red cristalina.	Al incorporar las nanopartículas de grafeno al concreto, se ha de tener en cuenta el tamaño de las partículas	Sugiere estudios más profundos en torno a la variabilidad de los efectos de la incorporación del grafeno, tanto en proporción como en tamaño de partícula	2020
2	Estudio sistemático de los morteros premezclados EN-998-2 modificados con materiales a base de grafeno	Mehdi Chougan, Emanuele Marotta, Francesca R. Lamastra, Francesco Vivio, Giampiero Montesperelli, Ugo Ianniruberto, Alessandra Bianco	A los 28 días, los morteros modificados con GO experimentaron un aumento de la resistencia a la flexión y a la compresión al aumentar la dosis; el refuerzo mecánico sólo se produjo en los morteros premezclados premezclados cargados	Compresión	No se hizo comparación con el grafeno	Las propiedades de estos GBCC son la "expresión" global de la compleja interacción de nano a micro entre las microláminas gráficas 2D y la matriz cementicia. Para que el material gráfico logre plenamente la	Se espera que los morteros modificados mantengan al menos las propiedades mecánicas para estudiar su potencial mejora en las propiedades físicas y funcionales que se publicarán en un documento en curso.	Aporta información novedosa sobre las modificaciones en las propiedades macro, de la incorporación de grafeno y materiales relacionados	2020

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
			con un 0,2% en peso de óxido de grafeno.			trabajabilidad, el refuerzo, la durabilidad y las multifuncionalidades físicas, los GBCC añadidos deben controlarse a un nivel que no perjudique la fluidez de la mezcla fresca. Además, la formulación de los compuestos de cemento a base de grafeno dedicados a una aplicación específica debe ser capaz de cumplir no sólo los requisitos técnicos, sino también los costes, la seguridad humana y la sostenibilidad medioambiental.		sobre el concreto fresco y curado.	

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
3	Síntesis, caracterización y aplicación del óxido de grafeno en sistemas cementantes autoconsolidantes	Majeed Ullah, Shahzada Burhan Ahmad Intiazi, Rao Arsalan Khushnood, Erum Pervaiz, Wisal Ahmed, Asad Ullah, Zarar Ali Qureshi	El mecanismo de propagación de las grietas ha cambiado y la microestructura de los MEC ha mejorado con la adición de óxido de grafeno en los MEC, lo que ha dado lugar a un aumento del 57% en la resistencia a la compresión y del 48% en la resistencia a la flexión de los MEC después de 28 días de hidratación tras la adición del 0,05% de GO en masa de concreto.	Compresión	Se probó en un solo tipo de cemento	En general, la incorporación de óxido de grafeno en los SCM tiene profundos efectos en sus propiedades en fresco y endurecidas, así como en su estabilidad volumétrica. Las nanoláminas de óxido de grafeno en 2D pueden dispersarse fácilmente en soluciones acuosas para la preparación de sistemas cementantes autocompactantes, y no sólo la dispersión sino también los problemas de unión de los CNT con el concreto pueden solucionarse utilizando grafeno funcionalizado.	Dado que la inclusión de GO afecta a la cinética de hidratación del sistema cementante, se recomienda realizar estudios tixotrópicos en sistemas autocompactantes con GO en morteros de concreto fresco.	Contribuye al mejorar la comprensión de los efectos del grafeno y sus derivados en las propiedades del cemento	2021

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
4	Compuesto de pasta de cemento nanoreforzado con grafeno funcionalizado y nanoplaquetas de grafeno prístinas	Tanvir S. Qureshi, Daman K. Panesar	Los grupos funcionales que contienen oxígeno del GO lo hacen: hidrofílico, eficiente para dispersarse en el agua, y menor espesor de la pila en el agua, lo que a su vez mejora la hidratación del concreto y refuerza el composite mejorando las propiedades mecánicas.	Compresión	Se podría evaluar la combinación de grafenos	Este estudio informó de la síntesis consistente de tres formas de materiales de grafeno de alta calidad, GO, rGO y G, a partir de un depósito de grafito epigénico de alta pureza, y compara su influencia en los CCG a las concentraciones de 0,01 a 0,16% en peso del concreto.	Es necesario investigar en el futuro el rendimiento de los materiales de grafeno en sistemas de CCG más complejos, como el mortero y el hormigón, así como su rendimiento de durabilidad a largo plazo. Se podría seguir investigando la influencia del rGO y el G en la consecución de la capacidad de autodetección en los CCG.	Destaca al considerar la evaluación de difentes nanocompuestos de grafeno	2020
5	Caracterización mecánica y perceptiva de materiales compuestos de alto rendimiento a base de cemento con nanoplaquetas de grafeno tratadas con silano	Liping Guo, Jiandong Wu, Hong Wang	La modificación del grafeno por los grupos silano, se traduce en mejoras en las propiedades mecánicas del concreto.	Compresión	Faltó compración con grafeno sin tratar	La incorporación de ST-GNPs reduce la fluidez del mortero fresco UHPCC, que disminuye al aumentar el contenido de ST-GNPs. Bajo diferentes edades de curado, la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de UHPCC	Se debe tener cuidado sobre la proporción del aditivo a añadir, dado los cambios que se presentan en resistencia a la compresión, en función del tiempo de curado del concreto.	Se muestra una modificación novedosa del grafeno, al incorporar un grupo hidrofílico, lo que puede modificar la hidratación del concreto.	2020

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
						aumentan primero y luego disminuyen con el aumento del contenido de ST-GNPs. En particular, cuando la cantidad de ST-GNPs es de 0,05%, la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de UHPCC alcanzó el máximo, que son 23,8 y 142,5 MPa, respectivamente.			
6	Propiedades físicas del hormigón con nanohojas de óxido de grafeno	Yu-You Wu, Longxin Que, Zhaoyang Cui, Paul Lambert	El cemento ordinario es uno de los materiales de construcción más utilizados debido a su excelente resistencia a la compresión. Sin embargo, el cemento carece de ductilidad, lo que se traduce en una baja resistencia a la tracción y a la flexión, y una escasa resistencia	Asentamiento	Faltó compración con grafeno sin tratar	El asentamiento del concreto que contiene nanohojas de GO disminuye con la adición de nanohojas de GO desde el 0,02% hasta el 0,80% en peso de concreto bajo una relación agua-cemento de 0,5.	Sin embargo, la trabajabilidad del concreto se ve afectada tanto por el aditivo como por las nanopartículas de GO. Por lo tanto, se necesitan más estudios para comprender mejor la influencia de las nanohojas de GO en la trabajabilidad del concreto.	Se observa una mejora significativa en las propiedades de asentamiento del concreto por la incorporación del aditivo.	2019

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
			a la formación de grietas						
7	Viabilidad del uso de nanoescamas de óxido de grafeno (GONF) como aditivo de un compuesto de cemento	Jinwoo An, Matthew McInnis, Wonseok Chung, Boo Hyun Nam	Se presenta la variación de la forma de mezclado de los compuestos previo a la obtención del cemento.	Asentamiento	No se hizo comparación con el grafeno	La adición de GONF en la pasta OPC da lugar a la disminución del flujo de minivolumen. Con el incremento de las dosis de GONF, el diámetro del flujo de los mini grumos se redujo proporcionalmente. Este resultado indica que la adición de GONF reduce la fluidez de la mezcla de pasta OPC.	Se ha comprobado que las propiedades mecánicas de todas las pastas y hormigones combinados con GONF han mejorado en comparación con las muestras de control. De acuerdo con los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión, las resistencias más altas se observan en el GONF del 0,05% con la pasta combinada con GON y en el GONF del 0,01% con el concreto combinado con GONF; por lo tanto, concluimos que el 0,05% y el 0,01% de GONF son un contenido óptimo en la pasta de cemento y el concreto. hola	Aporte importante al estudio de las propiedades del concreto con derivados del grafeno.	2018

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
8	Avances en la investigación sobre el efecto individual del óxido de grafeno en materiales a base de concreto y su efecto sinérgico con otros nanomateriales	Changjiang Liu, Fulian Chen, Yuyou Wu, Zhoulian Zheng, Jingwei Yang, Bo Yang, Jiangying Yang, David Hui and Yuanbing Luo		Asentamiento	Restricciones temporales a la revisión. Datos de fuentes secundarias	Los autores sugieren en breve, como derivado del grafeno, el GO también puede hacer grandes contribuciones a la ingeniería práctica.	El desarrollo de nuevos materiales asociados al cemento, puede mejorar la calidad y sus aplicaciones prácticas en ingeniería	Recopila información relevante sobre la incorporación de nanomateriales al concreto y sus efectos	2021
9	Efecto del óxido de grafeno en las prestaciones mecánicas y de durabilidad del hormigón	S. C. Devi y R. A. Khan	La introducción de nanomateriales en los materiales compuestos a base de cemento ha mejorado las propiedades como la tenacidad, la flexión, la tracción y la durabilidad al mejorar en la nanoescala del hormigón. La nanotecnología ha demostrado que los composites pueden modificarse/rediseñarse con una pequeña inclusión de nanomateriales.	Asentamiento y durabilidad	Falto comparación con grafeno	La inclusión de GO con diferentes porcentajes en peso de concreto en el desarrollo de un hormigón, ha reducido la trabajabilidad y mejorado significativamente la resistencia a la compresión en (21-55%) y la resistencia a la tracción en (16-38%)	La mezcla con 0,06% de incorporación de GO es la mezcla óptima en base a la resistencia máxima alcanzada a los 90 días de curado	Emplean una prueba de velocidad de pulso de ultrasonido para evaluar la calidad del concreto.	2019

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
10	Los efectos de los nanohíbridos de óxido de grafeno y sílice sobre la trabajabilidad, la hidratación y las propiedades mecánicas de la pasta de cemento Portland	Roozbeh Mowlaei, Junlin Lin, Felipe Basquiroto de Souza, Amirsina Fouladi, Asghar Habibnejad Korayem, Ezzatollah Shamsaei, Wenhui Duan	Recientemente, se ha descubierto que el uso de nanomateriales es un método excelente para mejorar la resistencia de los materiales de cemento Portland. Gracias a sus propiedades a nanoescala, los nanomateriales pueden rellenar eficazmente la estructura de los poros y potenciar la hidratación del concreto, mejorando la resistencia a la compresión y a la tracción del compuesto.	Asentamiento	Comparación con un patron de grafeno puro	Estos resultados demuestran que el diseño racional de nanohíbridos de óxido de grafeno presenta un método eficaz para obtener compuestos de cemento Portland más resistentes y duraderos.	El recubrimiento del grafeno que arrojó mejores prestaciones al concreto, fue el de mayor grosor.	Destaca la idea de incorporar el grafeno a la matriz del concreto de forma homogénea.	2021
11	Estudio de las propiedades de dispersión, mecánicas y de microestructura de la pasta de cemento que incorpora láminas de grafeno	Jintao Liu, Jiali Fu, Yang Yang, Chunping Gu	Se requiere dispersar adecuadamente el grafeno en el medio acuso mediante un tensoactivo.	Asentamiento y durabilidad	Se incorporan diferentes componentes	Se observaron aumentos en las resistencias a la compresión, a la flexión y a la tracción de todas las mezclas preparadas con la adición de 0,025 % en peso de	El aumento de la concentración de grafeno a la concentración de grafeno al 0,05% en peso dio lugar a una reducción de la resistencia del concreto porque el comportamiento de aglomeración de las	Se contribuye a la mejora de las propiedades del concreto con grafeno y otros aditivos	2019

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
						grafeno, alcanzando mejoras de hasta el 14,9%, 23,6% y 15,2% a los 7 días, respectivamente.	láminas de grafeno limita el efecto de refuerzo en los materiales cementicios.		
12	Efecto del óxido de grafeno en el deterioro de las pastas de cemento expuestas a los ácidos cítrico y sulfúrico	Murugan Muthu, En-Hua Yang, Cise Unluer	La incorporación de GO otorga mayor resistencia al ataque de los ácidos empleados, tanto fuerte como débiles.	Durabilidad	Sólo se evalúa un modelo para evaluar la resistencia del material al ataque químico y su efecto en las propiedades.	El GO es uno de los aditivos potenciales que pueden modificar la microestructura y mejorar la vida útil del hormigón en ambientes agresivos. vida útil del hormigón frente a entornos agresivos.	Teniendo en cuenta el posible aumento del coste debido a la necesidad de un tratamiento superficial, el uso de láminas de GO puede optimizarse ajustando su contenido, lo que da lugar a componentes estructurales de alto rendimiento con una amplia gama de funcionalidades.	Se entiende mejor el comportamiento del concreto ante un posible ataque por lluvia ácida y al dióxido de carbono atmosférico	2021

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
13	Grafeno exfoliado electroquímicamente para compuestos de concreto de alta durabilidad	Małgorzata Krystek, Dawid Pakulski, Marcin Górski, Leszek Szojda, Artur Ciesielski, Paolo Samorì	La notable mejora de la resistencia a la tracción de los morteros de EEG-cemento de la que se ha informado anteriormente, representan un paso importante hacia el desarrollo de compuestos de cemento basados en grafeno altamente duraderos.	Durabilidad	Faltó evaluación por exposición a iones	En resumen, se ha demostrado que la incorporación de EEG en los compuestos de concreto produce una mejora significativa de la durabilidad. Dicha mejora viene determinada por una notable disminución de la penetración del agua en los morteros de cemento, lo que conlleva una disminución de su sorptividad inicial y secundaria incluso en un 21 y 25%, respectivamente.	Incorporar el grafeno para aumentar la resistencia a los cambios químicos del concreto.	La forma de obtener el grafeno no requiere un tensoactivo para incorporarlo en la mezcla de concreto	2021
14	Cinética de hidratación, estructura de los poros, red 3D del silicato de calcio y comportamiento mecánico de los compuestos de concreto reforzados con óxido de grafeno	Li Zhao, Xinli Guo, Yuanyuan Liu, Yuhong Zhao, Zhongtao Chen, Yunsheng Zhang, Liping Guo, Xin Shud, Jiaping Liu	El actual desarrollo de los nanomateriales ha proporcionado oportunidades para hacer posible el refuerzo de los compuestos de concreto a escala	Compresión	Evaluar un concreto con grafeno sin oxidar	Con la adición de tan sólo un 0,022% en peso de GO, las resistencias a la compresión a los 28 días con diferentes proporciones de agua y cemento	Incorporar bajas dosis de grafeno para obtener las mejoras en las propiedades físico mecánicas	Se estudian los procesos de formación de geles en la matriz del cemento.	2018

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
			nanométrica. La reciente aparición del grafeno, una monocapa plana de átomos de carbono con enlaces SP2 en un entramado bidimensional en forma de panal con una elevada relación de aspecto y excepcionales propiedades mecánicas y eléctricas			aumentaron entre un 16,31% y un 25,60%. Esta mejora se debió a una variedad de mecanismos de refuerzo del GO, como la hidratación acelerada del cemento, la estructura refinada de los poros y la estructura de red 3D compacta de los geles C-S-H modificados con GO. Pequeñas fracciones de adición de GO pueden alcanzar altos niveles de refuerzo, indicando que el GO es un potencial nanorefuerzo para los compuestos de cemento.			

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
15	Dispersión de óxido de grafeno asistida por naranja de metilo en medio alcalino para mejorar las propiedades mecánicas y la fluidez de los compuestos de cemento portland ordinario	Kuang Sheng, Danni Li, Xiaoya Yuan	Las pruebas microscópicas mostraron que la adición de MO podía promover la dispersión del GO en la solución de los poros del cemento, regular el crecimiento del cristal de hidratación del cemento y hacer más densa la estructura de la lechada de cemento. La adición de MO podría reducir la pérdida de fluidez de la lechada fresca causada por el GO.	Compresión y durabilidad	Evaluar un concreto con grafeno sin oxidar	Este estudio podría proporcionar un método de bajo coste para mejorar simultáneamente la dispersión del GO en la solución de los poros del cemento y la trabajabilidad del mortero de cemento mezclado con GO y tendría muchas aplicaciones prácticas potenciales.	Incorporar MO en la mezcla para las mejoras en la dispersión del grafeno	Se encontró un compuesto que modula el comportamiento del grafeno en el concreto	2021
16	Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019	Ricardo Apaza y Art Rodriguez	Se consideran opciones novedosas para la mejora del concreto en el país	Asentamiento y Resistencia a la compresión	Fallas en el diseño del experimento	Se mejora la resistencia a la compresión, pero en demérito del asentamiento, aunque queda dentro de los límites permitidos por las normas peruanas.		Se hizo un estudio novedoso en el área en Perú	<u>2019</u>

#	Título en español	Autor	Ideas principales	Indicadores	Limitaciones	Conclusiones	Recomendaciones	Relevancia	Año
17	USO DE POLVO DE GRAFITO COMO ADITIVO EN EL CONCRETO F'C 210 KG/CM2 A FIN DE MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO	José Alvarado y Bryan Roque	Se consideran opciones novedosas para la mejora del concreto en el país	Asentamiento y Resistencia a la compresión	Fallas en el diseño del experimento	Se mejora la resistencia a la compresión, así como el asentamiento, aunque queda dentro de los límites permitidos por las normas peruanas.		El grafito es un material abundante y económico	2020
18	Análisis de la Influencia del grafeno en la propiedad de durabilidad del concreto F'C 210 kg/cm2 Lima-2020	Brayan Montañez y Alexis Zabala	Se evalúa la durabilidad por exposición a los iones sulfato	Asentamiento y durabilidad	Fallas en el diseño del experimento	El grafeno aumenta la durabilidad del concreto y mejora la trabajabilidad en los niveles evaluados-		Contribuye con las pruebas de durabilidad del concreto en Perú	2020

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Matriz 2

SUBTEMAS (Indicadores)	Definición / Justificación del subtema/ delimitación temporal (si aplica)	Objetivo
Resistencia a la Compresión	La resistencia a la compresión del concreto es la propiedad del cemento que especifica cuánta carga puede soportar (generalmente en kg/cm ² , MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada, psi) cuando el cemento se convierte en una masa endurecida al mezclarse con arena y agua estándar.	Determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la resistencia a la compresión del concreto.
Asentamiento	El asentamiento del concreto se refiere a la consistencia del concreto fresco antes de que fragüe: cuanto más alto sea el asentamiento, más fluido será el concreto. Permite evaluar la trabajabilidad, que es la capacidad de ser mezclado, manipulado, transportado y colocado con una mínima pérdida de homogeneidad, es decir, segregación o sangrado.	Determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar el asentamiento del concreto.
Durabilidad	La durabilidad se define como la capacidad del concreto de resistir la acción de la intemperie, el ataque químico y la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería deseadas. Normalmente se refiere a la duración o vida útil sin problemas. Los distintos concretos requieren diferentes grados de durabilidad en función del entorno de exposición y de las propiedades deseadas. Por ejemplo, el concreto expuesto al agua de mar de las mareas tendrá diferentes requisitos que el concreto de interior.	Determinar el porcentaje de nanopartículas de grafeno para mejorar la durabilidad y la vida útil del concreto.

Autor(es)	Título	SUBTEMAS (Indicadores) 1 Resistencia	SUBTEMAS (Indicadores) 2 Asentamiento	SUBTEMAS (Indicadores) 3 Durabilidad	SUBTEMAS (Indicadores) 4 Dosis de Grafeno
Van Dac Ho, Ching-Tai Ng, Togay Ozbakkaloglu, Andy Goodwin, Craig McGuckin, Ramesh U. Karunagaran, Dusan Losic	Influence of pristine graphene particle sizes on physicochemical, microstructural and mechanical properties of Portland cement mortars	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 36.53 MPa para el concreto control y 56.33 para el concreto con grafeno de 56 micrómetros	-	-	0.07%. Tamaños de partícula en micrómetros: 5, 43, 56, 73
Mehdi Chougan, Emanuele Marotta, Francesca R. Lamastra, Francesco Vivio, Giampiero Montesperelli, Ugo Ianniruberto, Alessandra Bianco	A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 3.0 MPa para el control y 3.25 MPa para 0.2% de GO	-	-	Se emplearon % m/m = 0.01, 0.1 y 0.2 de GO
Majeed Ullah, Shahzada Burhan Ahmad Imtiaz, Rao Arsalan Khushnood, Erum Pervaiz, Wisal Ahmed, Asad Ullah, Zarar Ali Qureshi	Synthesis, characterization and application of graphene oxide in self consolidating cementitious systems	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 33.9 MPa para el control y 53.35 MPa para 0.05% de GO	-	-	Se emplearon % m/m = 0.01, 0.03 y 0.05 de GO
Tanvir S. Qureshi, Daman K. Panesar	Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 50 MPa para el control y 67.5 MPa para 0.02% de G, 62.5 MPa para 0.04% GO y 63 MPa para 0.04% rGO	-	-	Se emplearon % m/m = 0.01, 0.02, 0.04, 0.08 y 0.16 de GO, rGO y G
Liping Guo, Jiandong Wu, Hong Wang	Mechanical and perceptual characterization of ultra-high-performance cement-based composites with silane-treated graphene nano-platelets	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 125 MPa para el control y 140 MPa para 0.05% de STGNP	Valores de fluidez entre 209 mm para el control y 178 mm para 0.1 % de STGNP	-	Se emplearon % m/m = 0.01, 0.05 y 0.10 de STGNP

Yu-You Wu, Longxin Que, Zhaoyang Cui, Paul Lambert	Physical Properties of Concrete Containing Graphene Oxide Nanosheets	-	Valores de slump entre 183 mm para el control y 154 mm para 0.08% de GO	-	Se emplearon %m/m = 0.02, 0.03, 0.04, 0.06 y 0.08 de GO
Jinwoo An, Matthew McInnis, Wonseok Chung, Boo Hyun Nam	Feasibility of Using Graphene Oxide Nanoflake (GONF) as Additive of Cement Composite	-	Valores de slump entre 155.48 mm para el control y 93.29 mm para 1.0 % de GO	-	Se emplearon %m/m = 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 y 1.0 de GO
Changjiang Liu, Fulian Chen, Yuyou Wu, Zhoulian Zheng, Jingwei Yang, Bo Yang, Jiangying Yang, David Hui and Yuanbing Luo	Research progress on individual effect of graphene oxide in cement-based materials and its synergistic effect with other nanomaterials	-	Valores de slump entre 180 mm para el control y 130 mm para 1.0 % de GO	-	Se emplearon %m/m = 0.01, 0.03, 0.05, 0.08 y 0.10 de GO
S. C. Devi y R. A. Khan	Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete	-	Valores de slump entre 100 mm para el control y 95 mm para 0.08 % de GO	Se evaluó la sortividad del agua, como indicador de durabilidad del concreto.	Se emplearon %m/m = 0.02, 0.04, 0.06, y 0.08 de GO
Roosbeh Mowlaei, Junlin Lin, Felipe Basquiroto de Souza, Amirsina Fouladi, Asghar Habibnejad Korayem, Ezzatollah Shamsaei, Wenhui Duan	The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste	-	Valores del mini slump entre 130 mm para el control y 70 mm para 0.1 % de GO	-	Se emplearon %m/m = 0.025, 0.05, y 0.1 de GO
Jintao Liu, Jiali Fu, Yang Yang, Chunping Gu	Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets	-	Valores del slump entre 104 mm para 0.01% de G y 95 mm para 0.05 % de G	-	Se emplearon %m/m = 0.01, 0.025, y 0.05 de G junto con tensoactivo aniónico
Murugan Muthu, En-Hua Yang, Cise Unluer	Effect of graphene oxide on the deterioration of cement pastes exposed to citric and sulfuric acids	-	-	Prueba de resistencia al ataque de ácido fuerte y ácido débil, y su efecto en la pérdida de masa y área superficial derruida	Se emplearon %m/m = 0.015, 0.030, 0.045, 0.060, 0.075 y 0.90 de GO con policarboxilato 0.1%

Małgorzata Krystek, Dawid Pakulski, Marcin Górski, Leszek Szojda, Artur Ciesielski, Paolo Samorì	Electrochemically Exfoliated Graphene for High-Durability Cement Composites	-	-	Se estableció la migración de los iones cloruro, la sortividad y el efecto de los iones sulfato y la humedad sobre la resistencia	Se emplearon % m/m = 0.01, 0.03, 0.05, 0.075 y 0.10 de G exfoliado electroquímicamente
Li Zhao, Xinli Guo, Yuanyuan Liu, Yuhong Zhao, Zhongtao Chen, Yunsheng Zhang, Liping Guo, Xin Shud, Jiaping Liu	Hydration kinetics, pore structure, 3D network calcium silicate hydrate, and mechanical behavior of graphene oxide reinforced cement composites	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 85 MPa para el control ($a/c = 0.29$) y 95 MPa para 0.2% de GO ($a/c = 0.29$)	-	-	Se emplearon % m/m = 0.05, 0.10, 0.2 y 0.3 de GO con policarboxilato. Variación de a/c : 0.29, 0.36, 0.45 y 0.50
Kuang Sheng, Danni Li, Xiaoya Yuan	Methyl orange assisted dispersion of graphene oxide in the alkaline environment for improving mechanical properties and fluidity of ordinary portland cement composites	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 45 MPa para el control y 63 MPa para 0.03% de GO	-	Se evaluó la difusión de los iones cloruro en todas las condiciones.	Se emplearon % m/m = 0.01, 0.03, 0.05 de GO con 1:1 de naranja de metilo
Ricardo Apaza y Art Rodriguez	Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 21 MPa para el control y 24 MPa para 0.1% de G	Valores del slump entre 63.5 mm para el control y 59.27 mm para 0.1 % de G	-	Se emplearon % m/m = 0.05, 0.1 de G
José Alvarado y Bryan Roque	USO DE POLVO DE GRAFITO COMO ADITIVO EN EL CONCRETO F' C 210 KG/CM2 A FIN DE MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO	Valores de resistencia (a los 28 días) entre 28.4 MPa para el control y 29.6 MPa para 3% de G	Valores del slump entre 203.2 mm para el control y 88.9 mm para 3 % de Grafito	-	Se emplearon % m/m = 2, 2.5 y 3 de Grafito
Brayan Montañez y Alexis Zabala	Análisis de la Influencia del grafeno en la propiedad de durabilidad del concreto F' C 210 kg/cm2 Lima- 2020	-	Valores del slump entre 76 mm para el control y 102 mm para 0.5 % de G	La exposición del concreto a solución de sulfato: para 0% de G se obtuvo 16 MPa y para 0.5% de G se obtuvo 18.8 MPa	Se emplearon % m/m = 0.5 y 1.0 de G

Anexo 5. Matriz 4

ÍTE M	Nombre del artículo	AUTOR	Tipo de grafeno	Método de ensayo (como funciona o instrumento para que sirva)	Contenido de algo adicional (explicar) (arcillas, cemento)	a/c	Dosis (%)	Resistencia	Resultado	Observaciones (adicionales)	Subtema
1	Influence of pristine graphene particle sizes on physicochemical, microstructural and mechanical properties of Portland cement mortars	Van Dac Ho, Ching-Tai Ng, Togay Ozbakkaloglu, Andy Goodwin, Craig McGuckin, Ramesh U. Karunagaran, Dusan Losic	Grafeno pristino (PRG)	ASTM C109/C109M-07	-	0,48	0,07%	-	Mejora la resistencia a la compresión, teniendo en cuenta el tamaño de partícula.		Compresión
2	A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials	Mehdi Chougan, Emanuele Marotta, Francesca R. Lamastra, Francesco Vivio, Giampiero Montesperelli, Ugo Ianniruberto, Alessandra Bianco	Óxido de grafeno (GO)			0.48 - 0.6	0.05% - 0.3%	-			Compresión

3	Synthesis, characterization and application of graphene oxide in self consolidating cementitious systems	Majeed Ullah, Shahzada Burhan Ahmad Imtiaz, Rao Arsalan Khushnood, Erum Pervaiz, Wisal Ahmed, Asad Ullah, Zarar Ali Qureshi			-	0.35	0.15% - 0.25%		Se aprecia una mayor retención de la fluidez, de hasta 3 horas con asentamientos buenos para su trabajabilidad. menor calor de hidratación y una evolución más tardía del calor de hidratación	Concreto	Trabajabilidad, a/c, dosis
4	Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets	Tanvir S. Qureshi, Daman K. Panesar			-	0.33	0,11% -		El consumo de PCE aumenta con una dosis más alta. El consumo de policarboxilato es constante independientemente de la relación agua cemento de los materiales a base de concreto, pero depende de la dosis utilizada.	Concreto con diferentes marcas de policarboxilatos	Trabajabilidad, a/c, dosis
5	Mechanical and perceptual characterization of ultra-high-performance cement-based composites with silane-treated	Liping Guo, Jiandong Wu, Hong Wang			Concreto de fosfato de magnesio bórax de grado reactivo (Na ₂ B ₄ O ₇	0,18	0% - 0.36%		A mayor dosis de borax, menos fluidez del Mg PCE. La fluidez del concreto de magnesio se	pasta de MgO con PCE-bórax (PCE : 0,14% en peso de MgO; bórax: 0-0,40% en peso) se preparó con una relación en peso	Trabajabilidad, a/c, dosis

	graphene nano-platelets				10H ₂ O) y fosfato de dihidrógeno de amonio (MDP, NH ₄ H ₂ PO ₄).				<p>mantiene constante durante los primeros 5 minutos con la misma dosis (0 a 0.36%), para mantener la fluidez de la mezcla luego de 30 minutos es necesario más de 0.12% de dosis.</p> <p>La adición de policarboxilato puede reducir la pérdida de fluidez, debido a la hidratación retrasada de la pasta de cemento de fosfato de magnesio.</p>	agua / MgO de 0,20 (agua: 60 g; MgO: 300 g), de acuerdo con los requisitos de la norma china GB 8076-2008 .	
6	Physical Properties of Concrete Containing Graphene Oxide Nanosheets	Yu-You Wu, Longxin Que, Zhaoyang Cui, Paul Lambert			Concreto asfáltico		-	<p>Todas las pastas muestran una disminución en el límite elástico y la viscosidad con el aumento del contenido de SP.</p> <p>El policarboxilato es más eficaz para disminuir el límite elástico y la viscosidad</p>	Concreto asfáltico	Trabajabilidad	

									debido a que el efecto estérico es más eficaz que el efecto electrostático.		
7	Feasibility of Using Graphene Oxide Nanoflake (GONF) as Additive of Cement Composite	Jinwoo An, Matthew McInnis, Wonseok Chung, Boohyun Nam			-	-	-		El policarboxilato con baja densidad de carga tiene una dispersión inicial pobre pero una buena retención de asentamiento el policarboxilato con alta densidad de carga exhibe una mayor adherencia por adsorción en la superficie de las partículas de concreto, por lo que muestra una buena dispersión inicial pero una mala retención del asentamiento El efecto de retardo del policarboxilato sobre la hidratación del concreto aumentó con el aumento de la longitud de la cadena principal.	Artículo preferido sobre estructura química del policarboxilato	Trabajabilidad

								<p>El policarboxilato con cadenas laterales largas muestra una mayor retención de asentamiento</p> <p>El policarboxilato con gran peso molecular produce hormigones muy fluidos. De hecho, la densidad de carga, la longitud de la cadena lateral y la longitud de la cadena principal de policarboxilato pueden presentar un efecto sinérgico, restringir, cruzar o colisionar en el rendimiento de la pasta de cemento.</p> <p>El policarboxilato con cadenas principales cortas, cadenas laterales largas y alta densidad de carga exhibe una capacidad de súper dispersión.</p>	
--	--	--	--	--	--	--	--	---	--

									El policarboxilato con grupos amida / imida en la cadena lateral puede reducir significativamente la tensión superficial de la solución, mejorar la capacidad de incorporación de aire, la retención de burbujas y la resistencia a las heladas del hormigón.		
8	Research progress on individual effect of graphene oxide in cement-based materials and its synergistic effect with other nanomaterials	Changjiang Liu, Fulian Chen, Yuyou Wu, Zhoulian Zheng, Jingwei Yang, Bo Yang, Jiangying Yang, David Hui and Yuanbing Luo			Cemento portland convencional y Cemento puzolana portland	0.25,0.30,0.35	0% - 2%	Con cemento portland se muestra una mejor resistencia, además con una dosis de 0.4 a 0.7% aproximadamente se logró una resistencia mayor a 80 Mpa	Una proporción muy baja de agua a cemento ($w/c = 0.25$) no causa ninguna fluidez estática de la mezcla de mortero. La adición de superplastificante mejora la fluidez de la mezcla de mortero. Sin embargo, existe una dosis óptima para cada contenido de agua. El uso excesivo de SP	Mortero	Trabajabilidad, a/c, dosis, resistencia

									provoca sangrado y segregación. El aumento de la fluidez aumenta la resistencia a la compresión hasta cierto punto. La dosis óptima depende del superplastificante y del tipo de concreto.		
9	Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete	S. C. Devi y R. A. Khan			Arena cubierta con PCE	0,48	7.5%, 15%, 22.5%	Para la resistencia a la compresión del mortero de cemento endurecido a los 28 días, las mejoras variaron de 1.6% a 15.1% para CS1, de 2.3% a 24.3% para CS2 y de 3.9% a 31.5% para CS3.	No hubo un efecto significativo en la densidad del hormigón. se observó una reducción significativa en la densidad para la mezcla de CS3 con un contenido de arena del 10% (reducción de aproximadamente el 14%)	Mortero de arena cubierta con PCE el contenido óptimo de PCE SP en la fabricación de arena recubierta de PCE modificada era del 15% en peso de arena, debido a que ascendiendo este porcentaje el aumento a la resistencia ya no era tan significativo.	Resistencia, dosis, a/c

10	The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste	Roozbeh Mowlaei, Junlin Lin, Felipe Basquioto de Souza, Amirsina Fouladi, Asghar Habibnejad Korayem, Ezzatollah Shamsaei, Wenhui Duan			Arcillas	-	-	El exceso de electrones caracteriza la red cristalina de la mayoría de las arcillas debido a la sustitución isomorfa de cationes en la red, pueden distorsionar los electrones de par solitario de los átomos de oxígeno en la superficie de la arcilla, afectando el efecto estérico proporcionado por los aditivos superplastificante a base de policarboxilatos reducen su capacidad de dispersión y reducción de agua, lo que puede afectar seriamente el desempeño del concreto.		Trabajabilidad
11	Study on dispersion, mechanical and microstructure	Jintao Liu, Jiali Fu, Yang Yang, Chunping Gu			Humo de sílice	-	utilizó el diferente porcentaje de humo de	El valor de asentamiento de la muestra de control fue de	El humo de sílice reduce la trabajabilidad del hormigón	Trabajabilidad, resistencia

	properties of cement paste incorporating graphene sheets							sílice hasta un 25% para mejorar la CS del hormigón de 25 MPa a 35 MPa, y la trabajabilidad del hormigón se redujo en un 50%.	125 mm, y los valores de asentamiento del hormigón modificado con polímeros variaron entre 125 y 150 mm Al aumentar el porcentaje del polímero, se incrementó el tiempo de fraguado inicial y final del concreto.		
12	Effect of graphene oxide on the deterioration of cement pastes exposed to citric and sulfuric acids	Murugan Muthu, En-Hua Yang, Cise Unluer			-	0,46	1.0% - 1.8%	-	La trabajabilidad con mayores dosis de aditivo de policarboxilato fue produciendo segregación y sangrado, afectando la trabajabilidad de este	-	Trabajabilidad, a/c, dosis
13	Electrochemically Exfoliated Graphene for High-Durability Cement Composites	Małgorzata Krystek, Dawid Pakulski, Marcin Górski, Leszek Szojda, Artur Ciesielski, Paolo Samorì			Escoria finamente molida de alto horno	-	-	-	el medio de dispersión acuosa aumenta la estabilidad de agregación y sedimentación de las suspensiones de escoria. En el	Mejor estabilidad en la mezcla con superplastificantes a base de policarboxilatos	Trabajabilidad

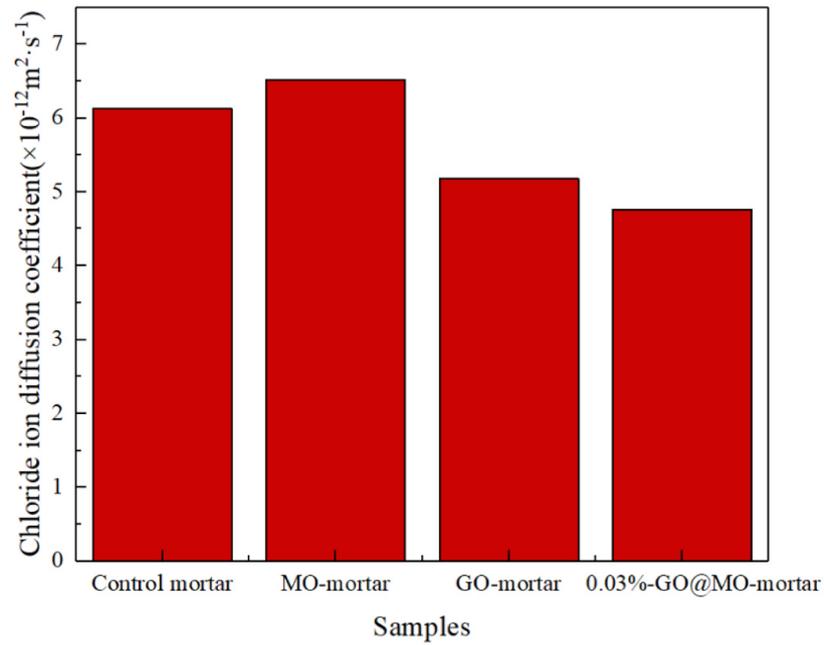
									primer período de sedimentación de partículas, en promedio, la estabilidad de la suspensión de escoria aumenta 36 veces, en el segundo período, 19 veces, en el tercer período, 4 veces.		
14	Hydration kinetics, pore structure, 3D network calcium silicate hydrate, and mechanical behavior of graphene oxide reinforced cement composites	Li Zhao, Xinli Guo, Yuanyuan Liu, Yuhong Zhao, Zhongtao Chen, Yunsheng Zhang, Liping Guo, Xin Shud, Jiaping Liu			-	0.35 - 0.39	0.05% - 0.3%	-	La eficiencia de adsorción g (Fig. 5a) disminuye con el aumento de la fuerza impulsora (dosis de PCE), mientras que la capacidad específica de adsorción q (Fig. 5b) aumenta con la dosis supuestamente hasta que se alcanzan las condiciones de meseta. Se evaluó su comportamiento y rendimiento y los resultados mostraron que la	La densidad de carga de los éteres de policarboxilato (PCE) es el impulsor de la adsorción	a/c

									densidad de carga determina la adsorción, la reducción de agua y el retardo, todo lo cual aumenta cuando aumenta la densidad de carga.		
15	Methyl orange assisted dispersion of graphene oxide in the alkaline environment for improving mechanical properties and fluidity of ordinary portland cement composites	Kuang Sheng, Danni Li, Xiaoya Yuan			-	0,53	0,25%		Una pasta más delgada trajo un espesor de capa más bajo y luego una fracción de volumen efectivo más bajo, lo que resultó en un límite elástico más bajo del concreto.	El límite elástico favorece a la trabajabilidad o no?	Límite elástico a/c, dosis
16	Análisis de la influencia del grafeno como aditivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto, Lima-2019	Ricardo Apaza y Art Rodriguez			-	0,29	0,15%	La propiedad mecánica temprana del mortero con NS / PCE es ligeramente superior	la estructura molecular del PCE podría usarse como un grupo de adsorción para mejorar la capacidad de adsorción y para mejorar la capacidad de dispersión del PCE para las partículas de	Mortero	Trabajabilidad, resistencia

								concreto			
								A 0.3% se observó una pérdida de fluidez, es decir llega a su grado de saturación, este valor es bajo debido al nanosílice que no favorece a la trabajabilidad.			
17	USO DE POLVO DE GRAFITO COMO ADITIVO EN EL CONCRETO F' C 210 KG/CM2 A FIN DE MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO	José Alvarado y Bryan Roque			Cenizas volantes	0,4		-	No se encontró segregación o sangrado visible en ninguno de los SCC remediados estudiados. La trabajabilidad, velocidad de flujo, estabilidad dinámica y capacidad de paso requeridas se lograron con éxito mediante la sobredosis adecuada de HRWRA y VMA. En comparación con la dosis de control equivalente, la		Trabajabilidad, a/c

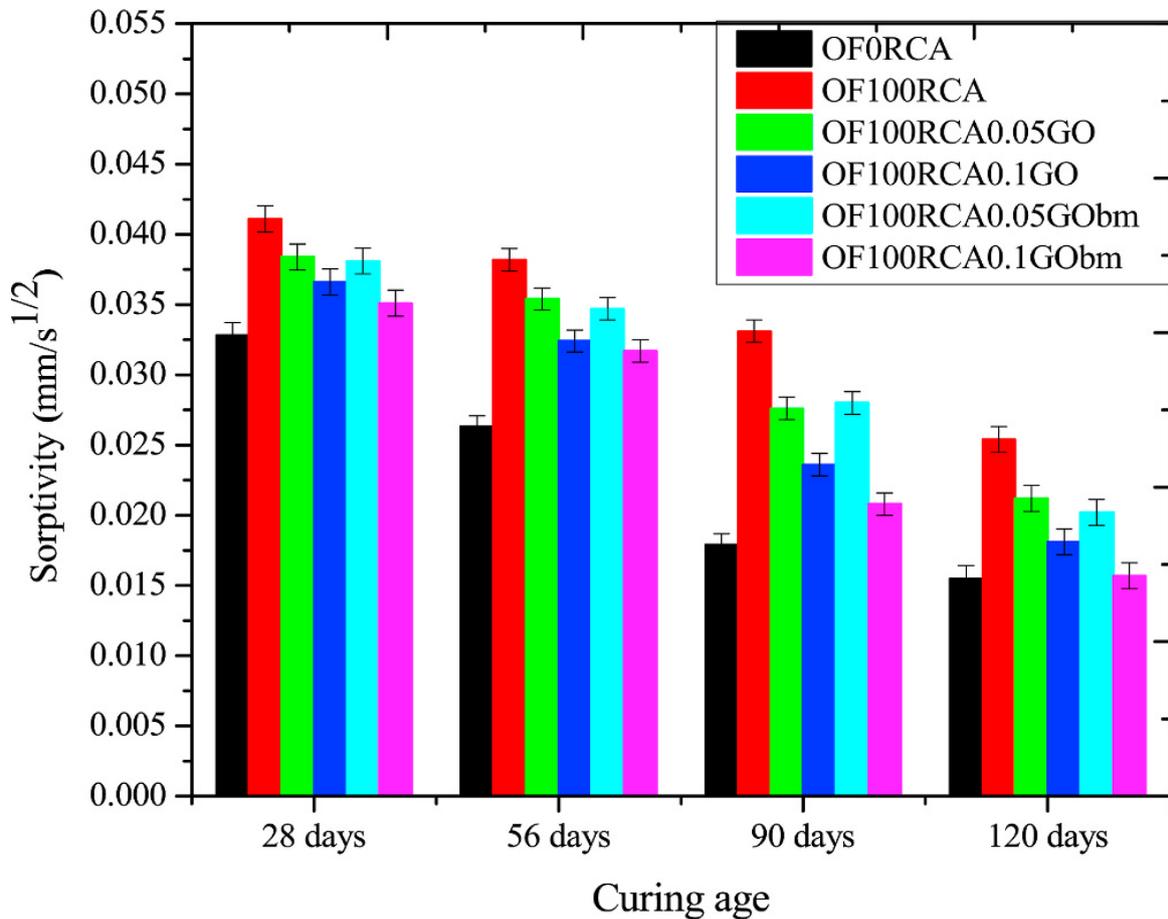
									cantidad optimizada de HRWRA para la remediación de sobredosis de 635 mm de flujo retenido aumentó, en promedio, en 6, 9, 19 y 28% después de 20, 40, 60 y 80 min de transporte, respectivamente.		
18	Análisis de la Influencia del grafeno en la propiedad de durabilidad del concreto F'c 210 kg/cm2 Lima- 2020	Brayan Montañez y Alexis Zabala			-	0,29 - 0,35	0,20%	-	los superplastificantes derivados de reticulantes con mayor contenido de grupos etoxi proporcionaron muestras de pasta de cemento con fluidez mejorada. mantuvo un alto grado de fluidez después de 2 h. La máxima fluidez de estos SP fue de 394 mm Cuando la relación agua-cemento fue de 0,29, la fluidez de	Este tipo de PCE favorecen a la retención de la fluidez de la mezcla para su transporte	Trabajabilidad, a/c y dosis

Anexo 6. Efecto del contenido de aditivo sobre la difusión del ión cloruro.



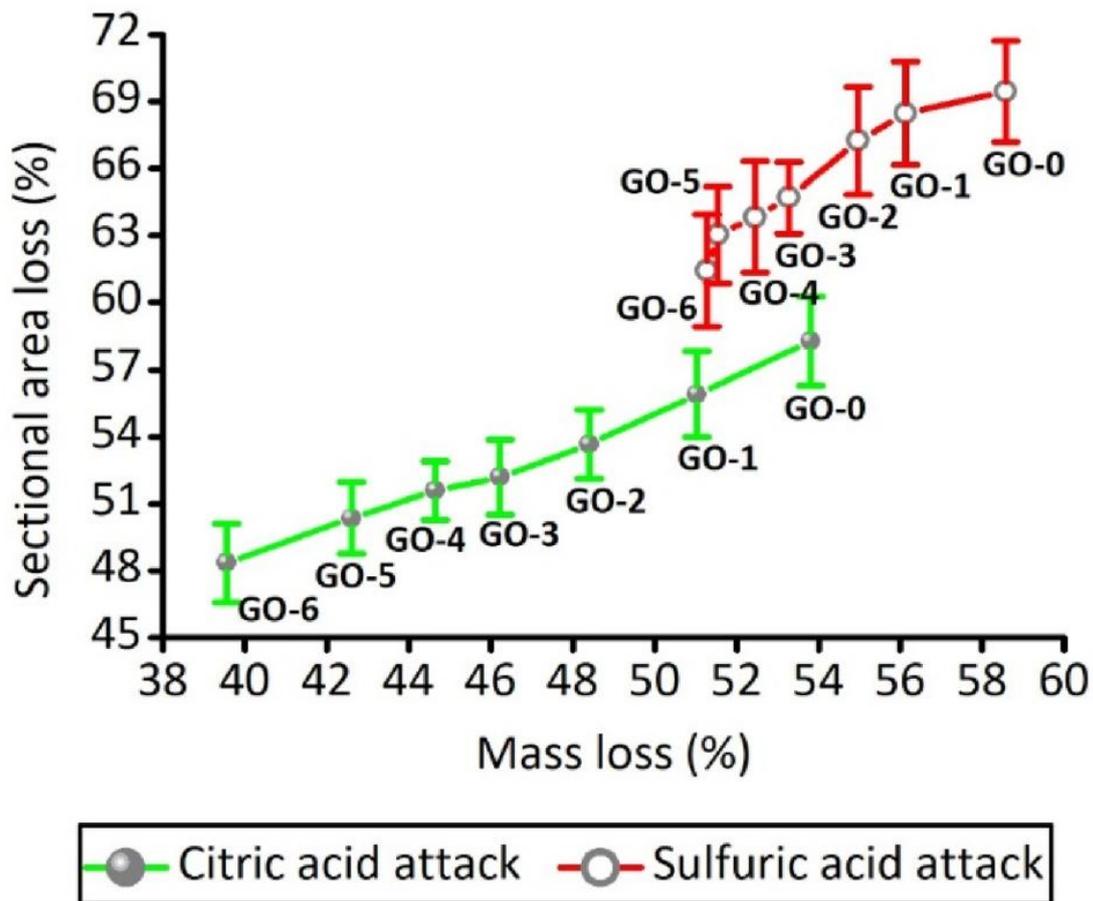
Anexo 7. Sortividad del agua en concretos tratados con óxido de grafeno

Nota. OF0RCA y OF100RCA son blancos; los demás contienen GO en las cantidades indicadas en la imagen en porcentaje. Fuente: Devi y Khan (2020)

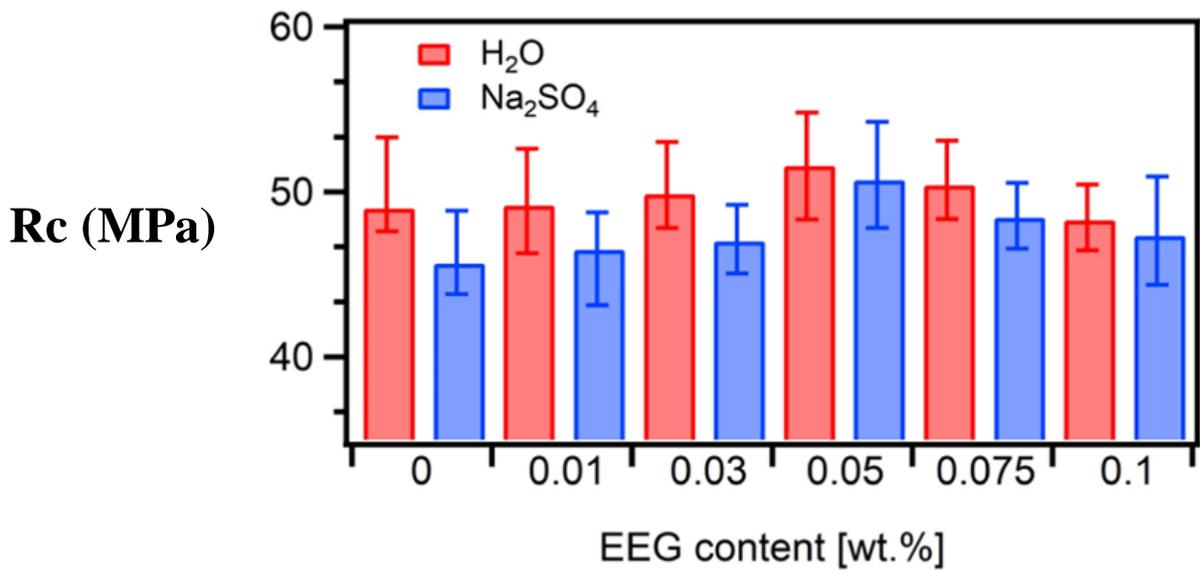


Anexo 8. Pérdidas de masa y área seccional en muestras de concreto modificado con GO tras 14 días de exposición a $C_6H_8O_7$ y H_2SO_4

Nota. 0, sin GO; 1 = 0.015, 2 = 0.030, 3 = 0.045, 4 = 0.060, 5 = 0.075, 6 = 0.090, todos como porcentaje en peso de GO.

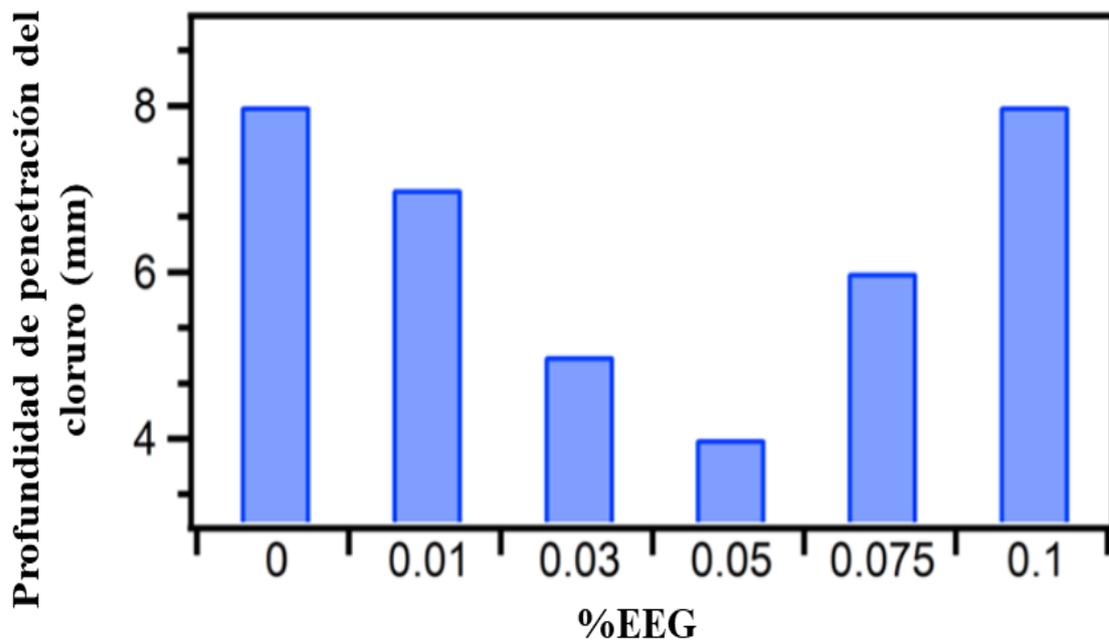


Anexo 9. Efecto de la exposición al agua, o a una solución con sulfato de sodio por 56



días, sobre la resistencia a la compresión (R_c) de bloques de concreto ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) con EEG. Fue

Anexo 10. Título: Profundidad de penetración del ión cloruro en un concreto con EEG expuesto a solución de cloruro de sodio. Fuente: Krystek et al. (2021)



Anexo 11. Medidas de adsorción de agua: sortividad primaria y secundaria para todas las muestras de concreto. Fuente: Krystek et al. (2021).

