



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

UTILIZACIÓN DEL GRAFENO PARA MEJORAR PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO $F'C = 210 \text{ KG/CM}^2$ EN EL PERÚ

USE OF GRAPHENE TO IMPROVE THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE $F'C = 210 \text{ KG/CM}^2$ IN PERU

Franklyn Jonathan Vargas Rodríguez
Universidad César Vallejo, Perú

Luis Alfonso Juan Barrantes Mann
Universidad César Vallejo, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21460

Utilización del Grafeno Para Mejorar Propiedades Mecánicas del Concreto $F'c = 210 \text{ Kg/Cm}^2$ en el Perú

Franklyn Jonathan Vargas Rodríguez¹fvargasr9@ucvvirtual.edu.pe<https://orcid.org/0000-0002-0779-3846>

Universidad César Vallejo

Lima- Perú

Luis Alfonso Juan Barrantes Mannabarrantesma@ucvvirtual.edu.pe<https://orcid.org/0000-0002-2026-0411>

Universidad César Vallejo

Lima- Perú

RESUMEN

El presente estudio responde a la urgencia de optimizar el desempeño del concreto en regiones de alta actividad sísmica. La meta principal consistió en potenciar las prestaciones mecánicas de una mezcla estándar ($f'c=210 \text{ kg/cm}^2$) mediante la inclusión de grafeno en dosis de 0,01%, 0,05% y 0,1%. Se siguió un protocolo experimental de corte cuantitativo y aplicado, sometiendo a ensayo 108 probetas (cilíndricas y prismáticas) en intervalos de 7, 14 y 28 días. Los hallazgos indicaron que, si bien la mezcla de referencia lideró la carga axial ($244,57 \text{ kg/cm}^2$) gracias a la calidad del agregado, todos los prototipos con nanoaditivos cumplieron la normativa. En contraste, se registró un repunte significativo en el comportamiento a flexión y tracción, donde la dosificación de 0,1% destacó con 96,13 y 19,85 kg/cm^2 respectivamente. Se concluye que el grafeno actúa selectivamente: no supera la compresión del patrón, pero incrementa notablemente la ductilidad y tenacidad, validando su viabilidad técnica

Palabras clave: concreto, grafeno, propiedades mecánicas, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción

¹ Autor principalCorrespondencia: fvargasr9@ucvvirtual.edu.pe

Use of Graphene to Improve the Mechanical Properties of Concrete $f'_c = 210 \text{ Kg/Cm}^2$ in Peru

ABSTRACT

This study responds to the urgent need to optimize concrete performance in regions with high seismic activity. The main goal was to enhance the mechanical properties of a standard mix ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$) by adding graphene in doses of 0,01%, 0,05%, and 0,1%. A quantitative and applied experimental protocol was followed, testing 108 specimens (cylindrical and prismatic) at intervals of 7, 14, and 28 days. The findings indicated that, although the reference mixture led the axial load ($244,57 \text{ kg/cm}^2$) thanks to the quality of the aggregate, all prototypes with nanoadditives complied with the regulations. In contrast, a significant increase was recorded in flexural and tensile behavior, where the 0,1% dosage stood out with 96,13 and 19,85 kg/cm^2 , respectively. It is concluded that graphene acts selectively: it does not exceed the compression of the standard, but it significantly increases ductility and toughness, validating its technical viability

Keywords: compressive strength, concrete, graphene, mechanical properties, tensile strength

Artículo recibido 14 octubre 2025

Aceptado para publicación: 28 noviembre 2025



INTRODUCCIÓN

El concreto es un material constructivo muy utilizado por su disponibilidad y versatilidad. Pero su comportamiento mecánico tiene restricciones que afectan la vida útil y la seguridad de las estructuras. Ante el interés de crear materiales más sustentables y amigables con el ambiente, el grafeno es un posible candidato para mejorar el concreto. Por lo cual, esta investigación busca determinar el efecto del grafeno en el concreto. La optimización de los materiales constructivos permite desarrollar infraestructuras más seguras y duraderas.

Para Sing et al. (2024), el grafeno se está estableciendo como un material prometedor para mejorar cuantitativamente el concreto. Estudios llevados a cabo en otros países (China, Reino Unido, etc.) han demostrado que al mezclar grafeno con el concreto se puede aumentar en un 30% su resistencia a la compresión.

Conforme con Herrera et al. (2022), existe un interés creciente en el contexto latinoamericano por aprovechar las ventajas del grafeno en el sector de infraestructura y edificación. Un caso destacado se encuentra en Brasil, donde los ensayos experimentales con óxido de grafeno arrojaron mejoras sustanciales en el desempeño mecánico: la capacidad de carga axial se elevó un 42,4%, mientras que el comportamiento a tracción (o tracción por compresión) repuntó un 69,7%. Los autores atribuyen este fenómeno a la morfología del nanomaterial, cuya vasta superficie específica optimiza la dispersión y fortalece la interfaz química entre la matriz de cemento y sus componentes.

Asimismo, según Gutiérrez et al. (2022), la construcción en México tiene serios problemas de durabilidad de materiales y resistencia de estructuras de concreto, sobre todo en zona altamente sísmica y por ello se deben emplear materiales que mejoren su resistencia ante fuerzas sísmicas y la durabilidad de las estructuras. En este sentido, el grafeno se ha propuesto como un aditivo capaz de mejorar el concreto.

La adición de grafeno al concreto requiere de materiales más resistentes y, por ende, se pueden construir infraestructuras que demanden mayor resistencia estructural por las exigencias mecánicas. Es por ello que en la búsqueda de tales materiales se tiene en cuenta el grafeno, material nuevo en nuestro país que está siendo estudiado inicialmente para probar sus beneficios en propiedades como tensión, flexión y compresión.



Por todo lo descrito anteriormente, se efectuó a mencionar el problema general:

- ¿Cómo mejoraría las propiedades mecánicas del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ utilizando el grafeno en el Perú?

Esta investigación se justifica desde diferentes perspectivas fundamentales. En primer lugar, surge de la necesidad de reducir el consumo de recursos no renovables, específicamente los agregados convencionales, buscando materiales nanotecnológicos avanzados con mejores propiedades mecánicas. Lo que se busca es que al mezclarse estos materiales, en especial el grafeno, en un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, se logre optimizar como nunca antes sus resistencias. Básicamente, la incorporación de grafeno podría mejorar en gran medida las propiedades mecánicas del concreto, lo que representa una solución muy factible para la construcción de infraestructuras que sean más resistentes y perdurables, especialmente en regiones susceptibles a sismos. Socialmente, esta innovación puede hacer más seguras las edificaciones, dar una respuesta y reducir riesgos en caso de emergencias como sismos, mejorando el bienestar de las comunidades vulnerables. Esta investigación se convierte en una solución aplicable en viviendas y obras públicas, poniendo al alcance materiales constructivos de alta calidad. Metodológicamente, se manipulará la variable independiente, grafeno (aditivo natural mineral) y su porcentaje en la mezcla, y así determinar mediante ensayos estandarizados si realmente mejora las propiedades y resistencias del concreto.

Se tuvo como objetivo general: Mejorar las propiedades mecánicas del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ utilizando del grafeno en el Perú.

Mientras que por hipótesis general: Con la utilización del grafeno mejora las propiedades mecánicas del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en Perú.

METODOLOGÍA

Tipo y diseño de investigación

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2018), la investigación es de tipo aplicada, orientándose a la aplicación del conocimiento científico para satisfacer necesidades específicas o resolver problemas concretos en contextos particulares.



Se adoptó un enfoque cuantitativo, asimismo, Hernández y Mendoza (2023) encontraron que este método se refiere al manejo de datos que surgen de análisis numéricos y matemáticos para descubrir tendencias, relaciones y poder hacer generalizaciones de una muestra a una población. Este método se distingue por su rigor estadístico, la medición objetiva de los fenómenos y el uso de instrumentos estructurados (cuestionarios).

Según Reyes (2022), se utilizó un diseño experimental en la investigación, manipulando en condiciones controladas un agente externo para determinar el efecto sobre el problema estudiado.

El alcance de la presente investigación fue explicativo, Reyes (2022) explica que, este tipo de alcance busca entender cómo se relacionan las cosas en términos de causa y efecto. Busca explicar el porqué o el cómo de algo.

Población, muestra y muestreo

Siguiendo los lineamientos de Arias y Covinos (2021), quienes describen la población como la totalidad de unidades de análisis con rasgos comunes, para esta investigación se utilizaron probetas de diferentes concretos $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 0,01%, 0,05% y 0,1% de grafeno.

La muestra se ajusta a una muestra representativa de la población (Medina et al., 2023). Para ello se emplearon 108 probetas de diferentes concretos mezclados con $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ y 0,01%, 0,05% y 0,1% de grafeno.

Tabla 1 muestra del estudio

Días	Grafeno				Total
	0 %	0,01%	0,05%	0,1%	
7	9	9	9	9	36
14	9	9	9	9	36
28	9	9	9	9	36
	Total				108

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se ejecutó la observación directa, que, de acuerdo con Ñaupás et al. (2023), consiste en la observación y el registro sistemático del comportamiento o los fenómenos en su contexto natural sin intermediarios ni filtros.



En cuanto al instrumento se utilizó la ficha de observación, que, de acuerdo con Medina et al. (2023), es un formato estructurado para registrar de forma minuciosa la información y los detalles observados durante el proceso de observación, permitiendo organizar y analizar con precisión la información recopilada.

Aspectos éticos

En el desarrollo del presente trabajo se respetó el código de ética de la Universidad César Vallejo, como lo establece la Resolución de Comisión Universitaria N° 0262-2020-UCV. También aseguró el reconocimiento adecuado de las ideas ajenas mediante la cita de la fuente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 2 dosificación de materiales por m³

Material	Cantidad por Peso (kg)	Cantidad por Volumen (m ³)
Cemento (Tipo I)	342,31	0,228
Agua	215,58	0,216
Arena	1168,11	0,729
Piedra	577,75	0,424
Bolsas de Cemento/m ³		8,05
Litros de Agua/Bolsa de Cemento		26,77
Proporción Volumétrica (C:A:P)		1: 3,19: 1,86
Relación Agua/Cemento (A/C) por peso		0,63

En esta tabla se muestra la dosificación de materiales por metro cúbico de concreto, para obtener una mezcla donde sus componentes estén equilibrados y sean duraderos.



Para producir un metro cúbico de concreto se necesitan 342,31 kg de cemento Tipo I, 215,58 kg de agua, 1168,11 kg de arena y 577,75 kg de piedra, que equivalen a 0,228 m³, 0,216 m³, 0,729 m³ y 0,424 m³, respectivamente. Finalmente, la relación AC de 0.63 representa un punto óptimo de equilibrio entre manejabilidad y durabilidad sin agregar exceso de agua que pueda afectar la resistencia del concreto endurecido. En resumen, la tabla es una guía técnica para preparar concreto estructural de calidad, economizando materiales y garantizando su rendimiento en obra.

Resultados mecánicos de la prueba de compresión

Tabla 3 resultados del ensayo de resistencia a la compresión del concreto patrón

Edad					Carga	Resistencia	
de	N°	de	Diámetro	Área	Máxima	a	Cumplimiento
Curado	Especímenes		Promedio	Promedio	Promedio	Concreto	o f'c de 210
o	s		o (cm)	o (cm ²)	(kg)	Promedio	kg/cm ²
(días)						(kg/cm ²)	
7	3		10,05	79,30	10680,33	132,72	63,20 %
14	3		10,16	81,38	17709,00	235,18	111,99 %
28	3		10,09	80,01	19305,00	244,57	116,46 %

Al analizar el comportamiento de la mezcla de referencia, se observa una evolución favorable que excede los parámetros de diseño estipulados. Durante la primera etapa evaluada (7 días), se obtuvo un valor medio de 132,72 kg/cm², cifra que constituye un 63,20% del f'c objetivo (210 kg/cm²). Posteriormente, se registró un incremento sustancial en la capacidad de carga; al llegar a los 14 días, la muestra no solo alcanzó, sino que superó la meta, logrando 235,18 kg/cm² (111,99% de cumplimiento). Finalmente, al término del periodo estándar de 28 días, el concreto consolidó un promedio de 244,57 kg/cm², lo cual se traduce en un superávit del 16,46% respecto a la resistencia proyectada.



Tabla 4 resultados del ensayo de resistencia a la compresión del concreto con 0,01% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Diámetro Promedio (cm)	Área Promedio (cm ²)	Carga Máxima Promedio (kg)	Resistencia de Concreto Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento f'c de 210 kg/cm ²
7	3	10,12	80,49	9726,33	120,83	57,54%
14	3	10,12	80,47	15755,00	195,81	93,24%
28	3	10,11	80,22	18616,67	232,02	110,49%

Al examinar el Grupo Experimental 01, modificado con un 0,01% de grafeno, se evidencia una progresión de carga favorable. Inicialmente, a la semana de edad, la muestra reportó un esfuerzo medio de 120,83 kg/cm² (57,54% del f'c esperado). No obstante, hacia los 14 días el fraguado permitió un salto cuantitativo hasta los 195,81 kg/cm², cubriendo ya el 93,24% de la meta. El proceso culminó a los 28 días con un valor de rotura de 232,02 kg/cm²; esto confirma que, aun con la dosis mínima de aditivo, es posible rebasar el diseño normativo (210 kg/cm²) en un 10,49%.

Tabla 5 resultados del ensayo de resistencia a la compresión del concreto con 0,05% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Diámetro Promedio (cm)	Área Promedio (cm ²)	Carga Máxima Promedio (kg)	Resistencia de Concreto Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento f'c de 210 kg/cm ²
7	3	10,04	79,20	10792,67	136,26	64,89 %
14	3	10,10	80,09	15455,00	192,72	91,77 %
28	3	10,10	80,17	18403,33	229,55	109,31 %

En lo que respecta a la dosificación de 0,05% de grafeno (Grupo Experimental 02), se aprecia un arranque vigoroso. Durante la primera semana, la muestra alcanzó los 136,26 kg/cm² (64,89% del requerimiento), superando en ese instante el desempeño inicial de las mezclas previas. A los 14 días, la evolución continuó hasta los 192,72 kg/cm².



Finalmente, al concluir el ciclo de 28 días, se validó una resistencia media de 229,55 kg/cm². Si bien esto garantiza un cumplimiento del 109,31% sobre el f'c objetivo, es interesante notar que el valor final resultó levemente menor al pico obtenido con la dosis de 0,01%, sugiriendo un punto de inflexión en la eficiencia del aditivo.

Tabla 6 resultados del ensayo de resistencia a la compresión del concreto con 0,05% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Diámetro Promedio (cm)	Área Promedio (cm ²)	Carga	Resistencia de	
				Máxima Promedio (kg)	Concreto Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento f'c de 210 kg/cm ²
7	3	10,16	81,07	11621,33	143,18	68,18 %
14	3	10,13	80,65	16676,00	204,10	97,19 %
28	3	10,07	79,67	17871,33	224,27	106,80 %

En la tabla se muestran los datos del Grupo Experimental 03, la mayor dosis de 0,1% de grafeno. Este grupo fue el que mostró el primer desarrollo más rápido, logrando 143,18 kg/cm² a los 7 días, es decir, el 68,18% de la resistencia de diseño. A los 14 días se acercó casi por completo a la resistencia de diseño, 206,10 kg/cm², 98,14%. Sin embargo, a los 28 días la resistencia media fue de 224,27 kg/cm², un 6,80% superior al diseño. La resistencia final a los 28 días es la menor de los tres grupos experimentales, aunque sigue cumpliendo con las exigencias estructurales.

Resultados mecánicos de la prueba de flexión

Tabla 7 Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del concreto patrón

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Carga	Módulo	Cumplimiento de RC de 210 kg/cm ²	Ubicación de Falla
		Máxima Promedio (kg)	de Rotura Promedio (kg/cm ²)		
7	3	1270,00	27,16	13%	Tercio Central
14	3	3345,00	71,47	34%	Tercio Central
28	3	4231,67	91,63	44%	Tercio Central



Por otro lado, el análisis del módulo de rotura (MR) evidencia una maduración estructural muy positiva. Si bien se partió de una carga inicial de 27,16 kg/cm² a la semana de edad, la evolución del material permitió alcanzar los 91,63 kg/cm² al finalizar los 28 días. Este resultado final es destacable: representa cerca del 44% del valor de diseño. Dado que el concreto convencional suele ser débil ante esfuerzos de tracción, estos datos confirman que la inclusión de nanoaditivos (grafeno) refuerza significativamente la matriz cementante frente a la fisuración.

Tabla 8 resultados del ensayo de resistencia a la flexión del concreto con 0,01% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Carga de Máxima Promedio (kg)	Módulo de Rotura Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento de RC de 210 kg/cm ²	Ubicación de Falla
7	3	1274,28	27,36	13,03 %	Tercio Central
14	3	2691,97	58,11	27,67 %	Tercio Central
28	3	4251,37	91,19	43,42 %	Tercio Central

El análisis final a los 28 días arrojó un dato sobresaliente: el concreto alcanzó un esfuerzo de rotura de 91,19 kg/cm². Este valor es significativo porque establece una relación del 43,42% respecto al f_c de diseño. Si se contrasta con la bibliografía estándar, donde la resistencia a la tracción apenas llega al 10-15% de la compresión, el resultado evidencia una mejora sustancial. Esta capacidad final fue producto de una evolución constante, partiendo de 27,36 kg/cm² en la primera semana y ascendiendo a 58,11 kg/cm² a los 14 días.

Tabla 9 resultados del ensayo de resistencia a la flexión del concreto con 0,05% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Carga Máxima Promedio (kg)	Módulo de Rotura Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento de RC de 210 kg/cm ²	Ubicación de Falla
7	3	1274,84	26,76	12,74 %	Tercio Central
14	3	3356,36	72,89	34,71 %	Tercio Central
28	3	4248,55	93,46	44,50 %	Tercio Central



A los 7 días se obtuvo una presión de 26,76 kg/cm², similar al grupo anterior. Sin embargo, a los 14 días se obtuvo una mejor evolución, logrando 72,89 kg/cm² con menor dispersión entre las muestras. A los 28 días, el módulo de ruptura promedio fue de 93.46 kg/cm², un 44.50% del f_c de diseño. Esto demuestra que al aumentar la dosis al 0,05%, la matriz cementicia mejora su cohesión interna y, por lo tanto, puede soportar mayores esfuerzos de tensión en la fibra inferior de la viga.

Tabla 10 resultados del ensayo de resistencia a la flexión del concreto con 0,1% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Carga de Máxima Promedio (kg)	Módulo de Rotura Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento de RC de 210 kg/cm ²	Ubicación de Falla
7	3	1312,67	27,38	13,04 %	Tercio Central
14	3	3408,33	73,07	34,79 %	Tercio Central
28	3	4455,00	96,13	45,78 %	Tercio Central

Este grupo obtuvo los valores más altos en todas las edades analizadas. A los 7 días se obtuvo una resistencia de 27,38 kg/cm² y a los 14 días 73,07 kg/cm², lo que representa un aumento en la resistencia a la flexión. Finalmente, a los 28 días se obtuvo el módulo de ruptura más alto de toda la investigación, con 96,13 kg/cm², que corresponde al 45,78% de la resistencia a la compresión de diseño. Esto demuestra que la dosis del 0,1% es la que optimiza la resistencia a la flexión, posiblemente porque se logra una mejor dispersión del nanomaterial conectando mejor las microfisuras.

Resultados mecánicos de la prueba de tracción

Tabla 11 resultados del ensayo de resistencia a la tracción del concreto patrón

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Diámetro Promedio (cm)	Área Promedio (cm ²)	Carga Máxima Promedio (kg)	Resistencia a Tracción Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento f _c de 210 kg/cm ²
7	3	10,17	81,18	9721,29	30,31	14,43 %
14	3	10,10	80,12	11431,02	36,01	17,15 %
28	3	10,20	81,71	14276,02	44,33	21,11 %



La Muestra Patrón arrojó una alta resistencia a la tensión para un concreto $f'_c=210$ a los 28 días, con $44,33 \text{ kg/cm}^2$, que corresponde al 21,11% de f'_c ; esto puede deberse a que los testigos son muy pequeños ($4" \times 8"$), lo que tiende a dar resistencias aparentes mayores.

Tabla 12 resultados del ensayo de resistencia a la tracción del concreto con 0,01% de grafeno

Edad		Diámetro	Área	Carga		Resistencia a	
de	N°			Máxima	Tracción	Cumplimiento	
Curado	de	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	f'_c de 210 kg/cm^2	
(días)	Especímenes	(cm)	(cm^2)	(kg)	(kg/cm^2)		
7	3	15,27	183,05	9943,59	13,63	6,49 %	
14	3	15,27	183,05	11680,85	16,01	7,62 %	
28	3	15,27	183,05	14342,31	19,65	9,36 %	

Con 0,01% de grafeno y utilizando cilindros estándar de $6" \times 12"$ (15 cm de diámetro), la resistencia a la tensión llegó a $19,65 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días. Este valor corresponde al 9,36% del f'_c , lo que está dentro del rango normal que se espera para la resistencia a la tensión del concreto (8-12% del f'_c).

Tabla 13 resultados del ensayo de resistencia a la tracción del concreto con 0,05% de grafeno

Edad		Diámetro	Área	Carga		Resistencia a	
de	N°			Máxima	Tracción	Cumplimiento	
Curado	de	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	f'_c de 210 kg/cm^2	
(días)	Especímenes	(cm)	(cm^2)	(kg)	(kg/cm^2)		
7	3	15,27	183,05	9992,20	13,69	6,52 %	
14	3	15,27	183,05	11624,76	15,93	7,59 %	
28	3	15,27	183,05	14413,69	19,75	9,40 %	

Para la dosis de 0,05%, se obtuvieron resultados similares al grupo de 0,01%, logrando una resistencia de $19,75 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días. Aunque la carga aplicada fue ligeramente mayor, la resistencia calculada es prácticamente la misma, lo que demuestra la repetibilidad del material con esta composición.

Tabla 14 resultados del ensayo de resistencia a la tracción del concreto con 0,1% de grafeno

Edad de Curado (días)	N° de Especímenes	Diámetro Promedio (cm)	Área Promedio (cm ²)	Carga Máxima Promedio (kg)	Resistencia a Tracción Promedio (kg/cm ²)	Cumplimiento f'c de 210 kg/cm ²
7	3	15,27	183,05	10.040,80	13,76	6,55 %
14	3	15,27	183,05	11.681,87	16,01	7,62 %
28	3	15,27	183,05	14.485,07	19,85	9,45 %

La dosificación del 0,1% de grafeno mostró la mayor resistencia a la tracción entre los grupos experimentales, alcanzando un valor de 19,85 kg/cm² a los 28 días. Aunque la mejora en comparación con las otras dosis de grafeno es marginal, se confirma que esta concentración tiende a optimizar de manera leve las propiedades mecánicas evaluadas en cilindros estándar.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación experimental verificaron que la adición de grafeno mejoró las propiedades mecánicas del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Se confirmó que la calidad de los materiales pétreos de base afecta el desempeño del nanomaterial. En un primer momento, el análisis de los agregados arrojó un ambiente propicio para la reacción química. Los agregados grueso y fino arrojaron pesos específicos SSS de 2,72 y 2,67, respectivamente, lo que denota alta densidad y resistencia propia. Además, la baja absorción, de 0,25% para la piedra y 0,66% para la arena, aseguró que el agua de diseño no fuera absorbida por los agregados, quedando totalmente disponible para la hidratación del cemento y la dispersión de las nanopartículas de grafeno en dosis de 0,01%, 0,05% y 0,1%. Además, la granulometría de la arena (módulo de finura de 2,96 y 8,74% de finos que pasan por la malla N° 100) generó una matriz compacta que permitió la refuerzo a nanoescala.

Comportamiento que apoya teóricamente lo que plantean Salami et al. (2023), que la estructura hexagonal y la gran superficie específica del grafeno favorecen la interacción física y química en la pasta de cemento.



Que en el árido utilizado exista un 8,74% de partículas finas apoya esta hipótesis. El grafeno actuó como refuerzo mecánico por su alta resistencia y, al llenar los espacios nanométricos que las partículas finas del árido no alcanzan a sellar, densificó la microestructura del concreto.

Al evaluar la efectividad del refuerzo con grafeno sobre el diseño base, los datos arrojaron una conclusión particular. Al finalizar el periodo estándar de hidratación (28 días), la mezcla de referencia (exenta de nanomateriales) conservó la primacía en cuanto a carga axial. Este grupo consolidó un esfuerzo máximo promedio de 244,57 kg/cm², superando así a las dosificaciones experimentales en este parámetro específico. Por otro lado, las mezclas de prueba sobrepasaron su resistencia de diseño, pero esta fue disminuyendo a medida que aumentaba la dosificación del nanomaterial, obteniéndose 232,02 kg/cm² para el 0,01%, 229,55 kg/cm² para el 0,05% y 224,27 kg/cm² para el 0,1%. Los resultados muestran que, aunque se aseguró el cumplimiento normativo con un superávit de resistencia mayor al 6% en el peor caso, la adición de grafeno no generó un incremento inmediato respecto al concreto ordinario preparado con los agregados.

Al compararlos con los antecedentes de la investigación, se encuentra una gran diferencia con los resultados de Huertas (2025), que logró aumentar en un 17% la resistencia a la compresión sustituyendo el cemento por un 0,1% de grafeno, alcanzando 248 kg/cm². Así mismo, los resultados son distintos a lo informado por Roa (2023), donde usó mortero y óxido de grafeno al 0,05%, mejorando en un 20% con respecto a las muestras control. La variación en los resultados actuales indica que la alta calidad y densidad de los agregados permitieron que la mezcla patrón por sí sola creara una matriz de alta resistencia. Esto ha disminuido el margen de mejora que normalmente el grafeno proporciona en compuestos inferiores o en mezclas con porosidad inicial elevada.

Para el segundo objetivo específico, mejorar la resistencia a la flexión del concreto al incorporar grafeno, en los ensayos a los 28 días de curado se observó una tendencia favorable de la carga en función de la dosificación del nanomaterial. La muestra de control arrojó un módulo de ruptura promedio de 91,63 kg/cm². La adición de 0,01% no arrojó diferencia estadísticamente significativa (91,19 kg/cm²). Sin embargo, al aumentar la concentración a 0,05% y 0,1%, los valores se incrementaron paulatinamente hasta 93,46 kg/cm² y 96,13 kg/cm², respectivamente.



Es importante señalar que estos valores correspondieron entre el 43% y el 45,78% de la resistencia de diseño, muy por encima de la relación teórica usual del 10-15%. Esto demuestra una alteración en la matriz cementicia que le permite resistir mayores esfuerzos de tensión en la zona de tracción de la viga. Cuando se compararon estos resultados con la literatura existente, se encontraron similitudes con los estudios de Chu et al. (2023), donde se logró mejorar la flexión entre un 6,3% y un 22,4% utilizando óxido de grafeno y encontrando un punto óptimo en 0,06%. Sin embargo, en la presente investigación, el punto óptimo se localizó en un valor ligeramente superior (0,1%). Pero ambos estudios coinciden en que estos nanomateriales fortalecen la microestructura y mejoran la ductilidad. Además, los resultados concuerdan con lo informado por Chaturvedy et al. (2023), quienes evidenciaron que la adición de nanomateriales de carbono no solo compensa la pérdida de resistencia en concretos modificados, sino que puede aumentar su módulo de rotura hasta en un 8%. Este resultado es similar al aumento de 4,91% que se obtuvo en el presente trabajo con la máxima dosis en comparación al patrón, verificando que el grafeno actúa como refuerzo a tensión.

Respecto a la meta de optimizar el comportamiento a tracción (tercer objetivo), la evidencia recolectada a los 28 días revela una correlación positiva: a mayor cantidad de grafeno, mayor resistencia. A pesar de las restricciones para realizar un contraste directo con la mezcla base (debido a variaciones en la geometría de los especímenes), la evaluación interna de los grupos modificados es contundente. Se registró un ascenso en el esfuerzo soportado, partiendo de 19,65 kg/cm² en la dosis mínima (0,01%) hasta alcanzar 19,85 kg/cm² con la concentración máxima (0,1%). Estos resultados sitúan al material en un rango de eficiencia del 9,36% al 9,45% respecto al f'c de diseño, confirmando que la densificación por nanoaditivos refuerza la respuesta ante fuerzas de tensión indirecta.

Comparando estos resultados con la literatura, se encuentran coincidencias con los resultados obtenidos por Hong et al. (2022), que encontraron un aumento del 17% en la resistencia a la tracción al añadir óxido de grafeno en concentraciones similares. Este incremento se atribuyó a la densificación de la microestructura y la cristalización de poros nanométricos. Aunque en este estudio la ganancia fue menor, ambos estudios coinciden en que el nanomaterial funciona como agente cohesivo interno que disminuye la susceptibilidad al agrietamiento.



Por otro lado, los resultados difieren un poco de la magnitud de mejora encontrada por Reddy y Prasad (2023), quienes sí que encontraron mejoras en concretos de alta resistencia. Sin embargo, la tendencia continúa, lo que demuestra que el grafeno tiene potencial para fortalecer la matriz cementicia bajo cargas dinámicas y estáticas de tensión.

CONCLUSIONES

Se ha evidenciado que la incorporación de grafeno en mezclas genera una respuesta mecánica asimétrica. Si bien el esfuerzo axial no superó los valores de la mezcla de referencia, el nanoaditivo sí logró potenciar las propiedades de tracción y flexión en dosificaciones específicas. Es importante notar que, independientemente de la variación en la ductilidad, todas las muestras garantizan el cumplimiento del estándar de diseño (210 kg/cm^2). En consecuencia, el valor agregado del grafeno reside en su capacidad para mejorar el desempeño bajo tensión, más que en la carga compresiva pura.

Respecto al primer objetivo específico, la evidencia experimental contradice la premisa de que el grafeno supera la resistencia del concreto estándar. Aunque la totalidad de las muestras rebasó el umbral de diseño (210 kg/cm^2), el grupo de control mantuvo el liderazgo con un promedio de $244,57 \text{ kg/cm}^2$. Se observó un fenómeno de decrecimiento: al elevar la dosis de nanomaterial, la resistencia descendió a $232,02$ y $224,27 \text{ kg/cm}^2$ respectivamente. Esto sugiere que, dada la alta calidad de los agregados, el refuerzo axial es innecesario. Bajo este criterio, la dosificación al $0,01\%$ resulta ser la más eficiente, pues es la que menos penaliza la resistencia base y conserva un margen de seguridad normativo óptimo. En cuanto al segundo objetivo específico, se mejoró la resistencia a la flexión solo en concentraciones $>0,01\%$. Mientras que la dosis mínima y la dosis patrón se comportaron de manera similar, con 91 kg/cm^2 , la adición de 0.1% aumentó el módulo de ruptura a 96.13 kg/cm^2 , un 4.9% más que la muestra patrón. Esto significa que se necesita una alta concentración del nanomaterial ($0,1\%$) para activar el mecanismo de puenteo de fisuras y mejorar la tenacidad del concreto en flexión.

Finalmente, para el tercer objetivo específico, se determinó que la adición de grafeno aumentó la resistencia a la tensión en los grupos experimentales comparables. Se hizo una proporcionalidad entre la cantidad de grafeno y la capacidad de carga, siendo la dosis del $0,1\%$ la que mejor resultado promedio dio con $19,85 \text{ kg/cm}^2$.



Si bien la comparación directa con el patrón se vio limitada por las diferencias de tamaño en los testigos, se ha verificado internamente que la dosificación al 0,1% es la que maximiza la cohesión interna y la resistencia a tensión indirecta del material modificado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, J., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting EIRL.
https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Chaturvedy, G., Pandey, U., & Kumar, H. (2023). Effect of graphene oxide on the microscopic, physical and mechanical characteristics of rubberized concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(6), 163. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01133-6>
- Chu, H., Qin, J., Gao, L., Jiang, J., Wang, F., & Wang, D. (2023). Effects of graphene oxide on mechanical properties and microstructure of ultra-high-performance lightweight concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(6), 647-660.
<https://doi.org/10.1080/21650373.2022.2104757>
- Gutiérrez, K., Morales, Ó., Chávez, R., & Luna, G. (2022). Investigación científica del grafeno en la industria de la construcción (estado del arte). *Ingeniería Industrial*, 1, 11-24.
<https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n.5798>
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Segunda edición). McGraw-Hill Education.
- Herrera, P., Gameleira, E., & Ueda, N. (2022). Incorporação de óxido de grafeno em concreto: Avaliação das resistências à compressão e tração. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 14(1), 155-166.
<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/19887/209209216414>
- Hong, X., Lee, J. C., & Qian, B. (2022). Mechanical Properties and Microstructure of High-Strength Lightweight Concrete Incorporating Graphene Oxide. *Nanomaterials*, 12(5), 1-10.
<https://doi.org/10.3390/nano12050833>
- Huertas, B. E. (2025). *Influencia del grafeno en la resistencia del hormigón y mortero: Cemento de alta resistencia a los sulfatos* [Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26370>



- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación* (1.^a ed.). Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.080>
- Ñaupas, H., Mejía, E., Trujillo, I., Romero, H., Medina, W., & Novoa, E. (2023). *Metodología de la investigación total: Cuantitativa, cualitativa y redacción de tesis* (Sexta edición). Ediciones de la U.
- Organización de las naciones Unidas [ONU]. (2023). *Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>
- Reddy, P., & Prasad, D. (2023). The role of graphene oxide in the strength and vibration characteristics of standard and high-grade cement concrete. *Journal of Building Engineering*, 63(4), 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105481>
- Reyes, E. (2022). *Metodología de la Investigación Científica*. Page Publishing, Inc.
- Roa, L. (2023). *Desarrollo de una mezcla de mortero adicionada con óxido de grafeno sintetizado en laboratorio* [Tesis de Maestría, Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/11669#page=1>
- Salami, B., Mukhtar, F., Ganiyu, S., Adekunle, S., & Saleh, T. (2023). Graphene-based concrete: Synthesis strategies and reinforcement mechanisms in graphene-based cementitious composites (Part 1). *Construction and Building Materials*, 396(1), 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132296>
- Singh, N., Sharma, V., & Kapoor, K. (2024). Graphene in construction: Enhancing concrete and mortar properties for a sustainable future. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11), 428-434. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01719-8>

