

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Influencia del grafeno obtenido por exfoliación en
fase líquida como adición en la resistencia del
concreto, Lima - 2021**

Jose Omar Cotrina Salvatierra

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Lima, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Expreso cordial agradecimiento a mi asesor el Mg. Jorge Aurelio Ticlla Rivera por la aceptación y apoyo, para desarrollar la presente investigación. Así mismo, agradezco a mi querida docente Mg. Betzabet Evelin Vilavila Noriega, una persona excepcional que me brindó su confianza, amistad e inspiración cuando finalice mi carrera universitaria, para desarrollar e iniciar las investigaciones con grafeno.

A la Mg. Nabilt Jill Moggiano Aburto, una persona magnánima y su gran profesionalidad que me brindaron todos los conocimientos metodológicos para esta investigación, al mismo tiempo al Ing. Karol Hernando Del Mar León por su amistad, confianza y la oportunidad brindada, para poder desempeñarme laboralmente en la carrera de ingeniería.

Además, debo agradecer a la Dra. María Esther Quintana Caceda, por su apoyo y orientación en el estudio minucioso del grafeno, que me llevaron a poder emplear la exfoliación en fase líquida para esta investigación. Al Dr. Alberto Rivelino Patiño Rivera, por su asesoría metodológica investigativa, revisión ortográfica y de estilo, con paciencia, comprensión y orientación didáctica para el logro de estándares de calidad de esta investigación. Finalmente, a la Lic. T. M. Jackeline Karina Santa Cruz Santa Cruz por su magnificencia y su gran personalidad, lograron un punto de inflexión en mi interés en el desarrollo de la ciencia y tecnología, para el inicio de las investigaciones con grafeno en concreto.

Esta investigación se desarrolló frente a diferentes adversidades y limitaciones, en la obtención del grafeno durante la pandemia del Covid-19, respetando los protocolos y elementos de bioseguridad, llegando a estudiar y analizar un método de producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, siguiendo el procedimiento adecuado de otras investigaciones realizadas con éxito.

DEDICATORIA

Con amor a mis padres Jose Cesar y Nayda, a mi hermana Betsy Jackeline y mi abuela Vilma Vento, por el apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, también por vuestra comprensión brindada. A mis grandes amigos de la vida, Ninos, Trinity, Nano, Caputo y Rocket, por los que fueron y son la gran compañía en todo el momento y cada etapa de mi desarrollo humano, firmes y dignos en nuestros quehaceres.

“La mejor decisión de la vida, es qué hacer con el poco tiempo que tenemos”.

“No es fácil librarse de gente que no discierne entre el tiempo que dedicáis a vuestros ocios y el que consagráis a vuestro trabajo.”

Teofrasto

“Se ama más lo que con más esfuerzo se ha conseguido”.

Aristóteles

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I	18
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	18
1.1 Planteamiento y formulación del problema	18
1.1.1 Planteamiento del problema	18
1.1.2 Formulación del problema	24
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivo general	24
1.2.2 Objetivos específicos	24
1.3 Justificación e Importancia	24
1.3.1 Limitación	25
1.3.2 Delimitación	26
1.4 Hipótesis y descripción de variables	26
1.4.1 Hipótesis de Investigación	26
1.4.2 Hipótesis Nula	26
1.4.3 Descripción de variables	27
3.2.2 Operacionalización	27
CAPÍTULO II	29
MARCO TEÓRICO	29
2.1 Antecedentes de investigación	29
2.2 Bases Teóricas	39
2.2.1 Fundamentos teóricos	39
2.3 Definición de términos básicos	89
CAPÍTULO III	92
METODOLOGÍA	92
3.1 Método y alcances de la investigación	92
3.1.1 Método de la investigación	92
3.1.2 Alcances de la investigación	96
3.2 Diseño de la investigación	96
3.2.1 Tipo de diseño de investigación	96

3.3	Población y muestra	97
3.3.1	Población	97
3.3.2	Muestra	97
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	97
3.4.1	Técnicas utilizadas en la recolección de datos	98
3.4.2	Instrumentos utilizados en la recolección de datos	98
CAPÍTULO IV		99
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		99
4.1	Resultados del tratamiento y análisis de información	99
4.1.1	Materiales para el concreto	99
4.1.2	Diseño de mezcla por el método ACI	102
4.1.3	Elaboración y producción de grafeno por exfoliación en fase líquida	107
4.1.4	Elaboración de la mezcla de concreto para ensayos de resistencia.	119
4.1.5	Resultado de las resistencias del concreto a compresión y flexión	127
4.2	Prueba de hipótesis	130
4.2.1	Análisis descriptivo	130
4.2.2	Análisis inferencial	131
4.3	Discusión de resultados	139
4.3.1	Análisis de costos	148
CONCLUSIONES		150
RECOMENDACIONES		151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		152
ANEXOS		156
Anexo A: Matriz de consistencia		156
Anexo B: Validación de instrumentos		157
Anexo C: Especificaciones del grafito de Sigma Aldrich		160
Anexo D: Precio y certificado de análisis del alcohol polivinílico		163
Anexo E: Características del cemento tipo I		165
Anexo F: Resultados de laboratorio		167
Anexo G: Evidencias fotográficas		182
Anexo H: Cálculo y comprobación estadística		189

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i>	Derrumbe del edificio Nuevo León, terremoto de 1985 en la ciudad de México. “Los sismos y su efecto en las estructuras”	19
<i>Figura 2.</i>	a) Sismo, Chile en 1960, b) Sismo, Haití en 2010	20
<i>Figura 3.</i>	Casa muy dañada en el barrio 1° de Mayo (Cercado de Lima)	22
<i>Figura 4.</i>	Alótropos de carbono y materiales relacionados	40
<i>Figura 5.</i>	(A) Cristal de grafito, (B) Empaque 3-D de láminas de grafeno en grafito y (C) Jerarquía de hidrocarburos aromáticos desde benceno hasta grafeno	41
<i>Figura 6.</i>	Línea de tiempo de eventos seleccionados en la historia de grafeno para su preparación, aislamiento y caracterización	42
<i>Figura 7.</i>	Red hexagonal de grafeno	43
<i>Figura 8.</i>	La “madre de todas las formas gráficas”. Representación esquemática del grafeno, que es el material de partida fundamental para una variedad de materiales de fullereno; C60 (buckyballs) (fila inferior izquierda), CNT (fila inferior en el centro) y grafito (fila inferior a la izquierda)	44
<i>Figura 9.</i>	a) Nanocinta de grafeno “Graphene Nanoribbon” y b) Transparencia de grafeno	45
<i>Figura 10.</i>	Fluctuación de la superficie de grafeno	46
<i>Figura 11.</i>	Una representación esquemática de la estructura de un cristal de grafito hexagonal que muestra una celda unitaria: Vista superior del plano basal del grafito y una representación esquemática de la estructura de la superficie (átomos de carbono) del grafito	47
<i>Figura 12.</i>	Los vectores de red (recíprocos), sub redes y la zona Brillouin del grafeno	49
<i>Figura 13.</i>	La estructura de la banda electrónica del grafeno calculada a partir del Modelo de Unión Estrecha, con parámetros de salto $t = 2.7 \text{ eV}$ y $t' = -0.2t$	50
<i>Figura 14.</i>	(A) Estructuras atómicas de la bicapa de grafeno y los parámetros de salto entre orbitales p_z . (B-D) La dispersión de energía electrónica de la bicapa de grafeno en el régimen de baja energía, donde el grafeno monocapa y bicapa son semiconductores de cero brechas (zero-gap), pero un campo eléctrico aplicado perpendicularmente a la bicapa abre un espacio de banda.	51
<i>Figura 15.</i>	Morfologías típicas de láminas de grafeno independientes en equilibrio térmico a temperatura ambiente, obtenidas a partir de simulaciones de dinámica molecular. (A) Hoja de grafeno con bordes zigzag con longitud L y ancho W. (B) La conformación de la membrana con ondulaciones intrínsecas fuera del plano observadas en la hoja de grafeno con una relación de aspecto $n=L/W$ cercana a 1. (C) La conformación de la cinta en $n=11$. Se puede observar la flexión y la torsión a lo largo de la dirección de la longitud del contorno. (D) El nanorollo estabilizado por la interacción de Van der Waals entre capas de grafeno adyacente en una relación de aspecto alta ($n=114$)	53

<i>Figura 16.</i> a) Primeros modelos de óxido de grafeno con estructuras reticulares regulares, b) Modelos atómicos de óxidos de grafeno con grupos ricos en oxígeno distribuidos aleatoriamente	55
<i>Figura 17.</i> Principales rutas sintéticas para la preparación de grafeno	57
<i>Figura 18.</i> Mecanismo de exfoliación del grafito a base de cizalla y turbulencia	60
<i>Figura 19.</i> El mecanismo de formación de las láminas de grafeno	60
<i>Figura 20.</i> Grafeno obtenido mediante exfoliación en fase líquida de grafito	62
<i>Figura 21.</i> La estructura de los disolventes, surfactantes y polímeros	63
<i>Figura 22.</i> a) Concentración vs Tiempo de mezcla para todos los experimentos de mezcla en soluciones de PVA. b) Concentración vs Tiempo de mezcla para todos los experimentos de mezcla de soluciones de colato de sodio	64
<i>Figura 23.</i> Estabilidad de las suspensiones de grafeno exfoliadas con colato de sodio por un período de 6 meses y degradación de 10 días de las suspensiones de grafeno exfoliadas con detergente doméstico (Fairy)	64
<i>Figura 24.</i> a) Mezclador de alto cizallamiento Silverson modelo L5M con cabezal mezclador en un vaso de precipitados de 5 l de dispersión de grafeno. b,c,e) Vista de un cabezal mezclador D=32 mm, vista del rotor/estator y un esquema del funcionamiento del rotor-estator, con la dirección del flujo de líquido. d) Dispersión grafeno-NMP producido por exfoliación con cizalla (3). f) Escamas de grafito y surfactante colato de sodio usado para la producción de grafeno funcionalizado disperso en agua y (derecha) una solución de grafeno estabilizado con surfactante y grafeno funcionalizado con moléculas de surfactante (recuadro)	65
<i>Figura 25.</i> a) Los componentes del concreto (cemento, agua, agregado fino y agregado grueso). b) Variación de proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto	66
<i>Figura 26.</i> Modelo de computadora para la relación agua/cemento de 0.50, para una un cemento tipo I: C3S = 55%, C2S = 18%, C3S = 8% y C4AF = 8%. "AFt y AFm" incluyen etringita (AFt) y monosulfoaluminato de calcio (AFm) y otros hidratados de aluminato de calcio	70
<i>Figura 27.</i> a) Agregado fino (arena). b) Agregado grueso, con grava redondeada (izquierda) y piedra chancada o triturada (derecha)	72
<i>Figura 28.</i> Especímenes cilíndricos de concreto de 4x8 pulgadas (izquierda) y 6x12 pulgadas (derecha), para ensayos a la resistencia a la compresión	78
<i>Figura 29.</i> Especímenes de vigas prismáticas (superior) y el esquema para ensayar a flexión con cargas a los tercios según la NTP 339.078 (inferior)	81
<i>Figura 30.</i> Técnicas e instrumentos desarrollados en la investigación de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en el concreto	98
<i>Figura 31.</i> Cemento Portland tipo I – cemento Sol	100
<i>Figura 32.</i> Ubicación de la cantera de agregados en Carabayllo-Lima	101
<i>Figura 33.</i> Agregado grueso de 3/4" de tamaño nominal máximo	101

<i>Figura 34.</i> Ubicación de la cantera de agregados en Carabayllo-Lima	102
<i>Figura 35.</i> Curva de granulometría del agregado grueso	103
<i>Figura 36.</i> Curva de granulometría del agregado fino	104
<i>Figura 37.</i> Grafito en polvo	107
<i>Figura 38.</i> A) Licuadora Kenwood para la exfoliación por cizallamiento de grafito. B) Proceso de mezcla usando detergente doméstico. C) Una imagen TEM de una escama de grafeno producida por exfoliación por cizallamiento en una licuadora. D) Espectroscopia Raman típico de grafeno exfoliado. E) Concentración de grafeno exfoliado vs concentración de grafito para tres tiempos de mezcla diferentes	109
<i>Figura 39.</i> Taladro Bosch y cuchilla doméstica de licuadora para la exfoliación del grafito por cizallamiento	110
<i>Figura 40.</i> La región encima de la línea negra representa turbulencia ($Re > 104$), mientras que la región de la línea roja representa un mínimo de $y_{min} > 104S^{-1}$	111
<i>Figura 41.</i> Concentración de grafeno vs tiempo de mezcla, utilizando PVA	113
<i>Figura 42.</i> Espuma generada después del mezclado	114
<i>Figura 43.</i> Medición de peso de los materiales para la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida mediante la exfoliación del grafito por cizallamiento	117
<i>Figura 44.</i> Separación del grafeno exfoliado por cizallamiento del grafito sedimentado por acción de la gravedad, después de 5 días estático del recipiente con la mezcla	117
<i>Figura 45.</i> Medición del grafito sedimentado después de la mezcla	118
<i>Figura 46.</i> Grafito final, después de eliminar el agua del grafito sedimentado	118
<i>Figura 47.</i> Recipiente con grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida mediante la exfoliación de grafito por cizallamiento	118
<i>Figura 48.</i> Elaboración de mezclas de concreto en vigas prismáticas y probetas cilíndricas	119
<i>Figura 49.</i> Elaboración de mezclas de concreto en vigas prismáticas y probetas cilíndricas	120
<i>Figura 50.</i> Curado y desencofrado de los especímenes cilíndricos y prismáticos	120
<i>Figura 51.</i> Ensayo de resistencia a compresión	121
<i>Figura 52.</i> Modelo gráfico del ensayo de resistencia a compresión	122
<i>Figura 53.</i> Modelo gráfico del ensayo de resistencia a flexión (módulo de rotura)	125
<i>Figura 54.</i> Ensayos de resistencia a la flexión (módulo de rotura)	125
<i>Figura 55.</i> Resistencia del concreto a la compresión vs edad del concreto (tiempo)	127
<i>Figura 56.</i> Resistencia a la compresión del concreto con adición de diferentes concentraciones (CG) grafeno/agua en función del concreto estándar	128
<i>Figura 57.</i> Resistencia del concreto a la flexión (módulo de rotura)	129
<i>Figura 58.</i> Resistencia a flexión (módulo de rotura) del concreto con adición de diferentes concentraciones (CG) grafeno/agua en función del concreto estándar	129
<i>Figura 59.</i> Toma de decisión de la resistencia a la compresión del concreto	138

<i>Figura 60.</i> Toma de decisión de la resistencia a la flexión del concreto	139
<i>Figura 61.</i> Esquema de protocolo de centrifugación para seleccionar una amplia variación de tamaños a partir de una dispersión (superior) y un histograma de longitud TEM de muestras seleccionadas por tamaño con longitud media y velocidad de centrifugación (inferior)	140
<i>Figura 62.</i> Resistencia a la compresión del concreto reforzado con grafeno. a) Materiales para la elaboración del concreto y el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida. b) Cubos de concreto para los ensayos. c) Curva de esfuerzo-deformación de un cubo de concreto en compresión, comparado el concreto estándar con refuerzo de grafeno (IG y FG) y grafito (UTGr). d) La evolución de resistencia a la compresión del concreto (f_c) a diferentes tiempos de (IG, FG, UTGr y concreto estándar). e) evolución del (f_c), con diferentes concentraciones de FG. f) determinando la concentración de IG óptimo para un f_c , cada punto es promedio de tres cubos	141
<i>Figura 63.</i> Resistencia a la flexión del concreto reforzado con grafeno. a) Esquema de la resistencia a flexión de una viga de concreto. b) Curva de esfuerzo-deformación de una carga máxima de esfuerzo de flexión y deformación f_{cr} , en concreto estándar y reforzado con grafeno (IG). c) Evolución de la resistencia a la flexión (f_{cr}), con concentración de IG reforzado en el concreto	142
<i>Figura 64.</i> Imágenes SEM (a) concreto 0.0% GO, (b) 0.06% GO, (c) 0.08% GO	145
<i>Figura 65.</i> Calidad y precios de diferentes métodos	148

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Evaluación del riesgo de colapso de las construcciones en el Cercado de Lima después del sismo de 2007, en edificios públicos o que reciben público</i>	22
<i>Tabla 2. Evaluación del riesgo de colapso de las construcciones en el Cercado de Lima después del sismo de 2007, en viviendas particulares</i>	22
<i>Tabla 3. Matriz de operacionalización de variables</i>	28
<i>Tabla 4. Algunas propiedades del grafeno reportadas</i>	48
<i>Tabla 5. Propiedades de conductividad eléctrica de materiales</i>	52
<i>Tabla 6. Propiedades de conductividad térmica de materiales</i>	54
<i>Tabla 7. Comparación de métodos de exfoliación comunes</i>	59
<i>Tabla 8. Ejemplos de exfoliación en fase líquida de grafito bajo cizallamiento de alta velocidad</i>	61
<i>Tabla 9. Composición química del cemento Portland</i>	67
<i>Tabla 10. Las formas del sulfato de calcio (yeso)</i>	68
<i>Tabla 11. Porcentaje típicos que intervienen en el cemento Portland</i>	69
<i>Tabla 12. Tipos de cemento Portland y sus aplicaciones principales</i>	69
<i>Tabla 13. Reacción de hidratación de los compuestos de cemento Portland</i>	70
<i>Tabla 14. Requisitos granulométricos para un agregado fino</i>	72
<i>Tabla 15. Requisitos granulométricos para un agregado grueso</i>	73
<i>Tabla 16. Límites permisibles para agua de mezcla y de curado</i>	74
<i>Tabla 17. Precisión para ensayos de resistencia a compresión</i>	78
<i>Tabla 18. Edades de ensayo y tolerancias permisibles</i>	79
<i>Tabla 19. Requisitos aproximados de agua en la mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños nominales máximos del agregado</i>	83
<i>Tabla 20. Relación agua-cemento y resistencia a compresión del concreto</i>	83
<i>Tabla 21. Volumen de agregado grueso compactado en seco por metro cúbico de concreto</i>	84
<i>Tabla 22. Coeficiente de variación y grados de control</i>	84
<i>Tabla 23. Factor de corrección de desviación estándar (<30 muestras)</i>	85
<i>Tabla 24. Valores de dispersión en el control de concreto</i>	86
<i>Tabla 25. Resistencia promedio requerida (f'_{cr}) cuando no se tiene resultados para determinar la desviación estándar</i>	87
<i>Tabla 26. Propiedades físicas del cemento Sol - Tipo I</i>	99
<i>Tabla 27. Propiedades químicas del cemento Sol – Tipo I</i>	100
<i>Tabla 28. Parámetros para el diseño de mezcla</i>	102
<i>Tabla 29. Caracterización de los agregados</i>	103

<i>Tabla 30. Dimensiones de los especímenes o moldes para ensayos de resistencia</i>	104
<i>Tabla 31. Volumen de concreto por grupo</i>	105
<i>Tabla 32. Diseño de mezcla por el método ACI, cálculos y correcciones</i>	106
<i>Tabla 33. Especificaciones del grafito de Sigma Aldrich</i>	107
<i>Tabla 34. Materiales para la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida</i>	108
<i>Tabla 35. Especificaciones de polímero alcohol polivinílico</i>	108
<i>Tabla 36. Parámetros y las proporciones de materiales para la mezcla</i>	113
<i>Tabla 37. Cantidad total de material por cada grupo de ensayo</i>	114
<i>Tabla 38. Las tres preparaciones de mezcla para medir la cantidad de grafito sedimentado después del mezclado</i>	115
<i>Tabla 39. Determinando la concentración de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida por la exfoliación de grafito por cizallamiento</i>	116
<i>Tabla 40. Concentraciones de grafeno/agua (exfoliación en fase líquida) obtenida</i>	116
<i>Tabla 41. Proporciones de materiales para la elaboración de mezclas de concreto</i>	119
<i>Tabla 42. Resultados en carga axial del ensayo de resistencia a compresión (kg)</i>	121
<i>Tabla 43. Cálculo de la dispersión de los resultados de resistencias a la compresión (kg/cm²)</i>	123
<i>Tabla 44. Resultados en carga en los tercios del tramo para ensayo de resistencia a flexión</i>	125
<i>Tabla 45. Cálculo del módulo de rotura de las vigas de concreto a 28 días de edad</i>	126
<i>Tabla 46. Cálculo de la dispersión de resultados de resistencia a flexión (módulo de rotura)</i>	126
<i>Tabla 47. Resistencia real del concreto obtenido con el ensayo de resistencia a compresión</i>	127
<i>Tabla 48. Módulo de rotura del concreto obtenido con el ensayo de resistencia a flexión</i>	128
<i>Tabla 49. Análisis estadístico descriptivo de la resistencia a compresión (kg/cm²)</i>	130
<i>Tabla 50. Análisis estadístico descriptivo de la resistencia a la flexión (kg/cm²)</i>	131
<i>Tabla 51. Prueba de normalidad</i>	132
<i>Tabla 52. Cálculo del estadístico de prueba (t) para la resistencia del concreto</i>	133
<i>Tabla 53. Verificación con SPSS estadística con t-student - resistencia del concreto</i>	134
<i>Tabla 54. Cálculo estadístico de prueba (t) para la resistencia a compresión del concreto</i>	135
<i>Tabla 55. Verificación con SPSS estadística con t-student - resistencia a la compresión</i>	136
<i>Tabla 56. Cálculo estadístico de prueba (t) para la resistencia a flexión del concreto</i>	137
<i>Tabla 57. Verificación con SPSS estadística con t-student - resistencia a la flexión</i>	137
<i>Tabla 58. Cantidad de materiales y recursos utilizados para determinar el costo total</i>	148
<i>Tabla 59. Costo total del grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida y el concreto</i>	149

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar la influencia de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021. La metodología de investigación que se utilizó es del tipo aplicada o tecnológica, nivel explicativo, el diseño es experimental puro, la población son los elementos estructurales de concreto, la muestra es no probabilística con 60 probetas cilíndricas y 15 vigas prismáticas, para los grupos (SC , $GC - 1$, $GC - 2$, $GC - 3$, $GC - 4$), con el instrumento ficha de registro de observación y la técnica de datos secundarios y observación estructurada, dónde el método que se utilizó fueron los ensayos de resistencia a compresión y flexión, para el concreto estándar (SC), que es el grupo control con 0.00 g/l , concentración (C_G) y los grupos experimentales $GC - 1$, $GC - 2$, $GC - 3$, $GC - 4$, con concentraciones (C_G) de 0.10 g/l , 0.21 g/l , 0.35 g/l y 0.52 g/l , de grafeno obtenido por exfoliación líquida. En los resultados, se determinó el diseño de mezcla y el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida mediante la exfoliación de grafito por cizallamiento, que es el método más eficiente para su producción a gran escala, como adición en el concreto para los grupos experimentales. La conclusión fue que el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida influye en la resistencia del concreto con el incremento de la resistencia a la compresión en 6.9% con una adición de ($C_G\ 0.52\text{ g/l}$) y el incremento de la resistencia a la flexión en 11.2% con una adición de ($C_G\ 0.35\text{ g/l}$), respecto al concreto estándar.

Palabras clave: grafeno, exfoliación en fase líquida, exfoliación de grafito, agentes exfoliantes, resistencia del concreto a la compresión, resistencia del concreto a la flexión, alto cizallamiento, exfoliación por cizallamiento.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the influence of graphene obtained by liquid-phase exfoliation as an addition in the strength of concrete, Lima - 2021. The methodology that was used it is of the applied type, explanatory level, the design is pure experimental, the population is the concrete structural elements, the sample is not probabilistic with 60 cylindrical specimens and 15 prismatic beams, for the groups (*SC*, *GC* – 1, *GC* – 2, *GC* – 3, *GC* – 4), with the record instrument of observation registration and the technique of secondary data and structured observation, where the method used was the compressive and flexural strength tests, for the standard concrete (*SC*), which is the control group with 0.00 g/l, concentration (C_G) and the experimental groups *GC* – 1, *GC* – 2, *GC* – 3, *GC* – 4, with concentrations (C_G) of 0.10 g/l, 0.21 g/l, 0.35 g/l and 0.52 g/l, of graphene obtained by liquid-phase exfoliation. In the results, the mix design was determined and Graphene obtained by liquid-phase exfoliation was used by shear exfoliation of graphite, which is the most efficient method due to its large-scale production, as an addition to the concrete for the experimental groups. The conclusion was that the graphene obtained by liquid-phase exfoliation influences the strength of the concrete with the increase in the compressive strength by 6.9% with an addition of (C_G 0.52 g/l) and the increase in the flexural strength. in 11.2% with an addition of (C_G 0.35 g/l), with respect to standard concrete.

Keywords: Graphene, liquid-phase exfoliation, exfoliation of graphite, exfoliating agents, concrete compressive strength, concrete flexural strength, high- shear, shear exfoliation.

INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos en la actualidad son un gran problema de riesgo en el mundo, que puede afectar toda infraestructura o construcción con elementos estructurales de concreto, las construcciones más afectadas por un sismo son las edificaciones y viviendas, donde el concreto puede presentar grietas y fisuras. Además, la resistencia del concreto también puede ser afectada en su elaboración y no necesariamente de un sismo; por ejemplo, el concreto en estado fresco es determinante en la resistencia final. La fisuración por retracción plástica que se genera por muchas condiciones ambientales, como la elevada temperatura, baja humedad y altas velocidades del viento, como también las características del concreto (1).

Además; en la actualidad se han desarrollado múltiples investigaciones como adiciones o aditivos en el concreto, pero la aplicación de nuevas adiciones a niveles nanométricos puede ser un gran cambio en la tecnología del concreto y en esta investigación hacemos el uso del grafeno como una nanotecnología. “El grafeno en el mercado, actualmente el volumen de oferta es mayor que la demanda, ya que son cantidades muy pequeñas para desarrollar aplicaciones, por lo que el precio hoy en día es muy elevado que están entre 300 € – 100 €, dependiendo de la calidad y cantidad” (2). Sin embargo, el estudio del grafeno obtenido de la exfoliación en líquido del grafito por cizallamiento, realizado con una licuadora doméstica, lavavajillas o detergente doméstico y grafito, donde se puede producir de esta forma es mucho más económico que otros tipos de grafeno (3). Además, se realizó otra investigación, donde se adiciona el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida con cizallamiento en el agua del concreto como refuerzo, logrando un incremento de la resistencia del concreto en compresión y flexión (4).

En el Perú, se busca determinar la influencia de la utilización de grafeno en el concreto a través de este nuevo nanomaterial, para poder encontrar una alternativa de solución a las estructuras de concreto. Además, de acuerdo a todas estas investigaciones realizadas, desarrollamos esta investigación para producir el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, por el mismo procedimiento establecido y utilizando el polímero PVA para la exfoliación de grafito en fase líquida, ya que evita que el grafeno se apile nuevamente (3). Entonces, se desarrolló esta investigación en la ciudad de Lima, que buscó determinar la utilización del nanomaterial grafeno como adición en el concreto, por lo tanto, se tuvo la siguiente pregunta general ¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima – 2021?, y la hipótesis general de

la investigación fue: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima – 2021.

En la justificación académica, el grafeno obtenido por exfoliación líquida, fue adicionado en el concreto como adición para determinar su resistencia, por lo que se obtuvo nuevos resultados con un nuevo material que tiene dimensiones nanométricas y es muy ligero en peso, que poco se conoce y en la cual pudo brindar una nueva alternativa al ser utilizado en la construcción y un nuevo comportamiento en las estructuras de concreto por su nueva resistencia a compresión y flexión. La justificación metodológica, los procesos y métodos se desarrollaron de acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP), American Society of Testing Materials (ASTM) y American Concrete Institute (ACI), siguiendo sus lineamientos y procedimientos estándar, para determinar la influencia del grafeno en la resistencia a compresión y flexión del concreto. En la justificación social, al ser positivo los resultados del concreto con adición de grafeno, se conoció la concentración óptima de adición de grafeno en el concreto y mejoró un nuevo procedimiento para la producción a gran escala y optar como una alternativa para la construcción de estructuras de concreto.

La presente investigación permitió brindar nuevos conocimientos en forma progresiva para obtener la producción de grafeno por exfoliación en fase líquida, que permitió obtener nuevos resultados en la utilización como adición en el concreto. Entonces, se desarrolló en cuatro capítulos, donde se realizó la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida y su influencia en el concreto.

En el primer capítulo, como problema principal fueron formulados en base a los eventos sísmicos y los efectos que pueden afectar la resistencia del concreto, y formulamos también los problemas específicos, después los objetivos de la investigación y finalmente, establecimos las hipótesis y variables para desarrollar la investigación.

En el segundo capítulo, está el marco teórico y establecimos la base teórica, de acuerdo a lo estudiado y analizado por otras investigaciones, respecto al grafeno y todos sus derivados, detallando sus propiedades, producción y su efecto en el concreto. Además, se estudió el procedimiento para la producción de grafeno por el método de la exfoliación en fase líquida y definimos los términos básicos que conciernen a la investigación.

En el tercer capítulo, se describe la metodología a desarrollar y establecimos los parámetros para desarrollar la investigación como el método, tipo, nivel, diseño y alcances de la investigación. Además, detallamos el grupo experimental y grupo control, para el

tratamiento que se aplicó al concreto con la adición de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida.

En el cuarto capítulo, describimos los resultados y los procedimientos que se realizaron en la parte experimental, donde se detalla la cantidad de materiales que se utilizó para la elaboración del concreto y la influencia de la adición de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida a diferentes concentraciones para determinar la resistencia del concreto. Además, se encuentra la prueba de hipótesis por análisis descriptivo e inferencial, para determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación líquida en la resistencia del concreto y se presenta la discusión de resultados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

Los daños estructurales como fisuras, grietas y deformaciones, son los problemas más comunes en elementos de concreto, esto a consecuencia de las temperaturas extremas y esfuerzos sísmicos en los pavimentos, edificaciones y otras infraestructuras de concreto, siendo los esfuerzos sísmicos la principal amenaza y que hace más vulnerable a todo tipo de infraestructura, principalmente a las edificaciones y que es la causa de muerte de millones de personas a nivel mundial.

Los efectos de los sismos y los daños en una estructura son variables, que dependen del tipo de material y según los especialistas los daños más severos a una estructura es la fuerza cortante, que se caracterizan por grietas inclinadas en los muros o en las columnas y que pueden conducir al colapso de las estructuras (5). Debido a esto la mayoría de los efectos negativos, es por el uso de materiales convencionales y la ausencia de refuerzos adicionales en la composición del material. También se busca un comportamiento estructural por flexión que permita el desplazamiento de la estructura sin que colapse, como es el caso de las grietas localizadas en la base de las columnas, extremos de las vigas o en la base de los muros (5), como se visualiza en la Figura 1.

Según lo sucedido en el sismo del 19 de setiembre de 1985 en la ciudad de México, los principales daños fueron en los edificios, en las estructuras de concreto y de mampostería (5), donde se presentó grietas principalmente en las columnas y vigas, que no resistió los esfuerzos sísmicos llegando a colapsar.



Figura 1. Derrumbe del edificio Nuevo León, terremoto de 1985 en la ciudad de México. “Los sismos y su efecto en las estructuras”, por revista Protocolo, 2015, <http://www.protocolo.com.mx/internacional/los-sismos-y-su-efecto-en-las-estructuras>.

En todo el mundo los eventos sísmicos son frecuentes, especialmente en América Latina que, es una región expuesta a terremotos por su ubicación cercana a placas tectónicas en movimiento; por ejemplo, en el año 1960 el país de Chile tuvo el terremoto más potente registrado hasta la actualidad, con magnitud de 9.5 en la escala de Richter y con 2 000 fallecidos, una cantidad baja respecto al país de Haití que tiene registrado el terremoto más mortífero del mundo, pero con una magnitud de 7.0 en la escala de Richter, que provocó aproximadamente 316 000 muertes en el 2010, como se visualiza en la Figura 2a y 2b, respectivamente (6). La letalidad de esta última con una baja magnitud, es debido a que su epicentro estuvo localizado a 15 km de la capital, lo que provocó la mayor cantidad de muertos y miles de edificios destruidos, otro problema es la precariedad de las construcciones, por la inadecuada calidad de los materiales utilizados, ausencia de refuerzo en el concreto como adiciones u otros materiales en la mayoría de edificaciones, la baja resistencia de sus estructuras y aglomeraciones urbanas, lo que contribuyeron a una de las catástrofes humanas más graves de la historia (6).



Figura 2. a) Sismo, Chile en 1960, b) Sismo, Haití en 2010. Tomado de "Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina", por BBC mundo, 2017, <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41343606>.

Las infraestructuras en el Perú siempre están expuestas a ser afectadas por sismos de diferentes magnitudes, porque es una de las regiones de mayor actividad sísmica en el mundo. Se desarrolla en el borde occidental, que origina la fricción entre las placas Nasca y Sudamericana, la colisión de estas placas produce levantamientos de la cordillera, donde la placa de Nasca se introduce debajo de la cordillera de manera casi horizontal y por acción de fuerzas internas se fractura y genera sismos, donde estos eventos producen frecuentemente en superficie procesos de licuación de suelos (7), que es un efecto secundario de los sismos, que también afectan a todo tipo de infraestructura cercana a estos eventos naturales.

El sismo de la ciudad de Pisco en el año 2007, fue el más devastador en el Perú en las últimas décadas y que tuvo grandes fallas de terrenos por licuación, desplazamientos laterales masivos a lo largo de 3 km, teniendo como consecuencia edificaciones asentadas hasta 1 metro, carreteras dañadas por desplazamientos laterales, daños en zonas portuarias, sistemas de agua potable y alcantarillados destruidos (7). Las principales infraestructuras dañadas son las edificaciones que no tuvieron un desempeño adecuado al sismo y la baja resistencia de sus materiales como el concreto a los esfuerzos sísmicos, esto debido que la zona costera del Perú representa el mayor riesgo por las placas tectónicas (7). En el Perú, la causa principal se concentra en la autoconstrucción, por la que construyen sus viviendas de manera informal, sin supervisión profesional, sin planos o con materiales de baja calidad, también que no existe un adecuado plan de desarrollo urbano y el principal problema es la falta de calidad en la construcción, ya que por lo general se realiza con materiales de bajo costo y de baja calidad (8). La construcción

de casas y edificios en el Perú, en la gran mayoría están elaboradas con ladrillos y concreto, que se realizan sin aplicar un estudio o material como aditivo o adición en el concreto y el desconocimiento de nuevas tecnologías que se desarrollan en el mundo, como los tipos de materiales y el uso en la aplicación de la construcción, puede tener muchas consecuencias graves frente a un sismo de gran magnitud.

La ciudad de Lima metropolitana se encuentra en la zona costera del Perú, donde se puede encontrar numerosas edificaciones y sería una catástrofe, cuando se conoce que, entre 70 mil y 80 mil casas se edifican a través de autoconstrucción y un 70% está en Lima y que es un gran peligro ante un eventual sismo (8). El 24 de mayo de 1940, se produjo un sismo de gran intensidad que se estimó en una magnitud de 6.6 mb (ondas de volumen) y las intensidades entre VII a VIII MM (escala modificada de Mercalli) que causó 179 muertes y muchos daños materiales con el 80% de viviendas colapsadas en Chorrillos, 5 mil casas destruidas en el Callao, hundimientos en los muelles y vía férrea (9). Estos acontecimientos podrían volver a ocurrir, ya que según últimos estudios se menciona que, un sismo máximo probable con epicentro marino frente a la ciudad de Lima, afectaría con una magnitud de 7.5 a 8.0 grados Richter e intensidades máxima de IX grados Mercalli Modificada, inevitablemente las edificaciones quedarían destruidas; debido que, en su mayoría autoconstruidas y situadas al norte de Lima, que se encuentran cimentadas sobre suelos como arenales, pantanos, etc.; y esto genera la probabilidad de existencia de fenómenos secundarios como la licuación y deslizamientos en taludes inestables (9).

El epicentro del sismo del 15 de agosto de 2007 en Pisco, que estuvo a 200 km alejado de Lima, también afectó en el distrito del Cercado de Lima, los barrios de la Margen Izquierda del Río Rímac (MIRR) (10). Según el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) en toda el área urbana Lima/Callao, se registró 202 viviendas destruidas y 114 afectadas y en todo el distrito del Cercado de Lima se tuvo 7 viviendas destruidas y 2 afectadas (10). En la Tabla 1 se puede visualizar el grado de los riesgos en las construcciones en edificios públicos y viviendas particulares en la Tabla 2, donde menciona que los riesgos elevados son más del 20% y 42%, respectivamente (10); confirmando que las construcciones particulares o de personas que edifican su propia vivienda (autoconstrucción), es un gran peligro porque se realiza con materiales inadecuados o convencionales y sin supervisión profesional. En la Figura 3, se puede visualizar, las viviendas particulares del distrito del Cercado de Lima dañadas por el sismo de Pisco, que fueron construidas con materiales de concreto y ladrillos.

Tabla 1. Evaluación del riesgo de colapso de las construcciones en el Cercado de Lima después del sismo de 2007, en edificios públicos o que reciben público.

Grado de riesgo de colapso (de toda o parte de la estructura)	Establecimientos escolares	Establecimientos comerciales	Instituciones públicas y corporativas	Iglesias	Total	% del total inspeccionado
Riesgo elevado	26	7	10	6	49	21,6
Riesgo medio	71	22	43	12	148	65,2
Riesgo bajo	11	2	16	1	30	13,2
Total inspeccionado	108	31	69	19	19	100

Nota: Tomado de Jérémy Robert y Robert D'Ercole, 2009, p. 517.

Tabla 2. Evaluación del riesgo de colapso de las construcciones en el Cercado de Lima después del sismo de 2007, en viviendas particulares.

Grado de riesgo de colapso (de toda o parte de la estructura)	Viviendas	% del total inspeccionado
Riesgo elevado	26	21,6
Riesgo medio	71	65,2
Riesgo bajo	11	13,2
Total inspeccionado	108	100

Nota: Tomado de Jérémy Robert y Robert D'Ercole, 2009, p. 517.



Figura 3. Casa muy dañada en el barrio 1° de Mayo (Cercado de Lima). Tomada de “El sismo del 15 de agosto de 2007 en la Margen Izquierda del Río Rímac (Lima)”, por Jérémy Robert y Robert D'Ercole, 2009, p. 519.

La historia nos muestra, que el uso de materiales convencionales y no adecuados, no garantizan la resistencia frente a los sismos, que es un factor principal para que una edificación no pueda colapsar. En la construcción se utiliza el material de concreto para una edificación y están compuestos de principales elementos estructurales como las

vigas y columnas, donde estos elementos estructurales son afectados debido a efectos sísmicos. En algunos casos, las columnas, vigas y muros de concreto armado pueden llegar a fallar frágilmente o por fuerza cortante; es decir, no tiene deformaciones antes de fallar, lo que se busca son fallas por flexión y ductilidad, donde la estructura de concreto absorbe las máximas deformaciones producto del sismo.

El concreto tiene limitaciones para desarrollar la propiedad a la ductilidad, ya que “la resistencia en tracción directa o en tracción por flexión del concreto, es una magnitud muy variable. La resistencia a la tracción directa (f_t) del concreto varía entre el 8% y 15% de la resistencia en compresión (f_c)” (11).

Por lo tanto, la resistencia a la tracción sometida a flexión del concreto es vulnerable cuando se utilizan los materiales convencionales para su elaboración, como el cemento, agua, agregados finos y agregados gruesos, que no garantiza el esfuerzo frente a los sismos. La resistencia a compresión, es el mejor comportamiento que tiene el concreto, pero también depende de la hidratación del cemento y adherencia con los agregados, para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (resistencia a la tracción sometido a flexión y la resistencia a la compresión) (11).

Por todo esto, el uso de adiciones puede mejorar considerablemente la resistencia del concreto, una de estas adiciones que se investigó es el grafeno, que es un material natural y componente básico del grafito, con un espesor reducido de 10 átomos, que puede ser 200 veces más resistente que el acero (1100 TPa/125 GPa), del mismo grosor y es muy flexible (12).

Entonces, este es un material importante en la mejora de la composición del concreto (agregados, cemento, agua y grafeno), para alcanzar altas resistencias. “Las nanoláminas de grafeno (GNS), presentan una influencia positiva en la durabilidad y el rendimiento mecánico de diferentes tipos de compuestos de cemento” (13).

Este efecto positivo puede influir en la resistencia del concreto en estado endurecido, como también podría afectar su consistencia y asentamiento de la mezcla de concreto en su estado fresco; este último para conocer el contenido de agua en el concreto y su relación agua/cemento (w/c), que son influyentes en su resistencia. Con todos estos precedentes, se podría producir grafeno y adicionar en la composición del concreto y mejorar su resistencia, para un mejor comportamiento a diferentes tipos de esfuerzos, siendo el más mortífero “el sismo”.

1.1.2 Formulación del problema

A) Problema general

¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021?

B) Problemas específicos

¿Cuál es el efecto de la concentración óptima de grafeno como adición para la resistencia del concreto, Lima - 2021?

¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021?

¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar el efecto de la concentración óptima como adición de grafeno en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

Determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021.

Determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021.

1.3 Justificación e importancia

A) Justificación académica

En lo académico, la presente investigación buscó conocer la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en la resistencia a compresión y

flexión del concreto. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida y su uso en el concreto se conoce muy poco en el Perú, debido a esto y los precedentes investigados de este nuevo nanomaterial se tuvo resultados positivos frente a esfuerzos de compresión y flexión desarrollado en las estructuras de los edificios, analizar sus respuestas y comportamientos con esta nueva composición de concreto. El grafeno, según las investigaciones que se detallan, al ser un nanomaterial; es decir, en dimensiones nanométricas y muy ligero en peso, puede llegar a mejorar la resistencia del concreto.

En la presente investigación también se conoció la preparación del grafeno mediante la exfoliación en fase líquida por alto cizallamiento, siguiendo el procedimiento de otras investigaciones e iniciando la producción de grafeno en el Perú a gran escala, con este procedimiento de exfoliación en fase líquida y su utilización en el concreto en el año 2021.

B) Justificación metodológica

En lo metodológico, los procesos y métodos para efectuar la investigación, fue de acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP), American Society of Testing Materials (ASTM) y American Concrete Institute (ACI), siguiendo sus lineamientos y procedimientos estándar que permitió elaborar los especímenes de muestras cilíndricas y vigas para sus ensayos de resistencia a la compresión y flexión del concreto con una Prensa Hidráulica. Estos ensayos se realizaron para conocer y medir la resistencia del concreto con grafeno (GC) a diferentes concentraciones, respecto al concreto estándar o concreto sin grafeno (SC).

C) Justificación social

En lo social, al ser positivo los resultados del concreto con grafeno (GC), respecto al concreto estándar (SC), se conoció el procedimiento para la producción de grafeno a gran escala para el concreto y la concentración óptima para su utilización en el concreto. Esto permitió ampliar el conocimiento y optar por una alternativa adicional para la construcción en edificaciones y otras estructuras. Se puede realizar otros estudios de sus propiedades como el módulo de elasticidad y deformaciones del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en el concreto.

1.3.1 Limitación

En esta investigación se tuvo limitaciones como la obtención de este material (grafeno), debido a su precio que es muy elevado, con un aproximado de 500 USD por 1 gramo, y se tomó la decisión de producir grafeno importando los materiales para su elaboración de la empresa estadounidense Sigma-Aldrich y se investigó el procedimiento adecuado para su producción a gran escala.

1.3.2 Delimitación

El desarrollo de esta investigación se realizó en la ciudad de Lima, en los meses de enero a noviembre del año 2021, desde la importación del material, el análisis del procedimiento, el armado de los equipos para la producción del grafeno hasta finalmente, realizar la caracterización de agregados para el diseño de mezcla, para poder ensayar en el laboratorio de concreto y posteriormente realizar los ensayos de resistencia a la compresión y flexión del concreto.

1.4 Hipótesis y descripción de variables

1.4.1 Hipótesis de investigación

A) Hipótesis general

Hi: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

B) Hipótesis específica

Hi: La concentración óptima como adición de grafeno afecta en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

Hi: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021.

Hi: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021.

1.4.3 Descripción de variables

A) Variable Independiente: Grafeno

El grafeno es un alótropo de carbono en forma de red hexagonal 2D, a escala atómica, en la que un átomo forma cada vértice con hibridación sp^2 y que la longitud de cada enlace carbono-carbono es de aproximadamente 0.142 nm; es decir, que el grafeno está compuesto por una única capa de átomos de carbono muy compacta, que forma una red en forma de panal en 2D (14). Además, menciona que el grafito es la forma tridimensional y natural del grafeno, donde la unión entre los carbonos adyacentes y la deslocalización de la unión de electrones en toda la red bidimensional 2D contribuyen a la mayoría de las interesantes propiedades del grafeno (15). La obtención de grafeno por exfoliación es un avance y desafío a futuro, este proceso de producción y obtención de grafeno mediante exfoliación en fase líquida es la “deslaminación de grafito en capas de grafeno asistida por un solvente o moléculas llamadas agentes exfoliantes” (16).

B) Variable Dependiente: Resistencia del concreto

La resistencia del concreto se puede expresar en resistencia a la compresión para ensayos de especímenes cilíndricos y resistencia a la flexión para ensayos en vigas o especímenes prismáticos, que su parámetro obtenido recibe del nombre de módulo de ruptura y que la relación agua y cemento (w/c) es el factor que más influye en la resistencia del concreto y estos dos ensayos a realizar son frente a cargas uniaxiales (17).

Las resistencias teóricas a la compresión expresadas como f'_c y la resistencia real a compresión del concreto f_c que debe excederse, es la medida máxima de la resistencia a la carga axial del espécimen de concreto, expresada en (kg/cm^2), megapascals (MPa) o libras por pulgada cuadradas ($lb/pulg^2$ o psi) y es una propiedad física usada en los cálculos de diseño de puentes, edificios y otras estructuras. La resistencia a flexión o el módulo de ruptura (rotura) f_r , es otra propiedad física del concreto; por ejemplo, se puede observar en losas y vigas de concreto, sometido a los esfuerzos y movimientos más comunes que afectan en los edificios con estos elementos que son las deflexiones y la consecuencia de la deformación por flexión (18).

3.2.2 Operacionalización

Tabla 3. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	DEFINICIÓN	INDICADOR	ÍTEM
Grafe-no	N: Cuantitativa C: Simple F: Independiente	Último alótropo de carbono estable donde los átomos de carbono sp^2 se orientan en una red de panal bidimensional (2-D) para formar capas atómicamente delgadas (15). El método más eficiente para su producción y obtención es la exfoliación en fase líquida por cizallamiento en líquidos, con agente exfoliante (3), para separar el grafito sin ningún proceso químico a capas de grafeno (16), y que es muy eficiente para la fabricación y su utilización en el concreto (4).	Exfoliación en fase líquida	Es una dispersión altamente concentrada a gran escala en numerosos sistemas de solventes, producida a través del deslaminado de grafito a capas de grafeno asistida por un solvente o moléculas llamadas agentes exfoliantes (16).	Concentración de grafeno/agua (g/l)	Se utilizará el grafito inicial para la exfoliación por cizallamiento en fase líquida (4)(3).
Resis-tencia del con-creto	N: Cuantitativa C: Simple F: Dependiente	Es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por el concreto sin romperse, donde se puede utilizar en resistencia a la compresión como un índice de la calidad del concreto principalmente, otros ensayos como la resistencia a la flexión también se utiliza normalmente en pavimentos (19)	Resistencia a la compresión	Es la máxima resistencia a carga axial entre un área específica de especímenes de concreto (18). Está designada como resistencia especificada a la compresión del concreto (f'_c), resistencia real a la compresión del concreto (f_c) (18) y resistencia promedio a la compresión requerida (f'_{cr}) (20).	Resistencia a compresión (kg/cm^2)	Uso de 60 especímenes cilíndricos .
			Resistencia a la flexión	Es la resistencia a la tracción del concreto sometido a flexión y es una propiedad más variable que la resistencia a la compresión y es igual entre el 8%-15% de la resistencia a la compresión (17).	Módulo de rotura (kg/cm^2)	Uso de 15 especímenes vigas prismáticas

Nota: (15) Challa Kuma y Ajith Pattammattel, 2017, p. 2. (3) Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varrla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, p. 3. (4) Dimitar Dimov, Iddo Amit, Olivies Gorrie, Matthew Barnes et al., 2018, p. 2. (16) Challa Kuma y Ajith Pattammattel, 2017, p. 23. (17) Teodoro Harmsen, 2002, p. 24. (18) Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 8. (19) Enrique Rivva López, 2000, p. 232. (20) Enrique Pasquel, 1999, p. 158.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigación

El artículo científico de (11), que tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas, térmicas, estructurales y morfológicas a partir de los nanocompuestos poliméricos con grafeno. Esta investigación se realizó mediante dos etapas, la primera etapa fue la síntesis del grafeno por el método Hummer modificado, mediante la oxidación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y permanganato de potasio (KMnO_4), para realizar la etapa de exfoliación y reducción con ácido ascórbico, así obtener el óxido de grafeno. La segunda etapa se realizó la polimerización heterogénea semicontinuo con los reactivos de dodecilsulfato de sodio (SDS), persulfato de amonio (APS), acrilato de butilo (AB), estireno (St), metacrilato de alilo (ALMA), realizando la polimerización con una constante agitación, finalizando así y obteniendo una síntesis de nanocompuestos poliméricos reforzado con grafeno, con esto se preparó láminas de nanocompuestos poliméricos con grafeno a diferentes concentraciones, para realizar las pruebas mecánicas según el procedimiento de la norma ASTM D-882. Esta investigación proporcionó la caracterización mecánica de las películas de nanocompuesto polimérico con el uso del grafeno obtenidos por el método Hummer modificado, con muestras de espesor de 150 micras y dimensiones rectangulares de 30x10mm, donde se obtiene resultados de las muestras a diferentes concentraciones de grafeno y que se tiene un incremento en su módulo de Young según, un 2 % la

concentración de grafeno y un incremento de 1.15 MPa hasta 5.28 MPa, con diámetro promedio de partícula de 86.8 nm.

El artículo científico de (20), que tiene como objetivo evaluar la caracterización de nanocompuestos de grafeno-polímero mediante el proceso de síntesis y evaluación de sus propiedades mecánicas. Presentó la síntesis de nanocompuestos grafeno-polímero preparado utilizando tres rutas de síntesis que son la mezcla de solución, mezcla de fusión y polimerización in situ. Las propiedades del nanocompuesto grafeno-polímero se analizó mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía electrónica de barrido (SEM) y se presentó los resultados del Módulo de Young y resistencia a la tracción para los tres procesos de síntesis de nanocompuestos grafeno-polímero, también se realizó los gráficos de curvas esfuerzo-deformación y Modulo de Young para Nanoláminas de óxido de grafeno (GOn) en diferentes cantidades 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%. Luego, analizó que la adhesión interfacial entre el grafeno y la matriz polimérica es importante para un refuerzo efectivo y la funcionalización covalente o no covalente de materiales basados en grafeno, se puede adaptar para promover una interacción no covalente más fuerte entre la matriz y las plaquetas de grafeno. Esta investigación proporcionó gráficos de curva de esfuerzo-deformación y el Módulo de Young del nanocompuesto grafeno-polímero en diferentes adiciones de nanoláminas de grafeno (GOn) en 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%; dónde demuestra que el refuerzo de grafeno y sus derivados en matrices de polímeros mejora la propiedad mecánica y elástica, también las arrugas y rugosidad en la superficie del grafeno pueden aumentar el refuerzo debido al enclavamiento mecánico para detener el deslizamiento de las cadenas de polímero y facilitar una mejor transferencia de carga.

El artículo científico de (11), que tiene como objetivo de producir dispersiones acuosas de óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO), con diferentes tiempos de oxidación (4h, 1, 3, 7 y 10 días) y evaluar la influencia en las propiedades del grafeno. En esta investigación se realizó producciones de dispersiones de óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO), con el método Hummers modificado para verificar en tiempos de oxidación (4h, 1, 3, 7 y 10 días) con dispersiones de GO, que inició con 10 gr de grafito natural con la técnica de exfoliación por ruta química, donde se adiciona ácido sulfúrico (H_2SO_4), nitrato de sodio ($NaNO_3$) y permanganato de potasio ($KMnO_4$), para cada etapa de oxidación (4h, 1, 3, 7 y 10 días); al final de cada periodo se realizó la etapa de exfoliación, con adición de H_2SO_4 a 5% y peróxido de hidrógeno H_2O_2 , finalizando con la etapa de exfoliación/lavado. Esta investigación realizó estudios sobre espectroscopia Raman para GO y rGO/PSS, que proporcionó su estructura química y estructural, donde la

relación sus intensidades de bandas I_D/I_G del GO muestran un aumento de las cantidades de defectos, relacionado al aumento del tiempo de oxidación. Además, se presentó mediante análisis de microscopía electrónica de barrido, imágenes de las láminas del GO y rGO/PSS a tiempos de oxidación (4h, 1, 3, 7 y 10 días), para analizar la morfología y confirmar un material flexible y transparente por su grado de exfoliación.

El artículo científico de (13), que tiene como objetivo de producir nanoláminas de grafeno por el método Hummers, a partir de óxido de grafito (GO) y caracterizar su morfología y propiedades térmicas. En la investigación se utilizó el método de Hummers que inicia con la oxidación del grafito (GO), utilizando los materiales de grafito natural, H_2SO_4 , $NaNO_3$, $KMnO_4$, H_2O_2 y HCl , para finalmente obtener óxido de grafito (GO). Luego, se llevó el GO al horno a 350°C para obtener óxido de grafeno expandido (EGO) y finalmente realizar el proceso de reducción química del grafito con el borohidruro de sodio ($NaBH_4$) y agua desionizada para obtener el grafeno (G1); esto para ser comparado con el grafeno comercial (G2). Además, se realizó la microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FEG), microscopía electrónica de transmisión (TEM), espectroscopia Raman, análisis termo gravimétrico (TGA) y difracción de rayos X, donde mostró como resultados que la oxidación del grafito (GO), modificó su morfología con apariencia arrugada y cambiando la hibridación de los carbonos sp^2 (estructura plana) a sp^3 (estructura tetraédrica). La investigación proporcionó imágenes a 1 micrómetro, 500 y 0.5 nanómetros del GO, EGO y principalmente del grafeno producido (G1), que permite caracterizar sus propiedades químicas y la morfología. También se puede visualizar gráficos de la espectroscopia Raman y difracción de rayos X, donde muestra que el material está organizado en láminas de grafeno. La investigación sugiere que el método más eficiente de producción es el método químico, en este caso realizado por el método Hummers.

El artículo científico de (7), que tiene como objetivo producir óxido de grafeno (GO) por el método Hummers modificado y agregar en mezclas de concreto fresco, para caracterizar estructuralmente y evaluar las propiedades mecánicas. La investigación sintetizó el grafito en polvo con nitrato de sodio ($NaNO_3$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), permanganato de potasio ($KMnO_4$), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), agua desionizada y HCl , para obtener el polvo de óxido de grafeno (GO) requerido. El GO obtenido se caracterizó con técnicas SEM/EDX, XRD y FT-IR, donde verificó la estructura cristalina, grupos funcionales y propiedades físicas del cemento Portland; para preparar cinco mezclas y agregar GO con un contenido porcentual variable en peso de cemento de 0% hasta 0.08% con un incremento de 0.02%, para realizar pruebas en concreto endurecido para edades

7, 28, 56 y 90 días, donde las pruebas que se realizó fueron la resistencia a la compresión en cubos de 100 mm y los resultados mostraron que la mezcla con 0.08% GO presenta la mejora máxima en la resistencia a compresión. La investigación proporcionó que el incremento significativo de las propiedades mecánicas del concreto nanoreforzado, con el aumento del porcentaje del contenido del óxido de grafeno (GO) y se presentó imágenes en rangos de 50 μm y 1 μm , para su análisis microestructural a diferentes mezclas de concreto nanoreforzado con GO, donde a mayor contenido porcentual de GO, los cristales hidratados se densifican y se tiene menos cantidad de poros, pero la mezcla 0.06% GO tiene una mejora significativa en la hidratación del cemento por la formación de cristales en comparación de 0.04% y 0.08%; es decir, que no necesariamente a mayor contenido porcentual de GO tiene una mejora significativa.

El artículo científico de (32), que tiene como objetivo realizar una revisión general de las novedades en la fabricación, propiedades y aplicaciones del GNS para mejorar la resistencia y durabilidad de los compuestos de concreto”. La investigación presentó resultados de nanoláminas a base de grafeno (GNS), donde la microscopía de fuerza atómica (AFM) mostró láminas de grafeno (espesor de 0.335 nm) que exhiben un módulo de Young de 1.0 TPa con una resistencia intrínseca de 130 GPa, que es 200 veces mayor que el acero y el grafeno puede presentar una deformación elástica de más del 20% sin fracturarse. El óxido de grafeno reducido rGO (espesor de 1.0 nm), también exhibió un módulo de Young de 0.25 TPa y alta flexibilidad. El <0.10% wc GNS (%peso de materiales cementosos), puede proporcionar un área grande para reacciones de nucleación de materiales cementosos modificando su microestructura. Además, láminas de GO mas grandes (14 nm de espesor y 900 nm de tamaño) mejoraron la resistencia a compresión en máximo de 63% y las pequeñas (3 nm de espesor y 100 nm de tamaño) mejoraron a una resistencia máxima de 86%. La investigación proporcionó resultados de las nanoláminas de grafeno (GNS), donde su gran área de superficie maximiza la interacción entre las nanoláminas GO y la matriz de cemento, y su fuerte adhesión. Finalmente, esta investigación proporcionó que el mejor proceso para obtenerla en grandes cantidades es el proceso químico por el método descendente (Top-down); también se conoce que los compuestos con láminas de GO más pequeñas tienen mejor resistencia, respecto a los compuestos con láminas de GO más grandes.

El artículo científico de (8), que tiene como objetivo es la fabricación de concreto reforzado con grafeno, obtenido mediante exfoliación en agua de alto cizallamiento para un innovador concreto multifuncional de nanoingeniería. La investigación realizó la

fabricación de grafeno disperso en agua, mediante la exfoliación en fase líquida de alto cizallamiento, que permite la separación del grafito en capas de grafeno dispersadas y estabilizadas con surfactantes, donde demuestra que la exfoliación en fase líquida es un método de producción a gran escala y que su eficiencia puede sustituir el agua directamente en la mezcla de concreto y se investigó la incorporación de grafito ultrafino (UTGr), FG e IG, donde se realizaron el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia Raman, que reveló tamaños de las escamas están desde 0.07 hasta $1.06 \mu m^2$ de área y se realizó las pruebas de resistencia a compresión del concreto en moldes de acero de 10 x 10 x 10 cm y resistencia a la flexión en vigas de 10 x 10 x 400 cm. La investigación proporcionó cantidades de grafito y surfactante para el proceso de fabricación de grafeno exfoliado en fase líquida por alto cizallamiento, donde mostró las concentraciones de grafeno en agua (g/l) y en el proceso de producción del grafeno. Además, proporcionó la curva de esfuerzo-deformación de IG, FG, UTGr y el concreto estándar, donde el refuerzo con grafeno incrementa la resistencia a la compresión, al igual que la resistencia a la flexión y se mostró que una concentración óptima de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida exfoliado por alto cizallamiento de 0.7 g/L para la resistencia a la compresión y 0.6 g/L para resistencia a la flexión.

El artículo científico de (1), que tiene como objetivo la fabricación de compuestos prepreg monocapa (MP) y prepreg monocapa reforzados con grafeno (GMP) como refuerzo en las vigas de concreto simple (PC) para determinar su influencia y su efectividad a diferentes configuraciones. En la investigación se utilizó el Prepreg (Fibras de refuerzo pre-impregnadas), que son materiales basados en polímeros y para los compuestos pre-impregnados monocapa (MP), se fabricó del tipo unidireccional con un espesor de 0.125 mm; también se fabricó los compuestos pre-impregnados monocapa reforzados con grafeno (GMP) y el grafeno que se utilizó tuvo un espesor de 50-100 nm, para ser insertado en el compuesto pre-impregnado. Las preparaciones de la viga de concreto se realizaron para una relación de agua/cemento (w/c) de 0.475 y dimensiones de 70.7 x 70.7 x 280 mm y se distribuyeron en tres grupos con cinco muestras cada uno, el primer grupo fueron vigas de control no reforzadas (PC), el segundo y tercero fueron los grupos reforzados MP y GMP respectivamente, con cuatro configuraciones de refuerzo diferentes para obtener la resistencia a la flexión, donde los resultados de los refuerzos con grafeno preimpregnadas o GMP de 30 mm de ancho, presentaron mejores resultados en la resistencia a la flexión. Esta investigación proporcionó que la resistencia a la flexión para vigas sin refuerzo PC, MP y GMP, donde GMP con refuerzo de grafeno en el concreto, mejora la resistencia a la

flexión en la configuración de refuerzo interno ISP1 e ISP2 con 6.66 MPa y 7.14 MPa, respectivamente.

El artículo científico de (19), que tiene como objetivo evaluar la influencia de ultrasonidos y surfactantes en la dispersión de láminas de grafeno e incorporados en la pasta de cemento para evaluar las propiedades mecánicas y microestructurales. La investigación realizó la dispersión del grafeno con agentes activos superficiales (SAAs) para mejorar la interacción interfacial entre grafeno y matriz de cemento, donde se preparó proporciones de grafeno: SAAs que fueron 1:2, 1:4, 1:6, 1:8, por lo que primeramente se disolvió el SAA en agua y se agitó uniformemente y con el proceso de sonicación dispersar las láminas de grafeno que se agregó en diferentes cantidades en relación al peso del cemento 0.01 wt%, 0.025 wt% y 0.05 wt% en la mezcla de la pasta de cemento, con una proporción de agua/cemento de 0.40 para todos y se utilizó probetas cúbicas de 40 x 40 x 40 mm y vigas de 160 x 40 x 40 mm, para edades 3, 7 y 28 días. Los resultados mostraron el procedimiento y materiales utilizados para lograr una adecuada dispersión del grafeno a diferentes tiempos de sonicación, ya que la sonicación excesiva provoca roturas de láminas de grafeno y la proporción adecuada de grafeno a surfactante SDBS para el mejor rendimiento de dispersión que fue de 1:6 y que la adición de 0.025 wt% y 0.01 wt% de las láminas de grafeno en la pasta de cemento, mejoró la resistencia a la compresión y flexión, pero el exceso de láminas de grafeno con 0.05 wt% redujo la resistencia, esto es debido al mayor número de aglomerados de grafeno que redujo la unión interfacial del grafeno y la hidratación del cemento.

El artículo científico de (24), que tiene como objetivo de producir grafeno en grandes cantidades a gran escala libre de defectos con la mezcla de alto cizallamiento de grafito en líquidos para obtener grafeno. La investigación presentó una producción a gran escala de grafeno por cizallamiento en líquidos de grafito, donde utilizó el método de cizallamiento y demostró que es más eficiente que la sonicación, con el solvente N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP), Colato de sodio (NaC), lavavajillas doméstico (Fairy Liquid) y soluciones de polímeros con el Alcohol Polivinílico (PVA), con parámetros $D=32$ mm, concentración inicial de grafito ($C_i=50$ mg/ml), tiempo de mezcla ($t=20$ min), volumen de líquido ($V=4.5$ l), velocidad del rotor ($N=4500$ rpm), obteniendo grandes cantidades de grafeno y realizó las mediciones de microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía de fuerza atómica (AFM), espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) y espectroscopia Raman, que mostraron que tamaños de nanoláminas entre 300-800 nm, espesor ~5-8 monocapas y demostró que con una cuchilla de la licuadora se puede producir grafeno.

Esta investigación proporcionó el método adecuado para producir grafeno líquido exfoliado por alto cizallamiento, con grafito de sigma Aldrich, el polímero de Alcohol Polivinílico (PVA) o un surfactante y una licuadora doméstica con una cuchilla convencional y el gráfico de la concentración de grafeno obtenida en tiempos de 10, 20 y 30 minutos, como también la relación de Potencia del equipo de mezcla/Volumen en Watts/Litro ($P/V \sim 100 \text{ W/L}$), esto para tener una proporción para la producción de grafeno.

En la tesis (4), realizado en la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura de la Universidad Nacional del Altiplano. El estudio proporcionó resultados de resistencia a compresión, en dosificaciones de 0.0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% de grafeno, respecto al peso del cemento. La investigación realizada tiene las siguientes características:

- El incremento de la dosificación de grafeno de 0.0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% en el concreto aumenta la trabajabilidad del concreto de 4.4", 5.2", 5.3" y 5.5", respectivamente, mediante el ensayo de asentamiento.
- El concreto con las dosificaciones de grafeno de 0.0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%, aumenta la resistencia en 215, 248, 248 y 249 kg/cm², a una edad de 28 días, incrementa su consistencia y acelera su tiempo de fragua.
- La dosificación óptima de grafeno en el concreto es de 0.5%, respecto a la resistencia, asentamiento y el costo, donde se tiene un incremento del 47% respecto al costo del concreto patrón o estándar.

En la tesis (15), realizada en el Centro de investigación en materiales avanzados. El estudio proporcionó las propiedades mecánicas del grafeno y detalló la estructura química y la información del módulo de Young del grafeno. Esta investigación tiene las siguientes características:

- La estructura química del grafeno y representación esquemática de una lámina de grafeno, donde se puede visualizar la estructura nanométrica bidimensional de átomos de carbono.
- Se tiene las características principales del grafeno de un átomo de carbono que puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos con diferentes propiedades, es más duro que el diamante y 200 veces más resistente que el acero. Además, es ligero y más flexible que las fibras de carbono.

- El módulo de Young elástico del grafeno es de $\sim 1 \text{ TPa}$ como su propiedad mecánica, que significa que el grafeno es un material altamente rígido y flexible.

En la tesis (33), realizado en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Oviedo. La investigación proporcionó la definición del material natural grafito, la estructura de materiales grafiticos y su diferencia con el grafeno. Además, proporcionó información sobre las propiedades y aplicaciones del grafeno. Esta investigación tiene las siguientes características:

- La estructura de materiales grafiticos está constituida por muchas unidades de red plana de átomos de carbono (grafeno); es decir, que el grafito es una estructura laminar en la que cada lámina es grafeno.
- El apilamiento de capas de grafeno alcanza ~ 10 capas de grafeno, la inclusión de capas adicionales no modifica las propiedades sustancialmente y en ese momento es cuando empezamos hablar de grafito; es decir, una estructura cristalina tridimensional ordenado de planos o láminas de grafeno con una distancia interplanar de $3.35 \text{ \AA}$.
- Las propiedades mecánicas del grafeno alcanzan los 130 GPa en resistencia a la tracción y un módulo de Young es de $\sim 1.0 \text{ TPa}$.
- El método de producción en grandes cantidades de grafeno, es el método de la exfoliación de grafito en fase líquida, respecto a otros métodos como la oxidación y reducción, donde la concentración de grafeno obtenida fue de $\sim 0.01 \text{ mg ml}^{-1}$.

En la tesis (27), realizada en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alicante. La investigación proporcionó los métodos de obtención de grafeno por el método de bottom-up y top-down, siguiendo una ruta química y física. Además, analiza el método de exfoliación en fase líquida con ultrasonidos y sustituyendo por un dispersor de alta cizalla. Esta investigación tiene las siguientes características:

- La exfoliación de grafito en fase líquida por uso de sonicación en líquidos sugiere realizar con agentes exfoliantes más adecuados como 1-metil-2-pirrolidona (NMP) y que los menos adecuados son el etanol, la acetona y el agua. En caso de utilizar el agua, es necesario utilizar estabilizantes o surfactantes.

- El problema de la sonicación para exfoliar el grafito en fase líquida es la eficiencia, que la obtención de la concentración de grafeno no es elevada, 0.1 mg/ml, y que sugiere agregar tratamientos térmicos posteriores.
- La exfoliación de grafito en fase líquida con alta cizalla, permite aumentar el rendimiento, producción y concentración. El procedimiento no emplea agentes oxidantes; es decir, la ausencia de óxidos y defectos en la superficie de las muestras de grafeno y la conservación de la estructura electrónica, ya que el plano basal permanece intacto.
- El método top-down se divide en dos grupos, métodos mecánicos y químicos, donde está incluido la exfoliación de grafito en fase líquida como exfoliación mecánica. El método de bottom-up tiene capacidad limitada de producción, pero llega a tener pequeñas cantidades de grafeno de elevada pureza y calidad.

En la tesis (21), realizada en la Pontificia Universidad Católica del Perú. La investigación proporcionó la definición, conceptos teóricos, procedimientos de ensayos y el comportamiento del concreto respecto a una fuerza de compresión y flexión. Esta investigación tiene las siguientes características.

- Se tiene muchos indicadores para la calidad del concreto, eso depende de la función del elemento estructural. La elaboración de las probetas de concreto y el ensayo se deben realizar y están reguladas por las normas (ASTM).
- La resistencia del concreto es afectada por la relación agua/cemento (w/c), aire incorporado y atrapado, gradación, textura y origen de agregados, condiciones de humedad y temperatura, velocidad de carga o deformación.
- La resistencia a la compresión es un indicador muy importante para el concreto, que es ensayado en probetas cilíndricas y la resistencia a la flexión, que es medido con el módulo de Rotura, se obtiene ensayando en una probeta prismática simplemente apoyada con cargas a los tercios.

El artículo y trabajo de (12), realizado sobre “La guía del grafeno para inversores”, presentó como información todas las propiedades del grafeno, dónde mencionó que es el material más delgado sólo un átomo de carbono de $\sim 0.345\text{nm}$ de espesor, es 200 veces más fuerte que el acero (125 GPa), ligero con un peso de 0.77 mg/m², es elástico con un estiramiento hasta el 20% de su longitud inicial. Además, mencionó que no todos los grafenos producidos son iguales, ya que se tienen diferencias en la calidad como el grafeno

de pocas capas (FLG), grafeno multicapas (MLG), escamas de grafeno o graphene flakes (GNFs), nanoplaquetas de grafeno, óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO), la medición de la calidad del grafeno es por los métodos básicos como el análisis microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía de transmisión por electrones (TEM), Microscopía de fuerza atómica (AFM) y espectroscopia Raman. El precio del grafeno actualmente es un gran problema por lo difícil de controlar debido a los pequeños volúmenes disponibles en el mercado y que la exfoliación en fase líquida del grafeno puede llegar a ser la más económica. El componente básico del grafito es el grafeno, que se logra cuando el espesor se reduce a menos de 10 átomos y que la producción exfoliación en fase líquida es la más económica con baja calidad respecto a otros métodos, pero con una gran producción que se puede llegar a mejorar.

El artículo y trabajo de (5) realizado sobre “Construcción y tecnología del concreto”, presenta información sobre la nanotecnología y concreto, donde el grafeno tiene una elevada resistencia a la tracción y al desgaste, donde se logra un aumento de la vida útil del concreto, aumento en la resistencia a carbonatación, cloruros y sulfatos, llegando a ser un aditivo nanotecnológico que es como un refuerzo estructural. Además, el grafeno actúa como una capa impermeable para las construcciones de espacios costeros o en zonas frías, aumenta la flexibilidad del concreto un 45%. El aditivo nanotecnológico asegura un incremento en la resistencia hasta un 50% en la prueba de flexotracción, optimiza los recursos naturales y la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

El artículo y trabajo de (28), realizado sobre “Propiedades y aplicaciones del grafeno”, proporcionó información sobre el grafeno en una configuración plana, mencionando que es un material más delgado jamás obtenido, con una lámina de grafeno se tiene un espesor de $3.35 \text{ \AA}$, que es aproximadamente unas 100 mil veces más delgado que el cabello humano más fino y con una densidad de 0.77 mg/m^2 . Este material tiene la propiedad y la capacidad de formar nuevos materiales ya que reacciona químicamente con otras sustancias para formar nuevos compuestos, otra información curiosa es que el grafito se puede llegar a romper con facilidad y que el grafeno llegue a ser duro y resistente y esto es porque las capas de grafeno están unidas por fuerzas Van der Waals, que son fuerzas mucho más débiles que las uniones covalentes entre los carbonos que conforman una lámina de grafeno. Además, se logró medir su resistencia del grafeno con un microscopio de fuerza atómica, que presionaba la lámina de grafeno perpendicularmente para doblar y obtener su límite elástico. Los estudios proporcionaron que la deformación elástica del

grafeno era hasta un 10% de estiramiento y en forma reversible, encontrado en un grafeno con impurezas y defectos en su red.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Fundamentos teóricos

2.2.1.1 El grafito

El grafito significa “escribir” (en latín) se conoce desde hace 500 años y se usa ampliamente en lápices (15), el grafito natural es un material abundante en diversas regiones del mundo, pero estructuralmente y químicamente tiene imperfecciones e impurezas, debido a esto es necesario la producción de grafito sintético, donde destacan la grafitización de carbón no grafitico, depósito químico en fase vapor (CVD) de hidrocarburos a altas temperaturas y la cristalización de metales fundidos saturados con carbono (grafito kish) (30). El grafito pirolítico obtenido con pirólisis de hidrocarburos a altas temperaturas $> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ó $\sim 2500\text{ }^{\circ}\text{K}$ (32) y un tratamiento térmico de grafitización del carbono pirolítico que se realizan a presiones elevadas y a temperaturas mayores a los $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$, son grafitos obtenidos con gran perfección cristalina que se les conoce como HOPG (Highly Ordered Pyrolytic Graphite) (30).

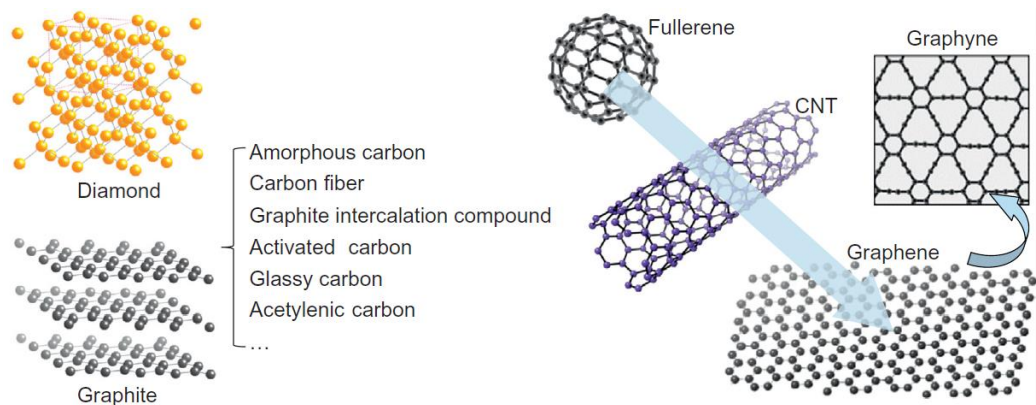


Figura 4. Alótropos de carbono y materiales relacionados. Tomado de “Estructura y Propiedades de Grafeno”, por Zhen y Hongwei Zhu, 2017, p. 2.

El grafito es una forma cristalina tridimensional (3D) del elemento carbono, donde químicamente consiste de enlaces con hibridación sp^2 que se describe como una estructura laminar en capas y planas (14). En cada capa del grafito, los átomos de carbono están dispuestos en una red hexagonal con una

separación de 0.142 nm (hibridación sp^2) y la distancia entre los planos de las capas es de 0.335 nm . Además, se tienen dos formas conocidas de grafito que tiene propiedades físicas muy similares que son α (hexagonal) y β (Romboédrico), donde la mayor fuerza está dentro de los planos laterales que entre los planos en una estructura laminar (14). En la Figura 4, visualizamos el grafito que está compuesto de varios planos laminares intercaladas y cada plano laminado está compuesto de redes hexagonales con átomos de carbono; es decir, a una unidad de estos planos o láminas se le conoce como grafeno y que según (14), el grafeno es el elemento estructural básico de otros alótopos, incluido el grafito, fullereno, nanotubo de carbono (CNT), grafino y otros materiales como la fibra de carbono (CF) y carbón amorfo (AF).

2.2.1.2 El grafeno

El grafeno es el último alótopo de carbono estable donde los átomos de carbono sp^2 están orientados en una red de panal bidimensional para formar capas atómicamente delgadas. En la red bidimensional (2D), esta unión de carbonos adyacentes y electrones deslocalizados contribuyen a las propiedades del grafeno (15); también menciona que el grafeno es alótopo del carbono de una red hexagonal 2D, en la que un átomo forma cada vértice con hibridación sp^2 (14). El material original es el grafito y donde cada capa que están apiladas son las capas de grafeno con una distancia de 3.34 Å , como se muestra en la Figura 5, y este material grafeno fue aislado en nanoláminas de carbono exitosamente en el 2004 por los físicos Geim y Novoselov a partir de grafito pirolítico altamente orientado (HOPG) utilizando el método o técnica de “Scotch Tape” o cinta adhesiva (33), por lo que obtuvieron el Premio Nobel de Física 2010. Además, el término “grafeno” representa los derivados del grafeno y que genera una confusión en la literatura y que el término “grafeno prístino” se debe utilizar para el grafeno no producido por reacciones químicas como oxidación o reducción (15).

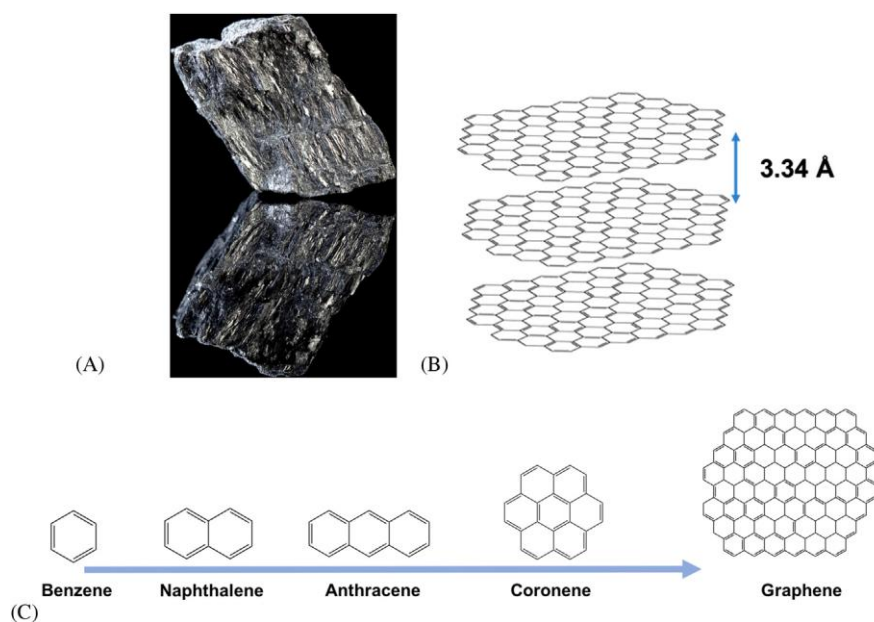


Figura 5. (A) Cristal de grafito, (B) Empaque 3-D de láminas de grafeno en grafito y (C) Jerarquía de hidrocarburos aromáticos desde benceno hasta grafeno. Tomado de “Discovery of Graphene and beyond”, por Challa Kumar y Ajith Pattammattel, 2017, p. 2.

Durante décadas pasadas se realizaron muchas investigaciones, que lo identificaron y caracterizaron como material cristalino, observando películas ultradelgadas de grafito y hasta grafeno monocapa. Entonces, en la Figura 6 se puede observar una línea de tiempo de la preparación y caracterización del grafeno, hasta que en 2004 una metodología simple, que fue replicado esta técnica como un protocolo para producir muestras de grafeno de una sola capa (32).

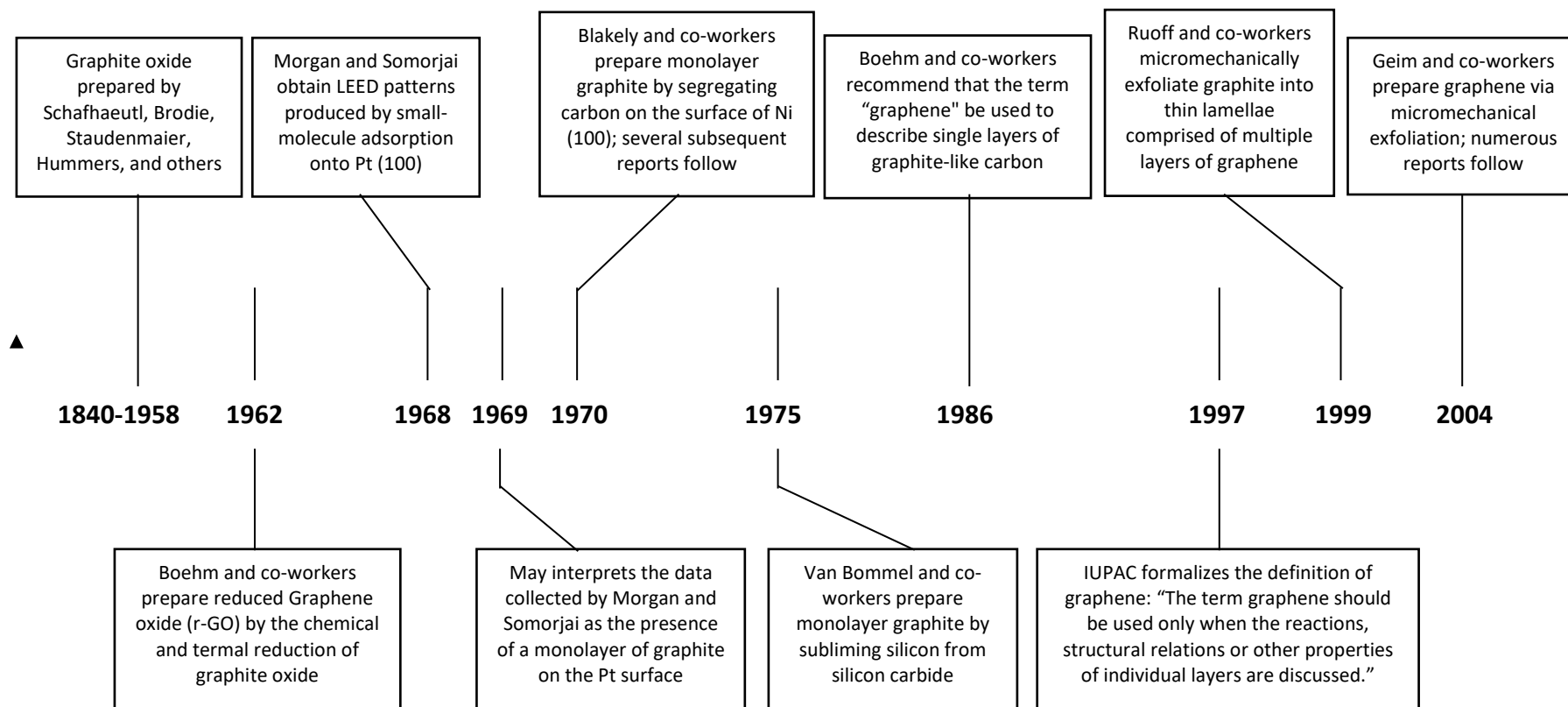


Figura 6. Línea de Tiempo de eventos seleccionados en la historia de grafeno para su preparación, aislamiento y caracterización, Tomado de "Handbook of graphene electrochemistry", por Dale Brownson y Craig Banks, 2014, p. 3.

2.1.2.1.1 Estructura del grafeno

El grafeno es una red hexagonal 2D en la que un átomo forma cada vértice con hibridación sp^2 y con una longitud de enlace de carbono-carbono es de 0.142 nm y se tiene tres enlaces σ en cada red con fuertes conexiones que forman una estructura hexagonal estable (véase Figura 7) (14). Esta estabilidad se debe a que los átomos de carbono están estrechamente compactos y una hibridación orbital sp^2 , una combinación de orbitales s , p_x , y p_y que constituyen el enlace σ . El electrón final p_z forma el enlace π y estos se hibridan juntos para formar la banda π y las bandas π^* . Entonces, el grafeno está compuesto por una capa de átomos de carbono muy compacta, formando un plano de red en forma de panal 2D (14).

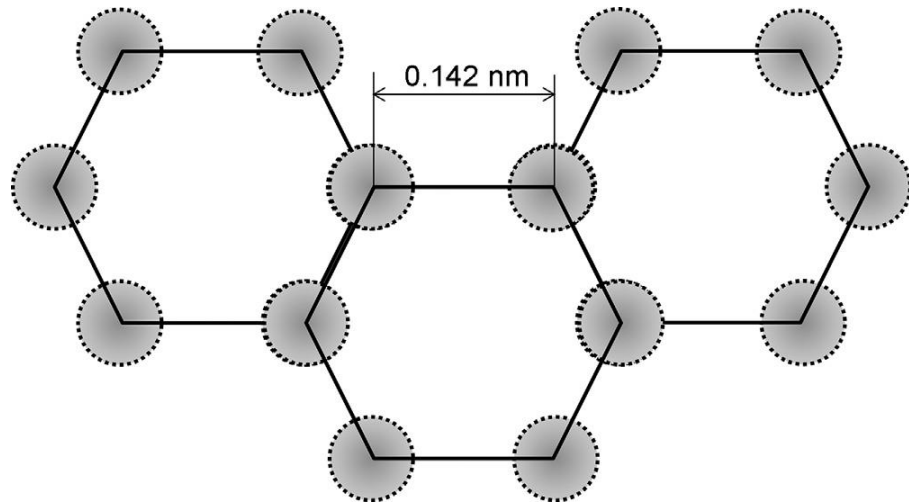


Figura 7. Red hexagonal de grafeno. Tomado de “Structure and properties of Graphene”, por Zhen y Hongwei Zhu, 2017, p. 7.

El grafeno es un derivado clave del carbono y origina una gran familia de nanomateriales de fullereno y los átomos constituyentes de grafito, fullerenos y grafeno comparten la misma estructura básica que comparten seis átomos de carbono en forma hexagonal que están estrechamente unidos (0.142 nm) y cada hoja o lámina de grafeno apilado en el grafito están separados a una distancia de 0.335 nm y unidos por fuerzas intermoleculares débiles (32). Entonces, el grafeno es considerado como la “madre de todas las formas gráficas” como se visualiza en la Figura 8, donde una hoja o lámina de grafeno se puede envolver en un buckyball esférico C_{60} , enrollar en un nanotubo de carbono (CNT) o apilar en múltiples láminas de

grafeno que se pueden apilar. Además, un grafito generalmente consiste ≥ 8 capas de grafeno (32).

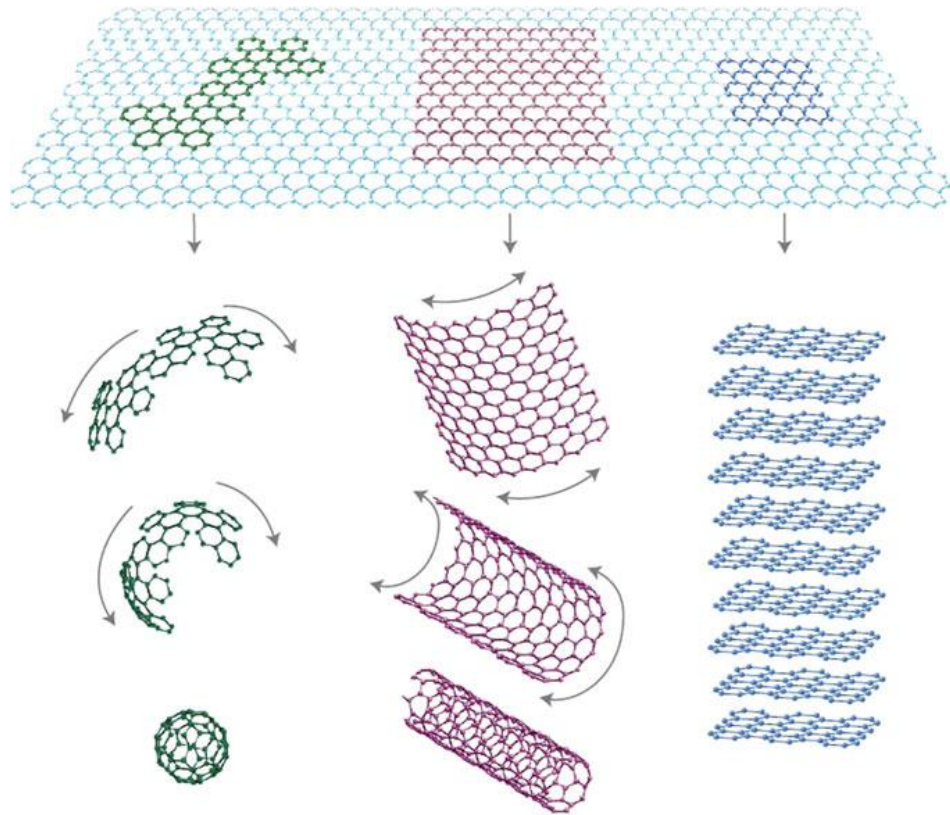


Figura 8. La “madre de todas las formas gráficas”. Representación esquemática del grafeno, que es el material de partida fundamental para una variedad de materiales de carbono: fullereno; C60 (buckyballs) (fila inferior izquierda), CNT (fila inferior en el centro) y grafito (fila inferior a la izquierda). Tomado de “Handbook of graphene electrochemistry”, por Dale Brownstown y Craig Banks, 2014, p. 5.

La estructura del grafeno es estable con un espesor de solo 0.35 nm , que es $1/200\ 000$ del diámetro de un cabello humano y la conexión entre átomos de carbono es muy resistente que evita la reconfiguración de los átomos con una fuerza externa (14). Además, los bordes de grafeno se pueden clasificar en zigzag y sillón (armchair), como se observa en la Figura 9-a, donde un borde de zigzag generalmente se comporta en zigzag y un borde de sillón podría conducir electricidad como un metal o semiconductor (14). Estos bordes pueden estar en diferentes estructuras de grafeno, como en grafeno elástico (su forma elástica estándar, una sola capa de la estructura de carbono), conocida como grafeno nanolámina o nanohoja (GNS), una hoja de grafeno grande y escalable de “tamaño cuasi-infinito” (32). La nanocintas de grafeno o conocido como

“Graphene nanoribbons” (GNRs), que son tiras de grafeno que tiene un ancho ultradelgado ($< 50\text{ nm}$), también existen otra forma de grafeno con una variación adicional como las Nanoplaquetas o “Nano-platelets” (denominadas dobles o láminas de grafeno multicapa), que se caracterizan con apilamiento entre 2 a 7 láminas de grafeno, considerado cuasigrafeno por la fase intermedia de grafeno/grafito en la cantidad de número de capas (grafeno es 1 capa y grafito ≥ 8 capas) (32).

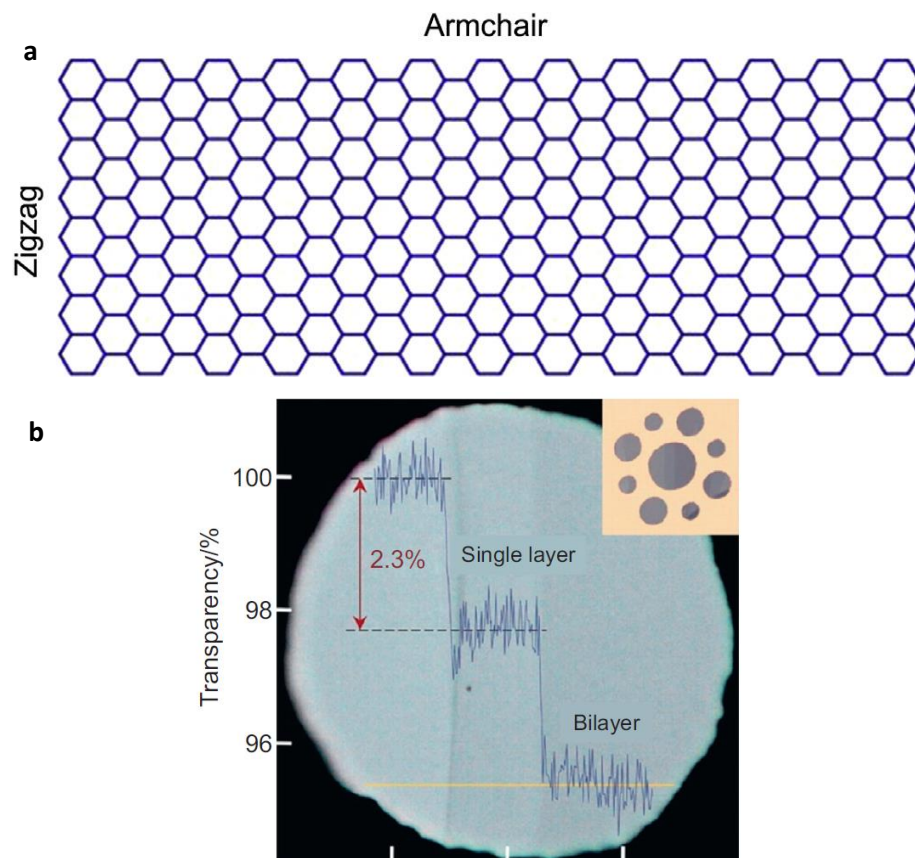


Figura 9. a) Nanocinta de grafeno “Graphene Nanoribbon” y b) transparencia de grafeno. Tomado de “Structure and properties of Graphene”, por Zhen y Hongwei Zhu, 2017, p. 8.

Se analizó las distancias entre cada átomo de carbono adyacente en un plano hexagonal de cada hoja o lámina de grafeno, también el espesor de una estructura estable hexagonal del grafeno y la distancia entre estos planos y capas apiladas para formar grafito. Entonces, adicional a esto se debe conocer que una superficie de grafeno no es 100% plana, como se observa en la Figura 10, donde una gran cantidad de fluctuación de aproximadamente 1 nm de amplitud es observada con microscopía

electrónica de transmisión (TEM), debido al auto ajuste de la longitud entre enlaces de carbono para adaptar la fluctuación termodinámica (véase Figura 10), esta rugosidad de la superficie podría ser la razón clave para mantener su estabilidad (14).

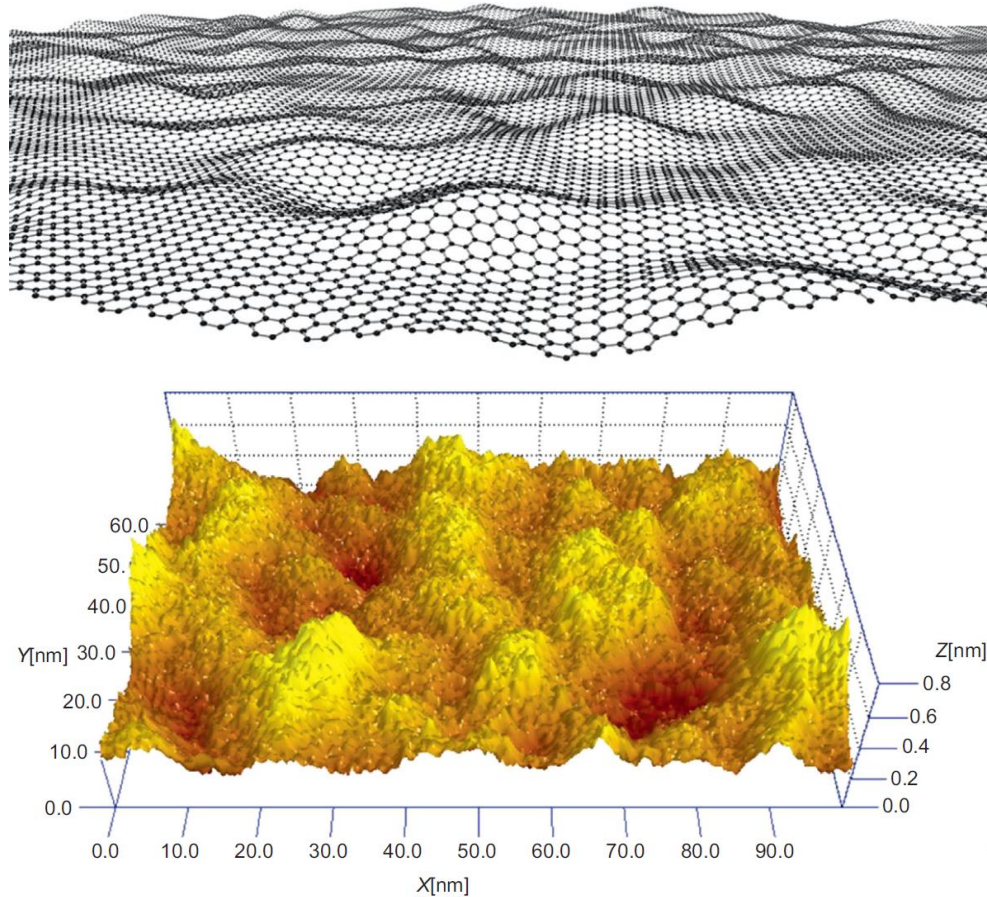


Figura 10. Fluctuación de la superficie de grafeno. Tomado de “Structure and properties of Graphene”, por Zhen y Hongwei Zhu, 2017, p. 6.

Finalmente, los átomos de carbono dentro de un plano de grafito, en una sola capa o plano de grafeno, tiene la interacción más fuerte que los planos adyacentes (que explica la división del grafito) (32). En la Figura 11, se observa una estructura cristalina de HOPG, con átomos de carbono A (rojo) y B (azul), donde cada una contiene la mitad de átomos de carbono, que son subredes de carbono triangulares (ambos forman una red hexagonal) y que cada átomo A (rojo) dentro de un plano tiene tres vecinos cercanos B (azul), donde por unidad de celda con átomos designados A y B, es invariante con una rotación de 120° a cualquier sitio de la red (32).

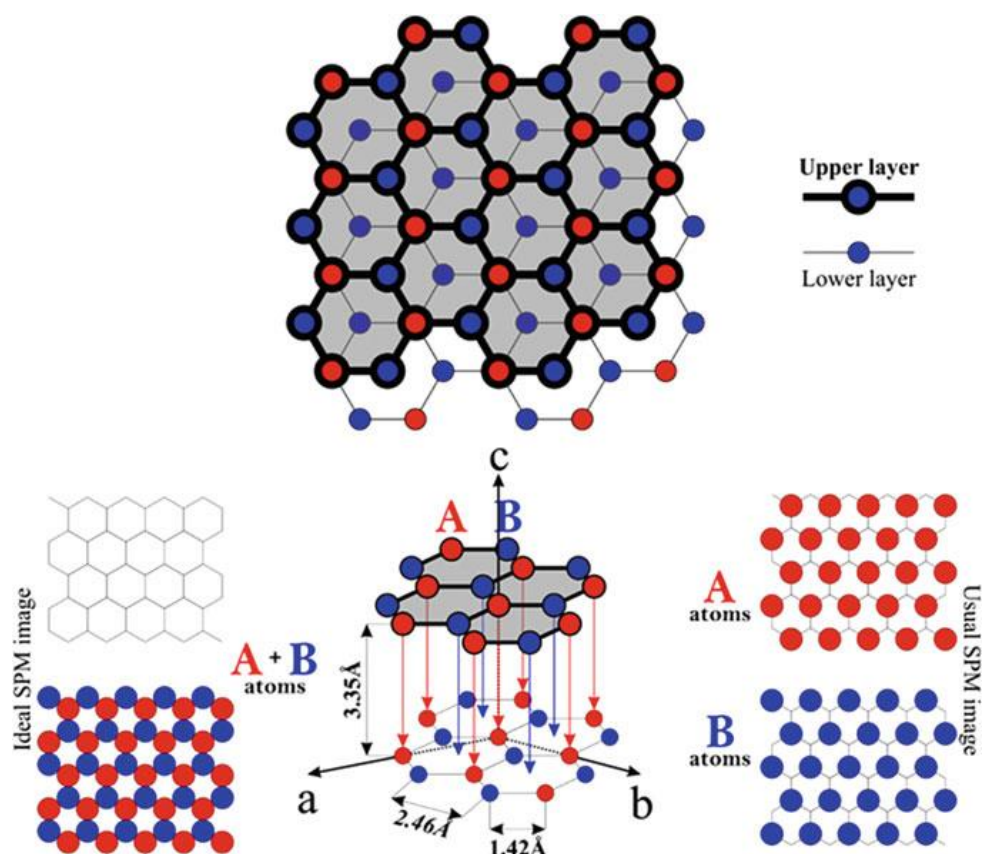


Figura 11. Una representación esquemática de la estructura de un cristal de grafito hexagonal que muestra una celda unitaria: Vista superior del plano basal del grafito y una representación esquemática de la estructura de la superficie (átomos de carbono) del grafito. Tomado de “Handbook of graphene electrochemistry”, por Dale Brownson y Craig Banks, 2014, p. 80.

Podemos observar de forma gráfica y esquemática, en esta Figura 11, la estructura de grafeno con las dimensiones mencionadas anteriormente y debemos conocer el aspecto más importante, donde la estructura en un solo plano basal (grafeno) tiene mayor resistencia e interacción que los planos adyacentes; con esto podemos mencionar que el grafeno puede llegar a tener mejores propiedades que el grafito.

2.1.2.1.2 Propiedades del grafeno

La estructura unitaria hexagonal del grafeno tiene un área de 0.052 nm^2 y una capa atómica de átomos de carbono que lo hace super fino y ultraligero. Entonces, el grafeno es un material superligero con una densidad plana de 0.77 mg/m^2 , por ser un espesor atómico, también tiene

una transparencia alta del 97.7% (14),(32) y solo absorbe el 2.3% de la luz visible, como se puede visualizar en la Figura 9-b. Debido a esto, la transparencia del grafeno se convierte en una indicación eficaz para conocer el número de capas, usando una teoría del fermión de Dirac (14).

En otras propiedades el grafeno tiene una alta movilidad electrónica ($\mu = 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$); por lo tanto, es un material muy conductor a temperatura ambiente con 10^6 S/m y una resistencia laminar de $31 \Omega/\text{sq}$ (14),(32). Además, la conductividad térmica a temperatura ambiente es de aproximadamente $5 \times 10^3 \text{ W/mK}$, la superficie específica alcanza los $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ y la resistencia mecánica son muy altas, donde la resistencia a la tracción es 125 GPa y el módulo elástico de una monocapa 1.1 TPa (14). Para grafeno menos de cinco capas 0.5 TPa (34). La resistencia límite alcanza los 42 N/m (14),(32); es decir con un mismo grosor, la resistencia del grafeno es aproximadamente 100 veces que la resistencia del acero, también 1 m^2 de grafeno podría soportar 4 kg de peso (14).

Tabla 4. Algunas propiedades del grafeno reportadas.

Property	Details
Optical transparency	97.7 % (14), (32)
Electron mobility	$200\,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (14), (32)
Thermal conductivity	$5\,000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (14), (32)
Specific Surface área	$2\,630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (14), (32)
Breaking strength (intrinsic strength)	42 Nm^{-1} (14), (32), (34)
Tensile Strength	125 GPa (14), 130 GPa (34)
Elastic Modulus (Monolayer)	1.1 TPa (14) ; 1.0 TPa (34)
Elastic Modulus (< five layers)	0.5 TPa (34)

Nota: Adaptado de Craig Banks y Dale Brownson, 2014, p. 19.

Analizando las propiedades del grafeno como se observa en la Tabla 4, podemos mencionar que el más importante para la presente investigación son las propiedades mecánicas, en las cuales serán muy importantes para determinar y analizar la influencia en el concreto. Tenemos propiedades electrónicas, ópticas, mecánicas, térmicas y químicas; por lo

tanto, detallaremos en resumen cada uno de estas, pero priorizando las propiedades mecánicas y otras propiedades que podrían influir y afectar al concreto. El carbono con un número atómico de seis, tiene cuatro electrones de valencia, tres orbitales híbrido sp^2 en el plano que son responsables del enlace covalente y el orbital p_z que se extiende fuera del plano basal (33).

A) Propiedades electrónicas del grafeno

En la estructura electrónica del grafeno, la celda unitaria del grafeno se define con vectores de red 2D a_1 y a_2 , (véase ecuación 1), también 2 átomos de carbono A y B como se visualiza en la Figura 12, donde $a = 1.42 \text{ \AA}$ es la longitud de los enlaces covalentes entre los átomos de carbono A y B, que es un valor intermedio entre los enlaces (C-C) y doble (C=C) con longitudes de $1.54 \text{ \AA}$ y $1.31 \text{ \AA}$ (33). Los electrones de valencia del carbono están fuertemente unidos a los iones del grafeno y los orbitales cristalinos no están significativamente distorsionados de los orbitales atómicos de los electrones (33).

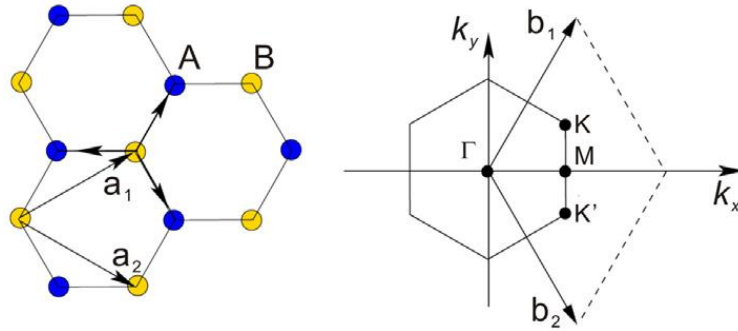


Figura 12. Los directos vectores de red (recíprocos), subredes y la zona Brillouin del grafeno. Tomado de "Fundamental properties of Graphene", por Zhiping XU, 2017, p. 78.

$$a_1 = \frac{a}{2} (3, \sqrt{3}), a_2 = \frac{a}{2} (3, -\sqrt{3}) \quad \text{Ecuación 1. (33)}$$

Los vectores de red recíprocos del grafeno son

$$b_1 = 2\pi/3a (1, \sqrt{3}), b_2 = 2\pi/3a (1, -\sqrt{3}) \quad \text{Ecuación 2. (33)}$$

En la zona de Brillouin del grafeno, se tiene tres puntos de alta simetría M, k Y k', que son;

$$M = 2\pi/3a (1,0), K = 2\pi/3a(1,\sqrt{3}/3), K' = 2\pi/3a(1,-\sqrt{3}/3) \quad \text{Ecuación 3. (33)}$$

Los estados de hibridación sp^2 forman bandas $\sigma(\sigma^*)$ completamente ocupadas con una gran brecha de ~ 12 eV, mientras que los estados π/π^* forman una sola banda con puntos cónicos de autocruzamiento en k y k' en las esquinas de la zona de Brillouin de grafeno y esta característica cónica de las estructuras de bandas de grafeno con una dispersión lineal en el Nivel Fermi es el origen de sus propiedades electrónicas únicas (33).

El $t = 2.7$ eV, es el parámetro de salto entre los orbitales más cercanos de las subredes A y B, mientras que el t' , es el parámetro de salto para el salto más cercano dentro de las mismas subredes A o B. Esto detallado con la ecuación de Schrödinger (véase ecuación 4, donde la función f está representada en la ecuación 5) y de un electrón se obtiene la relación de energía E y el vector de onda $k=(k_x, k_y)$ (33).

$$E \pm (k) = \pm t\sqrt{3 + f(k)} - t'f(k) \quad \text{Ecuación 4. (33)}$$

$$f(k) = 2 \cos \cos (\sqrt{3/2}k_y a) + 4 \cos (\sqrt{3/2}k_y a) \cos (\sqrt{3/2}k_x a) \quad \text{Ecuación 5. (33)}$$

En la Figura 13, se puede visualizar como las bandas π/π^* de electrones en el grafeno trazan con t' establecido en $-0.2t$, donde se puede concluir que la superficie de Fermi está ubicada en los puntos k y k' en la zona de Brillouin (33).

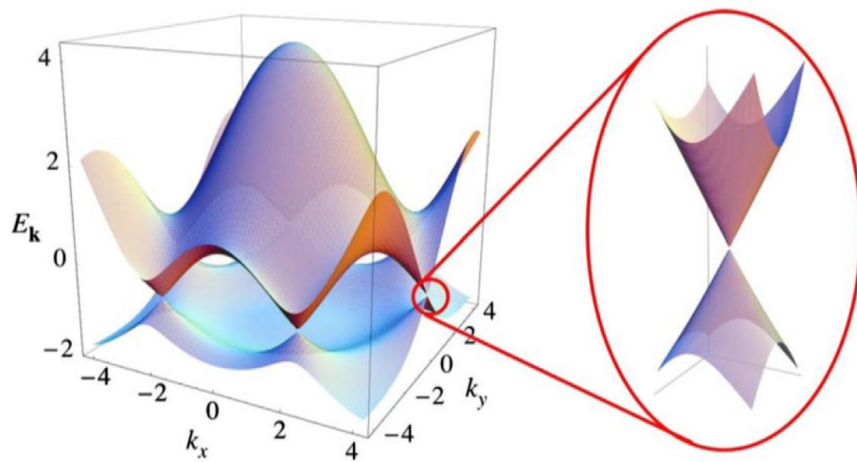


Figura 13. La estructura de la banda electrónica del grafeno calculada a partir del modelo de unión estrecha, con parámetros de salto $t = 2.7$ eV y $t' = -0.2t$. Tomado de "Fundamental properties of Graphene", por Zhiping XU, 2017, p. 79.

El electrón p_z en el grafeno podría extenderse a su estructura de 2 capas y en una bicapa, un cristal de grafeno se gira 60 grados con respecto al otro, que se denomina apilamiento de Bernal, donde rompe la simetría entre las subredes A y B. Resultando saltos como se visualiza en la Figura 14, donde el parámetro de salto intracapa entre la subredes A y B es $\gamma_0 = t$ y $\gamma_1 = 0.4 \text{ eV}$ (γ_3) es la energía para saltar en la misma subred A_1 y A_2 (B_1 y B_2) en las capas de grafeno vecinas. γ_4 son los parámetros de salto para orbitales en diferentes subredes en las capas vecinas, que son A_1 (A_2) y B_2 (B_1) (33).

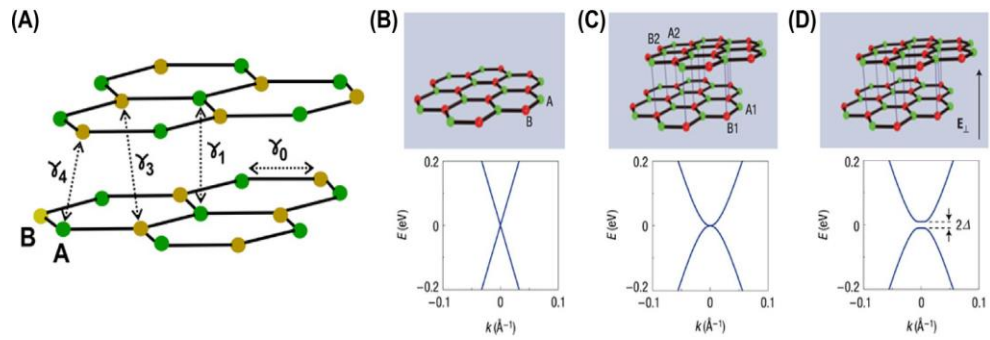


Figura 14. (A) Estructuras atómicas de la bicapa de grafeno y los parámetros de salto entre orbitales p_z . (B-D) La dispersión de energía electrónica de la bicapa de grafeno en el régimen de baja energía, donde el grafeno monocapa y bicapa son semiconductores de cero brechas (zero-gap), pero un campo eléctrico aplicado perpendicularmente a la bicapa abre un espacio de banda. Tomado de "Fundamental properties of Graphene", por Zhiping XU, 2017, p. 81.

Para nanocintas de grafeno (GNRs), la dimensión se reduce a cuasi 1D, los electrones están confinado en una tira, donde un análisis de unión estrecha de GNR con bordes en zigzag son metálicos y los de sillón podrían ser metálicos o semiconductores (según el ancho) (33). Las propiedades electrónicas y de transporte están determinadas por el grado de plegado de las nanocintas de grafeno "Graphene nanoribbons" (GNRs) de grafeno zigzag, las longitudes de los enlaces C-C aumentan con el grado de plegado y el estiramiento del enlace C-C interrumpe el orbital π . Además, estas propiedades de las nanocintas pueden alterarse mediante deformaciones mecánicas y si esto es fuera del plano tienen gran influencia en la estructura de las bandas electrónicas, la conductancia eléctrica y las características de las nanocintas en zigzag y de sillón (34).

Las propiedades electrónicas son diversas de acuerdo al tipo de grafeno producido que se analizará posteriormente, y que el óxido de grafeno tiene baja conductividad, en cambio una lámina 2D de grafeno con una conjugación π - π proporciona una conductividad súper eléctrica, esta propiedad se puede observar en la Tabla 5 (34).

Tabla 5. Propiedades de conductividad eléctrica de materiales.

Material	Conductividad eléctrica ($\sigma = \frac{1}{\rho}$)
Grafeno	$0.6 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ (34) ; $0.96 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ (29)
Plata	$0.68 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$
Oro	$0.45 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$
Cobre	$0.60 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$
Aluminio	$0.38 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$
Acero	$0.10 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$

Nota: Adaptado de Claudia Hernández y Dalia Quiroz, 2015, p. 24.

B) Propiedades mecánicas y térmicas del grafeno

En la actualidad tenemos técnicas de caracterización de superficies, hasta el momento identificamos las estructuras de red, bordes y defectos, adicional a esto, también se puede realizar las características a escalas de mayor longitud, como pliegues, arrugas y ondulaciones. El grafeno se puede mostrar como membrana, similar al polímero o de rollos, esto depende del tipo de grafeno, aspecto de la hoja o lámina y temperatura (véase Figura 15) (33). El estiramiento/compresión del enlace y el cizallamiento dentro del plano basal del grafeno es mucho más resistente a la fluctuación térmica en comparación con el doblado fuera del plano, debido a su ultra alto módulo de Young de 1 TPa y su baja rigidez al doblado o flexión $D \approx 1 \text{ eV}$ (33). Estas propiedades que se mencionan pueden variar; es decir, que las condiciones del método de producción de grafeno y las condiciones del proceso afectan en la morfología del grafeno (34).

Entonces, analizando las propiedades mecánicas un grafeno monocapa libre de defectos el material más resistente jamás utilizado, con una resistencia intrínseca monocapa de 42 N m^{-1} , que equivale a una

resistencia intrínseca de 130 *GPa*. Además, un módulo de Young medido experimentalmente mediante un método de nanoindentación que fue de 1 TPa (34), como está detallado esta propiedad en la Tabla 4.

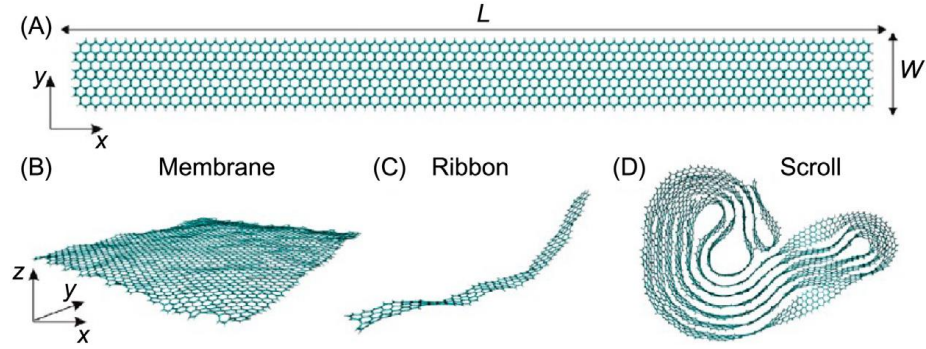


Figura 15. Morfologías típicas de láminas de grafeno independientes en equilibrio térmico a temperatura ambiente, obtenidas a partir de simulaciones de dinámica molecular. (A) Hoja de grafeno con bordes zigzag con longitud L y ancho W . (B) La conformación de la membrana con ondulaciones intrínsecas fuera del plano observadas en la hoja de grafeno con una relación de aspecto $n=L/W$ cercana a 1. (C) La conformación de la cinta en $n=11$. Se puede observar la flexión y la torsión a lo largo de la dirección de la longitud del contorno. (D) El nanorollo estabilizado por la interacción de Van der Waals entre capas de grafeno adyacente en una relación de aspecto alta ($n=114$). Tomado de "Fundamental properties of graphene", por Zhiping XU, 2017, p. 87.

Se puede expresar como una ecuación matricial la estructura inicial del grafito expresado como el esfuerzo σ_{ij} y deformación ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) (véase ecuación 6), donde el grafeno y grafito presentan una respuesta isotrópica transversal en el régimen elástico lineal, en esta matriz se tiene subíndices "1" y "2", que son dos direcciones principales en el plano basal del grafeno y "3" es la dirección del eje-c (33). Las constantes elásticas determinadas a partir de experimentos son $C_{11} = 1060 \text{ GPa}$, $C_{12} = 36.5 \text{ GPa}$, $C_{44} = 4 \text{ GPa}$, $C_{12} = 180 \text{ GPa}$ y $C_{13} = 15 \text{ GPa}$. Con el resultado de la matriz de constante elástica se encuentran las propiedades mecánicas son altamente anisotrópicas, por el fuerte enlace covalente en el plano basal y la débil interacción de Van der Waals entre capas (33).

Por lo tanto, también se conoce que el módulo de Poisson de un grafeno con 1.0 T Pa, como se ha mencionado anteriormente, tiene una relación de Poisson de 0.416, que fueron confirmados con ensayos de nanoindentación (33). Debemos tener en cuenta que las propiedades como mecánicas son insensibles a la distribución de defectos, pero

disminuyen considerablemente cuando los defectos se ubican lejos del centro de la hoja de grafeno, estos efectos se explican por sus grupos funcionales y su participación en ondulaciones a nivel atómico que alteran muchas propiedades físicas (34).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 6. (33)}$$

Analizando su conductividad térmica, el grafeno tiene una excelente conductividad térmica de 3000 – 6000 W/m/K, con su buena estabilidad estructural a alta temperatura y que en multicapas de grafeno, el acoplamiento débil entre las capas dispersa los fonones que se propaga y reduce la conductividad térmica (33). Las mediciones de 1 a 10 capas de grafeno muestran que a medida que aumenta el número de capas de 2 a 4, la conductividad térmica en el plano disminuye de 2800 a 1300 W/m/K (33).

Tabla 6. Propiedades de conductividad térmica de materiales.

Material	Conductividad térmica
Grafeno (monocapa)	5300 W/mK (33), 5000 W/mK (14), (32), (29)
Grafeno Multicapas (cada 2-4 capas)	1300 – 2800 W/mK (33)
Plata	420 W/mK
Oro	317 W/mK
Cobre	400 W/mK
Aluminio	240 W/mK
Acero	79 W/mK

Nota: Adaptado de Claudia Hernández y Dalia Quiroz, 2015, p. 24.

La conductividad térmica fue medida en 5300 W/m/K, que era mucho más alto que los nanotubos de carbono (33). En la Tabla 6, se puede visualizar, donde el grafeno es un gran superconductor térmico, que depende de la cantidad de capas de grafeno. Además, los fonones son los portadores de energía para el transporte térmico de grafeno (33).

C) Propiedades químicas del grafeno

Los orbitales p_z , son accesibles para producir varios tipos de derivados del grafeno, incluido la forma más importante de grafeno-GO funcionalizado. La reducción química del óxido de grafeno (GO) es una de las principales rutas para obtener grafeno, que tiene una composición química aproximada de $C_8O_2(OH)_2$, por lo tanto, se tiene varios modelos moleculares para GO (33).

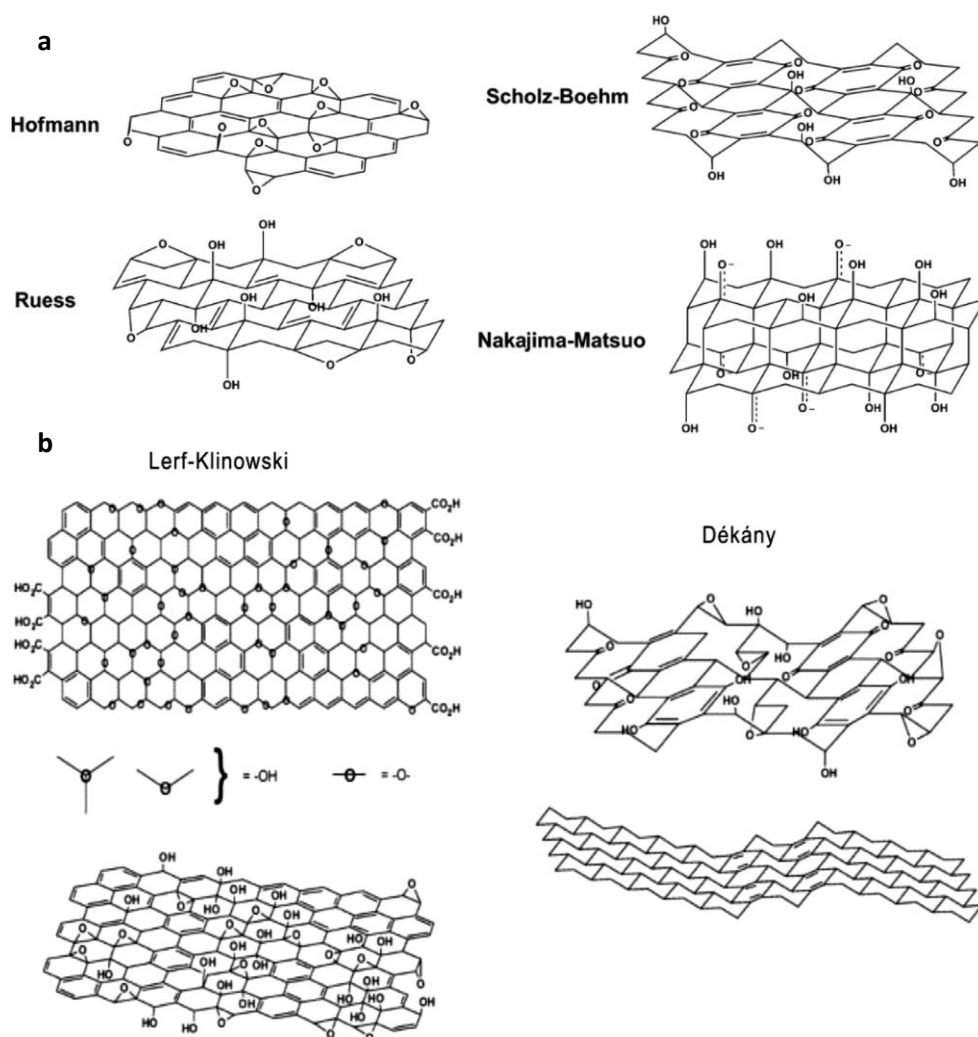


Figura 16. a) Primeros modelos de óxido de grafeno con estructuras reticulares regulares, b) Modelos atómicos de óxidos de grafeno con grupos ricos en oxígeno distribuidos aleatoriamente. Tomado de "Fundamental properties of graphene", por Zhiping XU, 2017, p. 94.

En la Figura 16, se tiene los modelos primeros modelos desde 1939 con Hofmann y Holst, Scholz y Boehm, Nakajima y Matsuo, y Ruess, donde estos modelos moleculares están basados en red

estequiométricos y los modelos posteriores de Lerf-Klinowski y Dékány, son alternativas amorfas, donde ampliaron los modelos anteriores (33). Además, con el grafeno se puede realizar muchos derivados, entre ellos el grafano, fluorographene, entre otros derivados, que se detallarán posteriormente (33). Debido a esto podemos decir, que el grafeno se puede modificar químicamente en su estructura y composición, obteniendo excelentes propiedades, de acuerdo al método de producción y su finalidad en su utilización.

2.2.1.2.1 Producción del grafeno

La producción de grafeno de alta calidad es un desafío que se tiene hasta el momento, por lo que se ha desarrollado varios enfoques y son los ascendentes y descendentes (16). En el enfoque ascendente (bottom-up), la alta estabilidad termodinámica del grafito sobre otros alótropos de carbono se utiliza como fuerza impulsora para preparar grafeno a partir de precursores moleculares y se explora la síntesis química de grafeno, donde potencialmente el grafeno es de buena calidad, pero se prepara en pequeñas cantidades (16). El enfoque descendente (top-down), las capas individuales del grafeno se deslaminan de los cristales de grafito mediante una variedad de métodos mecánicos (16).

Entonces, como se conoce estos dos enfoques de preparación de grafeno (véase Figura 17), se puede observar la clasificación y la ruta de producción que podría optar para la investigación, donde cada enfoque tiene ventajas y desventajas en términos de calidad y cantidad (32). En todas las investigaciones revisadas, no se encontró producción de grafeno a gran escala, o en tasas de producción superiores a 0.4 g h^{-1} , donde más del 80% de tenían tasas de producción inferiores a 0.04 g h^{-1} , que eran demasiado bajas para producción comercial (3). Además, el enfoque descendente (top-down), son los más adecuados para una producción masiva y más barata, donde generalmente se requiere, donde no se requiere grafeno libre de defectos, como los nanomateriales de concreto y que la producción ascendente (bottom-up), comprende el crecimiento del grafeno con un control preciso de capas y defectos, este enfoque es más costoso y adecuado para otras industrias (13).

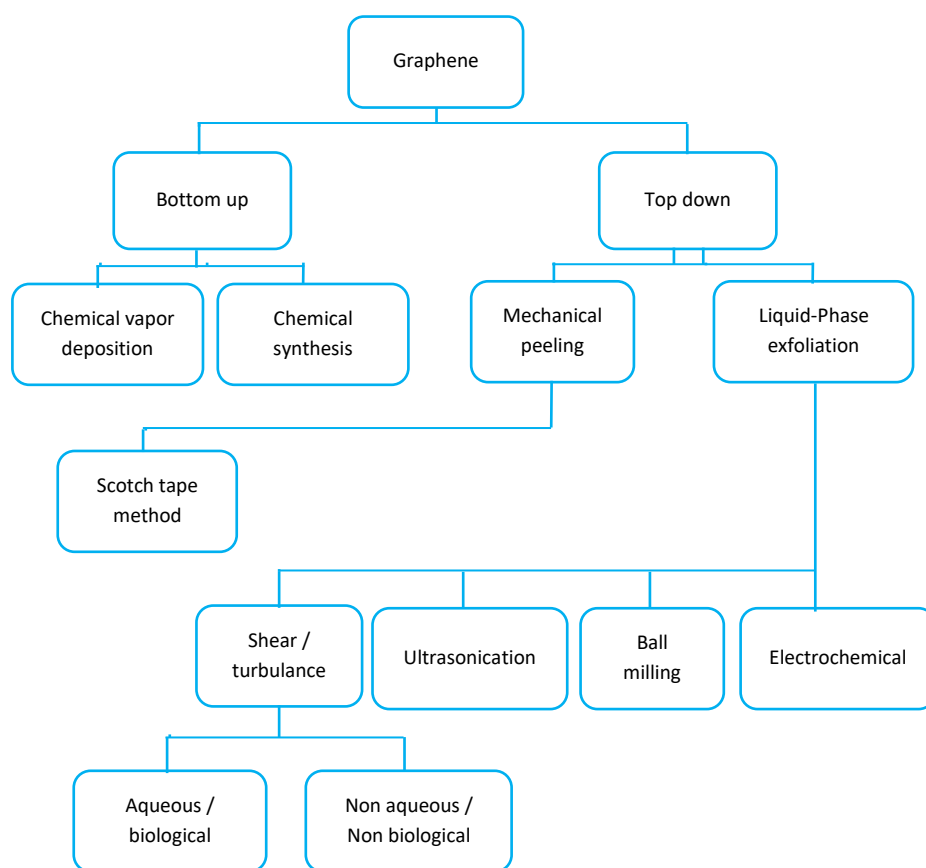


Figura 17. Principales rutas sintéticas para la preparación de grafeno. Tomado de "Synthetic routes to graphene", por Challa Kumar y Ajith Pattammattel, 2017, p. 18.

De la Figura 17, la única ruta que podemos tomar para su preparación en grandes cantidades y libre de defectos, que son recomendables para el concreto, según lo revisado anteriormente es el enfoque descendente (top-down), pero en la Figura 17, solo podemos observar las principales rutas. La producción descendente, no solo es por métodos mecánicos, también se puede realizar por un proceso químico y electroquímicos, ya que las fuerzas débiles de Van der Waals, pueden romperse con estos tres procesos y métodos (mecánico, químico y electroquímico), produciendo pocas capas de grafeno, pero todavía no es adecuado para su baja producción y su alto precio; es decir, utilizando el óxido de grafeno (GO) sintetizado químicamente por el método Hummers, todavía no sigue siendo viable. Como ya se conoce que el enfoque descendente (top-down), que es más barato que el enfoque ascendente (bottom-up), se sigue teniendo el precio alto. Entonces, podríamos utilizar el método mecánico por

el bajo precio, pero debemos confirmar la eficiencia de su producción y la calidad (13).

La fabricación de grafeno disperso en agua, o el llamado exfoliación en fase líquida realizando mediante una mezcla de alto cizallamiento (high-shear blending) ha mejorado significativamente la calidad y la dependencia volumen-tiempo del grafeno, lo que permite una producción de 100 L h^{-1} de solución de grafeno sin defectos (4). Se ha demostrado que la exfoliación se puede lograr en volúmenes líquidos desde cientos de mililitros hasta cientos de litros y más (3). Entonces con estos precedentes, podemos utilizar la exfoliación en fase líquida (Liquid-Phase exfoliation), para producir grafeno a gran escala y utilizar en el concreto, pero todavía debemos seguir investigando.

A) Método exfoliación en fase líquida de grafeno

La exfoliación en fase líquida del grafeno es ventajosa para hacer dispersiones a gran escala y altamente concentradas en numerosos sistemas de disolventes, donde se logra la deslaminación de grafito a capas de grafeno asistida por un solvente o moléculas llamadas agentes exfoliantes, logrando separar el grafito por centrifugación y sin ningún proceso químico (16). Además, la exfoliación de grafito en agua de alto cizallamiento es extremadamente eficiente para la fabricación y su utilización en el concreto reforzado con grafeno (4). Entonces, confirmamos que el método de exfoliación en fase líquida de grafito para obtener grafeno es viable para esta investigación que estamos realizando, pero sugieren utilizar el procedimiento de exfoliación con cizalla (shear exfoliation).

Para este proceso de exfoliación en fase líquida del grafito, se tiene dos componentes, la primera es la fuerza mecánica requerida para superar las interacciones entre capas adyacentes en el cristal de grafito y la segunda es un agente estabilizador que estabiliza las escamas de grafeno y evita que se vuelva a apilar para formar un cristal grafito termodinámicamente más estable (16). Según la Figura 17, tenemos cuatro rutas para poder realizar exfoliación en fase líquida de grafito para obtener grafeno, que son mediante ultrasonidos, mezcla de alto cizallamiento (high shear mixing), molienda de bolas (ball milling) o potencial electroquímico.

Tabla 7. Comparación de métodos de exfoliación comunes.

Método	Ventajas	Desventajas
Ultrasonidos (Ultrasonication)	• Aparato simple. • Disponible en la mayoría de los laboratorios. • Se pueden utilizar volúmenes más pequeños (en μL).	• Baja eficiencia de exfoliación. • Baja escalabilidad. • Deficiente relación producto/potencia.
Exfoliación con cizalla (Shear exfoliation) o exfoliación de alto cizallamiento (High Shear exfoliation / Turbulencia)	• Alta eficiencia de exfoliación escalable (se informa 300 L). • Instrumentación simple. • Una licuadora de cocina económica es una alternativa.	• No es un aparato común. • El volumen de trabajo es de 10 ml para instrumentos comunes. • Se requiere una alta concentración inicial de grafito.
Molienda de bolas (Ball milling)	• Buena eficiencia de exfoliación. • Producción escalable a escalogramos. • Instrumentación barata.	• Altas posibilidades de contaminación por metales. • No es un aparato común.
Electroquímica (Electrochemical)	• Alta tasa de producción • Posibilidad de exfoliación y funcionalización, simultáneamente económica.	• Es posible que se necesiten cristales o varillas de grafito de gran superficie. • Mala exfoliación: otras fuerzas mecánicas para la delaminación. • Altas posibilidades de oxidación no deseada

Nota: Adaptado de Challa Kumar y Ajith Pattammattel, 2017, p. 28.

Analizando la facilidad del experimento, costo, escalabilidad, disponibilidad y la eficiencia de exfoliación, vamos a elegir la exfoliación en fase líquida de grafito con alto cizallamiento o exfoliación con cizalla (Shear exfoliation) de grafito en fase líquida, por su producción a gran escala, buena eficiencia de exfoliación y como menciona que el aparato no es común, también se puede utilizar una simple licuadora (16). El aparato no común para este procedimiento de exfoliación con cizalla (shear exfoliation) en fase líquida del grafito, es un mezclador de cizalla de modelo Silverson,

que genera un alto cizallamiento (high shear), pero se podría utilizar una licuadora doméstica como se ha mencionado anteriormente (3).

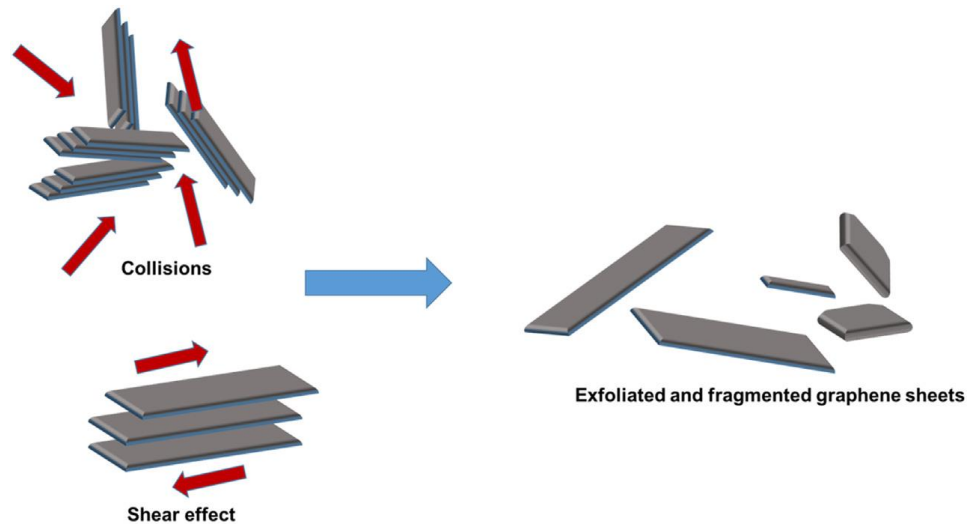


Figura 18. Mecanismo de exfoliación del grafito a base de cizalla y turbulencia. Tomado de "Synthetic routes to graphene", por Challa Kumar y Ajith Pattammattel, 2017, p. 27.

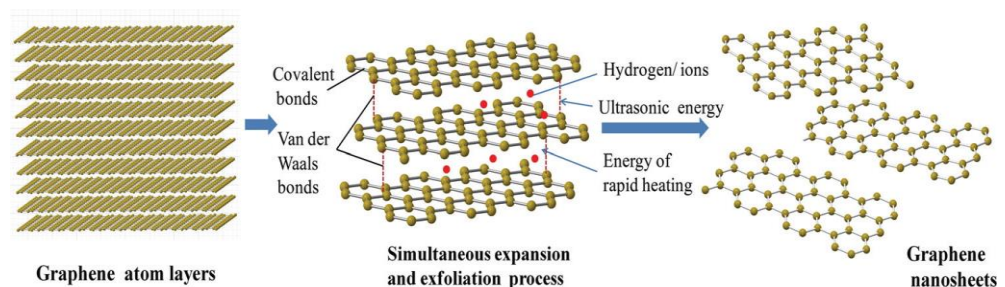


Figura 19. El mecanismo de formación de las láminas de grafeno. Tomado de "Production of Graphene and Its derivatives", por George Wypych, 2019, p. 64.

Entonces, comprobamos lo que mencionaron anteriormente, donde el método de exfoliación en fase líquida (liquid-phase exfoliation) con el procedimiento de exfoliación con cizalla (shear exfoliation) puede ser una gran alternativa para su producción a gran escala, que es necesario para su utilización en el concreto, por la cantidad que se requiere y en la Figura 18, podemos visualizar como el grafito puede exfoliarse y fragmentarse en varias láminas de grafeno. En la Figura 19, es un ejemplo esquemático de la formación de grafeno y la separación de los enlaces débiles de Van der Waals. "El grafeno exfoliado en líquido se puede sustituir por el agua directamente en mezcla de concreto" (4). El método de exfoliación por

cizallamiento de grafito para obtener grafeno puede producir en grandes cantidades, sin oxidar y sin defectos (3).

B) Agentes exfoliantes para exfoliación en fase líquida

Un agente exfoliante es una molécula que ayuda a la delaminación del grafeno y evita la reagregación de las capas de grafeno (16). Estos son mecanismos de estabilización contra la reagregación de grafeno y selecciona estos tres tipos de mezcla que son, disolventes orgánicos adecuados ([NMP], N-Methyl-2-pyrrolidone), soluciones acuosas de surfactantes ([NaC], colato de sodio) y soluciones de polímeros ([PVA], alcohol polivinílico) (3). El agente de exfoliación debe tener interacciones más fuertes con las hojas de grafeno que las interacciones entre capas de grafeno-grafeno en el cristal de grafito. Una buena exfoliación debería resultar en tener solo grafeno monocapa y esto depende de la capacidad de los agentes exfoliantes para promover y proteger la formación de capas delgadas de grafeno (16).

Tabla 8. Ejemplos de exfoliación en fase líquida de grafito bajo cizallamiento de alta velocidad.

Medio de exfoliación	Tasa de exfoliación (mg/ml/h)	Concentración de grafito inicial (mg/ml)	Concentración final de grafeno (mg/ml)
NMP	1.3×10^{-3}	50	0.1
DMF	0.03	3	0.22
Sodium cholate in water	0.25	100	1.0
2% Polyacrylic acid in water at pH 3.5 (H_2SO_4)	5	20	2

Nota: Adaptado de Challa Kumar y Ajith Pattammattel, 2017, p. 27.

En la Tabla 8, se visualiza que las tasas de exfoliación y la concentración final de grafeno obtenida, con esta Tabla 8 podemos saber que dentro de la exfoliación en fase líquida del grafito mediante cizallamiento se puede todavía elegir el adecuado agente de exfoliación para ser utilizado en el concreto. La utilización de agentes exfoliantes del grafito más

adecuados son 1-metil-2-pirrolidona (NMP), N, N-dimetilacetamida (DMAc), N-vinil-2-pirrolidona (NVP) y N, N-dimetilformamida (DMF), N-vinil-2-pirrolidona (NVP) y N, N-dimetilformamida (DMF), mientras los agentes exfoliantes menos adecuados para la exfoliación son el etanol, acetona y el agua (31).

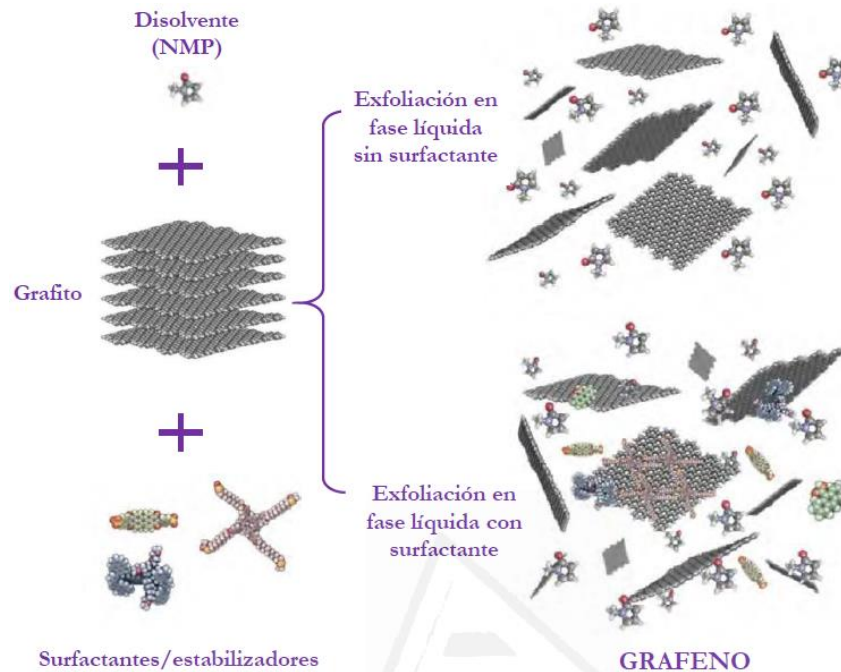


Figura 20. Grafeno obtenido mediante exfoliación en fase líquida de grafito. Tomado de "Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafeno", por Pablo Solís, 2017, p. 34.

Sin embargo, el NMP es el más utilizado en varias investigaciones, pero son disolventes tóxicos como lo menciona y reemplazar al agua en el concreto, no es adecuado en grandes cantidades de grafeno exfoliado en NMP (35). En la Figura 20, se puede visualizar, donde el disolvente (NMP) con el grafito se puede utilizar con surfactante o sin él. Sin embargo, si reemplazamos el NMP por el agua tendríamos una exfoliación menos adecuada, pero en el caso de utilizar el agua, es necesario incluir algún estabilizante o surfactante (31). Además de utilizar el NMP, también se realizaron ensayos con el colato de sodio (NaC) y el alcohol polivinílico (PVA), como se puede visualizar en la Figura 21 (3). Se realizó ensayos con el colato de sodio (NaC) para exfoliar grafito, y el grafeno obtenido de la exfoliación en fase líquida reemplazó al agua del concreto, obteniendo resultados mayores del concreto con grafeno, respecto al concreto estándar (4).

Entonces, utilizar el colato de sodio es adecuado su utilización en el concreto y según la Tabla 8, la concentración final de grafeno es mayor que NMP, pero también se puede utilizar alcohol Polivinílico (PVA) o hasta una lavavajilla doméstica (Fairy Liquid) (3). El PVA es un polímero estabilizador y las cadenas de polímeros se adsorben parcialmente en la superficie de las nanoláminas, resultando repulsiones entre escamas y capas debido a los efectos estéricos basados en la entropía (3). Las lavavajillas pueden reemplazar a un surfactante industrial y en esta investigación se utilizó el Fairy Liquid y utilizando una licuadora doméstica para la mezcla, obtuvo grafeno exfoliado entre 4-5 capas, pero la espuma generada era una gran desventaja (3).

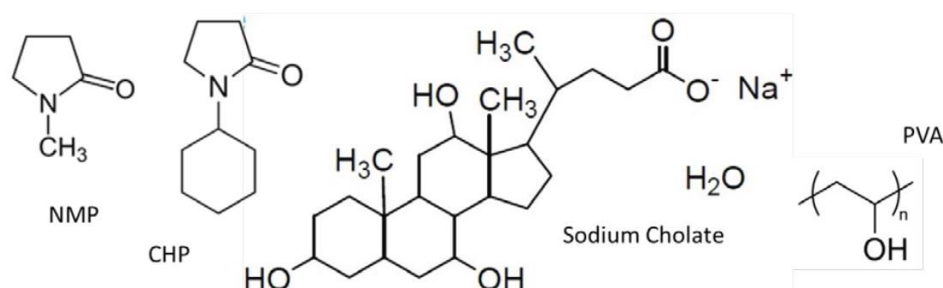


Figura 21. La estructura de los disolventes, surfactantes y polímeros. Tomado de “Scalable production of large quantities of defect-free few layer Graphene by shear-exfoliation in liquids” Supplementary Information, por Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varrla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, p. 7.

Entonces, tenemos tres opciones de agentes exfoliantes (Colato de sodio, alcohol polivinílico y una lavavajilla doméstica), que podemos utilizar para tener un grafeno muy bien exfoliado en una mezcla con el líquido (agua), como indica la Tabla 8, donde el colato de sodio se adiciona al agua, de la misma manera, se adiciona una solución de PVA en agua y también el lavavajillas doméstico (3). También debemos tener en cuenta que no se puede obtener un grafeno exfoliado mediante la aplicación de cizallamiento solo en agua; es decir, con la ausencia de surfactantes, estabilizadores o polímeros (3).

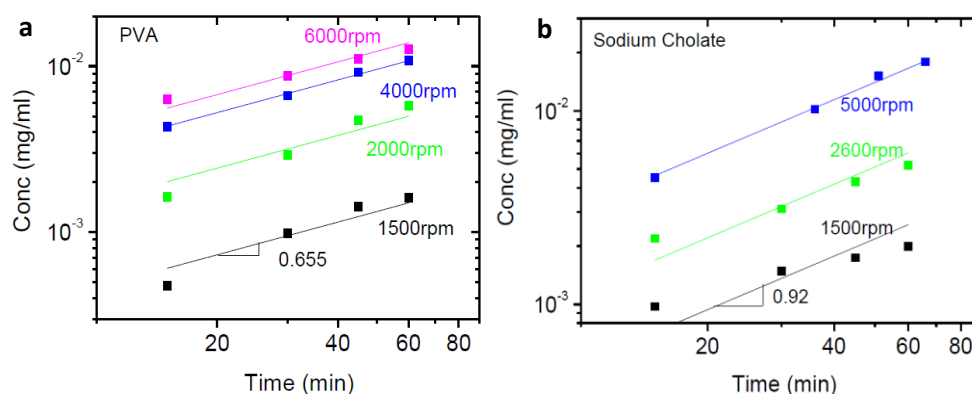


Figura 22. a) Concentración vs Tiempo de mezcla para todos los experimentos de mezcla en soluciones de PVA. b) Concentración vs Tiempo de mezcla para todos los experimentos de mezcla de soluciones de colato de sodio. Tomado de “Scalable production of large quantities of defect-free few layer Graphene by shear-exfoliation in liquids” Supplementary Information, por Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varrla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, p. 45.



Figura 23. Estabilidad de las suspensiones de grafeno exfoliadas con colato de sodio por un periodo de 6 meses y degradación de 10 días de las suspensiones de grafeno exfoliadas con detergente doméstico (Fairy). Tomado de “Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications” Supporting Information, por Dimitar Dimov, Iddo Amit, Olivies Gorrie, Matthew Barnes et al, 2018, p. 3.

La gráfica del PVA y colato de sodio (Sodium Cholate) como una ecuación lineal (pendiente) a diferentes tiempos de mezcla, donde el PVA tiene una pendiente menor que el colato de sodio (véase Figura 22). Entonces, se observa que el PVA con menor tiempo de mezcla, tiene mayor

concentración de grafeno, pero a mayor tiempo de mezcla, la concentración de grafeno con el colato de sodio aumenta. Además, el precio del PVA es menor que el colato de sodio (Véase Anexo D) y una lavavajilla doméstica es mucho más barata que el PVA y el colato de sodio.

El grafeno exfoliado con colato de sodio y un lavavajillas doméstico Fairy se observa en la Figura 23 y el Fairy se utilizó por reducir el precio de los materiales en el refuerzo del concreto con grafeno con una composición de 15 – 30% de surfactantes aniónicos, 5 – 15% de surfactante no iónicos, pero se encontró que las suspensiones producidas con el surfactante Fairy eran menos estables que el colato de sodio, que podría ser por lo difícil de controlar la concentración de Fairy que provocó que un exceso de detergente finalmente cristaliza y se separará de la suspensión (4).



Figura 24. a) Mezclador de alto cizallamiento Silverson modelo L5M con cabezal mezclador en un vaso de precipitados de 5 l de dispersión de grafeno, b,c,e) Vista de un cabezal mezclador D=32 mm, vista del rotor/estator y un esquema del funcionamiento del rotor-estator, con la dirección del flujo de líquido. d) Dispersión grafeno-NMP producido por exfoliación con cizalla (3). f) Escamas de grafito y surfactante colato de sodio usado para la producción de grafeno funcionalizado disperso en agua y (derecha) una solución de grafeno estabilizado con surfactante y grafeno funcionalizado con moléculas de surfactante (recuadro). Tomado de “Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications”, por Dimitar Dimov, Iddo Amit, Olivies Gorrie, Matthew Barnes et al., 2018, p. 3 (4).

Entonces, analizando la viabilidad económica, entre el colato de sodio y el PVA, definimos que podemos utilizar el polímero alcohol polivinílico (PVA), también podemos utilizar el surfactante más económico y comercial como un lavavajillas doméstica para futuras investigaciones. La estructura química del PVA la podemos visualizar en la Figura 21. En aparato para la mezcla, se utilizó el mezclador de alto cizallamiento Silverson modelo L5M (Véase Figura 24) (4), (3). También se utilizó una licuadora de cocina, donde (3), demuestra que la mezcla tan cruda como una licuadora doméstica puede producir grafeno, donde las paletas giratorias (cuchilla) genera turbulencia, siempre que la potencia sea lo suficientemente alta, con una Tasa de Cizalla que debe exceder el 10^4 S^{-1} y la densidad de potencia debe ser $P/V \sim 100 \text{ W/L}$; es decir, la Potencia (P) entre el volumen de mezcla (V) debe ser mayor aproximadamente que $\sim 100 \text{ Watts}$ entre la cantidad de litros (3).

2.2.1.3 Concreto

El concreto es una mezcla de cemento, agregado grueso (piedra), agregado fino (arena) y agua, también es una mezcla compuesta de pasta (cemento portland y agua), arena y grava (piedra triturada) (18). Para tener un buen concreto, se tiene que tener materiales de buena calidad mezclados en proporciones correctas y principalmente en tener en cuenta los factores como el proceso de mezclado, transporte, colocación y curado (17). En la Figura 25, se puede visualizar los componentes del concreto y la variación de proporciones que se utilizan en el concreto. Los factores que influyen en el concreto lo analizaremos más adelante.

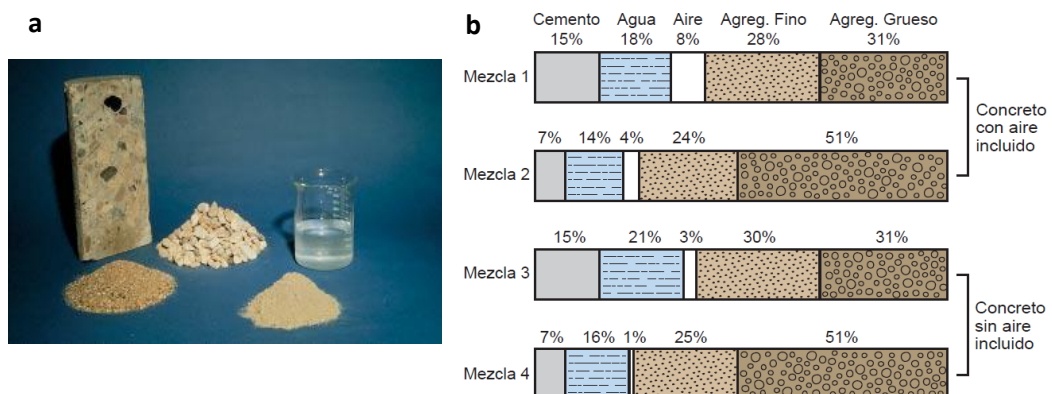


Figura 25. a) Los componentes del concreto (cemento, agua, agregado fino y agregado grueso). b) Variación de proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto. Tomado de "Diseño y control de mezclas", por Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 1.

2.2.1.3.1 Componentes del concreto

En la Figura 25-b, se muestra una variación de las proporciones utilizadas en el concreto, donde el cemento representa entre 7-15%, volumen de agua entre 14 – 21%, aire atrapado del 4 – 8% y los agregados constituyen entre 60 – 75% (18). Además, debemos saber que la calidad del concreto depende de uno de los factores que son la calidad de la pasta y del agregado (18).

A) Cemento

El cemento se obtiene de la pulverización del Clinker, producido por calcinación hasta la fusión incipiente de los materiales calcáreos y arcillosos (17). El término “cemento” se refiere al cemento Portland, que es el cemento hidráulico de silicato de calcio, producido por el calentamiento de materiales que contienen calcio, silicio, aluminio y hierro, donde esta invención se le atribuye a un albañil inglés, Joseph Aspdin, que en 1824 obtuvo la patente al cual lo denominó cemento Portland por el color similar a la caliza natural es la isla de Portland en el Canal de la Mancha (18).

Tabla 9. Composición química del cemento Portland.

Composición del cemento	Fórmula Química (17), (20)		Características
	Aproximada	Abrev.	
Silicato tricálcico	$3CaO + SiO_2 = 3CaO \cdot SiO_2$	C_3S (Alita)	Determina la resistencia inicial e influye directamente en el calor de hidratación (17). La resistencia temprana es mayor cuando C_3S aumenta (18).
Silicato dicálcico	$2CaO + SiO_2 = 2CaO \cdot SiO_2$	C_2S (Belita)	Resistencia a largo plazo y no tiene mucha incidencia en el calor de hidratación. (17), (18).
Aluminato tricálcico	$3CaO + Al_2O_3 = 3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	Es un catalizador en la reacción de los silicatos y ocasiona un fraguado violento. Para retrasar este fenómeno, se añade (yeso) durante la fabricación del cemento (18).
Alumino-Ferrito Tetracálcico	$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF (Celita)	Influye en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación (17) (20). Contribuye muy poco a la resistencia (18).
Componentes menores	$(MgO), (K_2O), (Na_2O), (Mn_2O_3) \text{ y } (TiO_2)$	-	Óxido de magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio (17), (20).

Nota: Adaptado de Teodoro Harmsen, 2002, p. 11.

En la Tabla 9, se resume principalmente en su composición química y la abreviatura química utilizada en el cemento la podemos describir como ($A = Al_2O_3$; $C = CaO$; $F = Fe_2O_3$; $H = H_2O$; $M = MgO$; $S = SiO_2$ y $\underline{S} = SO_3$) (18)(20). Además, al aluminato tricálcico C_3A , se le adiciona el sulfato de calcio como anhidrita (sulfato de calcio anhidro), yeso (sulfato de calcio dihidratado) o hemidrato, que es el llamado yeso de París (sulfato de calcio hemidrato), ofreciendo una formación de etringita (trisulfoaluminato de calcio), que controla la hidratación del cemento (C_3A), caso contrario el fraguado sería rápido (18). También, es necesario añadir yeso en el proceso (3%-6%) para controlar (20). Entonces, en la Tabla 10, podemos conocer las diferentes formas químicas del sulfato de calcio (yeso).

Tabla 10. Las formas del sulfato de calcio (yeso).

Sulfato de calcio	Fórmula Química	
	Aproximada	Abreviado
Sulfato de calcio anhidro (anhidrita)	$CaSO_4 = CaO + SO_3 = CaO \cdot SO_3$	$C\underline{S}$
Sulfato de calcio dihidratado (yeso)	$CaSO_4 + 2H_2O = CaO + SO_3 + 2H_2O$ $= CaO \cdot SO_3 \cdot 2H_2O$	$C\underline{S}H_2$
Hemidrato de sulfato de calcio	$CaSO_4 + 1/2 H_2O = CaO + SO_3 + 1/2 H_2O$ $= CaO \cdot SO_3 \cdot 1/2 H_2O$	$C\underline{S}H_{1/2}$

Nota: Adaptado de Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 52.

Posteriormente a la formación del clinker y molienda final, se obtienen los compuestos establecidos por Chatelier en 1852, lo que definen el comportamiento del cemento hidratado con su fórmula química (véase Tabla 9), y desde su abreviatura se le colocó el nombre corriente, por ejemplo, para el C_3S (Alita), C_2S (Belita) y C_4AF (Celita) (20). Entonces, de acuerdo a la Tabla 9, también se visualiza la composición química del cemento, también podemos saber la incidencia de cada composición química; es decir, la cantidad de porcentaje y proporción que intervienen de cada componente químico en el cemento Portland y su procedencia, como se muestra en la Tabla 11 (20). También se puede analizar los cementos Portland modificados y adicionados que se detallan posteriormente, pero en

esta investigación solo se desarrolló con el cemento Portland normal de uso general (18).

Tabla 11. Porcentaje típicos que intervienen en el Cemento Portland.

Componente químico	Porcentaje	Abrev.	Procedencia
Óxido de calcio (CaO)	61% - 67%	C	Rocas calizas
Óxido de sílice (SiO_2)	20% - 27%	S	Areniscas
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	4% - 7%	A	Arcillas
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	2% - 4%	F	Arcillas, Mineral de Hierro, Pirita
Óxido de Magnesio (MgO)	1% - 5%	-	
Óxido de Azufre (SO_3)	1% - 3%	-	Minerales
Óxido de Potasio (K_2O), Óxido de Sodio (Na_2O), Óxido de titanio (TiO_2), Óxido de Manganeseo (Mn_2O_3), Óxido de fósforo (P_2O_5)	0.25% - 1.5%	-	Varios

Nota: Adaptado de Enrique Pasquel, 1999, p. 18.

El cemento debe satisfacer los requisitos físicos y químicos para diferentes aplicaciones y deben cumplir la norma AASHTO M 85 o ASTM C 1157 (18). En el Perú, el cemento empleado debe cumplir con la norma ASTM C 150 o NTP 334.009 para cemento Portland normal y ASTM C 595 o NTP 334.090 para cemento Portland adicionados (36).

Tabla 12. Tipos de cemento portland y sus aplicaciones principales.

Tipos	Características
Cemento Portland (ASTM C 150)	
Tipo I	De uso general y sin propiedades especiales (17)(20).
Tipo II	Moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos. Para estructuras de ambientes agresivos, y/o vaciados masivos (17)(20).
Tipo III	Resistencia temprana y elevado calor de hidratación. Para uso en clima frío (18)(20).
Tipo IV	Bajo calor de hidratación y su uso es para concreto masivo (17)(20)
Tipo V	Resistencia al ataque de sulfatos. Para ambientes muy agresivos (17)(20).
Cemento Portland adicionados (ASTM C 595)	
Tipo IS	Añadido entre 25% y 70% en peso de escoria de alto horno (17)(20).
Tipo ISM	Añadido menos del 25% en peso de escoria de alto horno (17)(20).
Tipo IP	Añadido entre el 15% y 40% en peso de puzolana (17)(20).
Tipo IPM	Añadido menos del 15% en peso de puzolana (17)(20).

Nota: Adaptado de (17) Teodoro Harmsen, 2002, pp. 11-12. (20) Enrique Pasquel, 1999, p. 38.

Actualmente en el Perú se fabrican los cementos tipo I, II, V, IP, IPM (17), (20). En esta investigación utilizamos el cemento Portland tipo I, ya que es un cemento muy comercial. El cemento Portland cuando reacciona al momento de la hidratación con presencia de agua se desarrolla algunas principales transformaciones químicas como se detallan en la Tabla 13, pero no todas estas transformaciones ocurren (18).

Tabla 13. Reacción de hidratación de los compuestos de Cemento Portland.

$2(3CaO \cdot SiO_2)$ Silicato tricálcico	$+11 H_2O$ agua	$= 3(CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 8H_2O)$ Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	$+3(CaO \cdot H_2O)$ Hidróxido de calcio
$2(3CaO \cdot SiO_2)$ Silicato dicálcico	$+9 H_2O$ agua	$= 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 8H_2O$ Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	$+CaO \cdot H_2O$ Hidróxido de calcio
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico	$+3(CaO \cdot SO_3 \cdot 2H_2O)$ yeso	$+26 H_2O$ agua	$= 6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$ Etringita
$2(3CaO \cdot Al_2O_3)$ Aluminato tricálcico	$+6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$ Etringita	$+4 H_2O$ agua	$= 3(4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 12H_2O)$ Monosulfoaluminato de calcio
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico	$+CaO \cdot H_2O$ Hidróxido de calcio	$+12 H_2O$ agua	$= 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ Aluminato tetracálcico hidratado
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ Ferroaluminato tetracálcico	$+10 H_2O$ Agua	$+2(CaO \cdot H_2O)$ Hidróxido de calcio	$= 6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12H_2O$ Monosulfoaluminato de calcio

Nota: Tomado de Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 54.

Los compuestos químicos del cemento como los silicatos de calcio C_3S y C_2S , en presencia con el agua, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio entre 15% – 25% y el silicato de calcio hidratado de aproximadamente 50% en masa, en el cemento Portland hidratado (18).

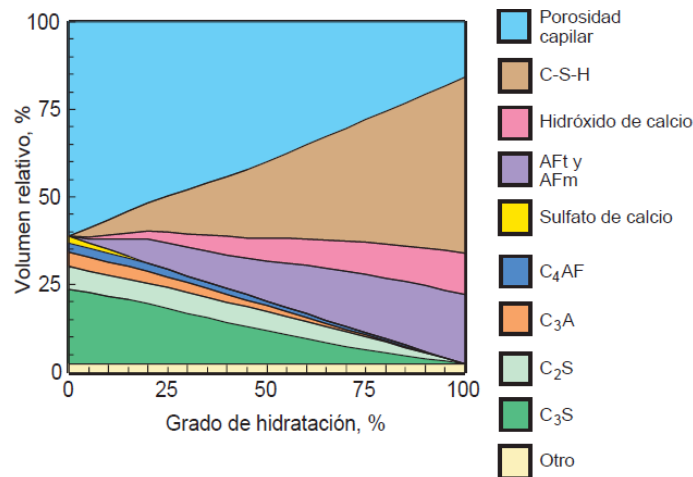


Figura 26. Modelo de computadora para la relación agua/cemento de 0.50, para un cemento tipo I: $C_3S = 55\%$, $C_2S = 18\%$, $C_3A = 8\%$ y $C_4AF = 8\%$. “AFt y AFm” incluyen etringita (AFt) y monosulfoaluminato de calcio (AFm) y otros hidratados de aluminato de calcio. Tomado de “Diseño y control de mezclas”, por Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 55.

Entonces, la resistencia y otras propiedades del cemento se deben principalmente al silicato de calcio hidratado (18). El C_3A reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado, también el yeso y el agua se combina para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos, y el C_4AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado (18). En la Figura 26, se puede visualizar el porcentaje de hidratación de los compuestos para un cemento Portland tipo I.

B) Agregados

Los agregados fino y grueso ocupan aproximadamente entre 60% – 75% del volumen del concreto, que puede representar entre 70% – 85% de la masa e influyen fuertemente en las propiedades (18). Los agregados son elementos inertes del concreto que son aglomerados por la pasta de cemento para formar una estructura resistente (20); es decir, no intervienen en las reacciones químicas de la pasta (cemento y agua) (17).

El agregado fino representa entre 35 – 45% de la masa o volumen del total de agregados (18). La obtención proviene de la desintegración natural o artificial con tamaños que pasa por el tamiz 9.5 mm (3/8”), donde sus partículas serán limpias, perfil angular, compactas y resistentes (36). El agregado fino debe estar libre de materias impuras como

polvo, limo, pizarra, álcalis, materias orgánicas y no debe tener más de 5% de arcilla o limos, ni más de 1.5% de materias orgánicas (17). Además, los requisitos de su gradación están de acuerdo a la norma ASTM C 33, como se visualiza en la Tabla 14, y el módulo de fineza del agregado fino debe ser recomendable entre el 2.35 y 3.15 (36).

El agregado grueso puede consistir de grava natural o triturada y pueden ser de rocas graníticas, dioríticas y sieníticas, donde también no deben contener más de un 5% de arcillas y ni más de 1.5% de materias orgánicas, carbón y otros (36),(17). El agregado grueso, deberá tener una buena gradación y dentro de los límites que establece el ASTM C 33, como se visualiza en la Tabla 15; también está definido como el material retenido en el tamiz 4.75 mm (Nº4) y no deberá tener pérdidas por más del 50% en el ensayo de abrasión, de acuerdo a la norma ASTM C 131 (36).



Figura 27. a) agregado fino (arena). b) agregado grueso, con grava redondeada (izquierda) y piedra chancada o triturada (derecha). Tomado de “Diseño y control de mezclas”, por Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 103.

Tabla 14. Requisitos granulométricos para un agregado fino.

Tamiz estándar	% en peso del material que pasa el tamiz
3/8"	100
Nº4	95 a 100
Nº8	80 a 100
Nº 16	50 a 85
Nº 30	25 a 60
Nº 50	10 a 30
Nº 100	2 a 10

Nota: Tomado de Teodoro Harmsen, 2002, p. 12.

Tabla 15. Requisitos granulométricos para un agregado grueso.

Tamaño Nominal	% Pasa por lo tamices normalizados												
	100 mm (4")	90 mm (3 ½")	75 mm (3")	63 mm (2 ½")	50 mm (2")	37.5 mm (1 ½")	25 mm (1")	19 mm (¾")	12.5 mm (½")	9.5 mm (⅜")	4.75 mm (Nº04)	2.36 mm (Nº08)	1.18 mm (Nº16)
90 mm a 37.5 mm (3 ½" a 1 ½")	100	90 - 100		25 - 60		0-15		0-5					
63 mm a 37.5 mm (2 ½" a 1 ½")			100	90 - 100	35 - 70	0-15		0-5					
50 mm a 25.0 mm (2" a 1")				100	90 - 100	35-70	0-15		0-5				
50 mm a 4.75 mm (2" a Nº4)				100	95 - 100		35-70		10-30		0-5		
37.5 mm a 19.0 mm (2 ½" a ¾")					100	90-100	20-55	0-15		0-5			
37.5 mm a 4.75 mm (1 ½" a Nº4)					100	95-100		35-70		10-30	0-5		
25.0 mm a 12.5 mm (1" a 1 ½")						100	90 - 100	20-55	0-10	0-5			
25.0 mm a 9.50 mm (1" a ⅜")						100	90 - 100	40-85	10-40	0-15	0-5		
25.0 mm a 4.75 mm (1" a Nº4)						100	95 - 100		25-60		0-10	0-5	
19.0 mm a 9.50 mm (¾" a Nº4)							100	90-100	20-55	0-15	0-5		
19.0 mm a 4.75 mm (½" a Nº4)							100	90-100		20-55	0-10	0-5	
12.5 mm a 4.75 mm (½" a Nº4)								100	90-100	40-70	0-15	0-5	
9.50 mm a 2.36 mm (⅜" a Nº8)									100	80-100	10-30	0-10	0-5

Nota: Tomado de Teodoro Harmsen, 2002, p. 14.

C) Agua

El agua es el ingrediente clave en cualquier mezcla con cemento Portland, para reaccionar químicamente y desarrollar la resistencia (18). El agua en una mezcla de concreto tiene las tres principales funciones que son, reaccionar con el cemento para hidratarlo, contribuir a la trabajabilidad de la mezcla y tener espacios vacíos necesarios para que la hidratación en la pasta pueda desarrollarse (20). Además, el agua utilizada debe estar libre de aceites, ácidos, álcalis, sales y materias orgánicas y el agua adecuada para el concreto es el “agua potable” (17). El (ACI-318S-19-R26.4.1.4), confirma que el agua que se utilice debe ser potable y debe cumplir la norma ASTM C 1602, donde incluye los límites opcionales para los cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezclado, y también se puede utilizar la NTP 339.088, que menciona que el agua potable, es el agua para el consumo humano.

Tabla 16. Límites permisibles para agua de mezcla y de curado.

Descripción	Límite permisible
Sólidos en suspensión	5000 p.p.m (máximo)
Materia Orgánica	3 p.p.m (máximo)
Alcalinidad ($NaHCO_3$)	1000 p.p.m (máximo)
Sulfato (ión SO_4)	600 p.p.m (máximo)
Cloruro (ión Cl^{-1})	1000 p.p.m (máximo)
pH	5-8

Nota: Adaptado de Enrique Pasquel, 1999, p. 61.

Entonces, en la presente investigación se utilizó el agua potable o el agua de uso doméstico (agua para el consumo humano), pero en la mezcla de concreto, ya que está dentro de los límites permisibles de la normativa. Esto es una regla empírica en establecer, si no daña al hombre, no daña al concreto, para determinar si un agua sirve o no para emplearse en el concreto y los mismos requisitos que son para el agua en la mezcla son para el curado del concreto en estado endurecido (20).

D) Aditivos y adiciones

El aditivo es un material distinto del agua, agregado o cemento, que es utilizado como un componente del concreto que se agrega antes o durante el mezclado a fin de modificar una o algunas de sus propiedades (36). Estos aditivos se pueden clasificar en aditivos químicos y aditivos minerales; por ejemplo, los aditivos químicos son aditivos incorporadores de aire, plastificantes, superplastificantes y controladores de fragua, donde están especificados según la normativa ASTM C 260 y ASTM C 1017 (17). Los aditivos minerales son principalmente los aditivos naturales, cenizas volante (*fly ash*), micro sílice (*silica fume*) y escoria de la producción de acero, donde también están especificadas en el ASTM C 618, ASTM C 989 y ASTM C 124 (17).

Sin embargo, la norma técnica peruana NTP 334.001-2001, en base a la norma ASTM C 219, define los aditivos (*admixture*) y adiciones (*addition*), donde tienen algunas similitudes y diferencias. Para la normativa mencionada, los aditivos son definidos como un material que se incorpora al cemento en cantidades limitadas durante la fabricación, como un “aditivo de proceso” para ayudar en la fabricación o manipulación del cemento, modificando sus propiedades, pero el aditivo no solo se utiliza en la fabricación, también se puede utilizar durante el mezclado de concreto (36) y también lo confirma en la terminología del ACI-318S-19. En las adiciones, la misma normativa menciona que son materiales minerales que se incorporan al cemento en molienda conjunta con algunas rocas, que pueden ser (puzolanas, escoria granulada de alto horno, caliza, humo de sílice) que actúan, aumentando las propiedades hidráulicas del cemento o mejorando otras cualidades como (trabajabilidad, disminución porosidad y capilaridad, reducción de la fisuración, etc.), pero a estas adiciones minerales les denomina aditivos minerales, ya que también utiliza materiales minerales, según (17). Además, los aditivos minerales son adicionados al concreto en cantidades relativamente grandes y su función es mejorar la trabajabilidad, durabilidad y producir concretos de alta resistencia (17).

Entonces, según lo detallado anteriormente por la NTP 334.001-2001 o ASTM C 219, sobre las definiciones entre aditivos y adiciones, y por el ACI-318-19, que se pueden utilizar durante el mezclado del

concreto, podemos decir que el aditivo su finalidad principal es ayudar en la manipulación del concreto modificando químicamente sus propiedades y que las adiciones son materiales minerales, que tienen por finalidad principal en aumentar la resistencia del concreto y mejorar propiedades como la durabilidad y otros (36),(17).

En esta investigación utilizamos el grafeno como adición, ya que nuestro principal objetivo fue mejorar la resistencia del concreto y porque el grafeno proviene del grafito, y el grafito es un mineral negro, según la real academia española, también es un mineral suave de gris a negro, estable, químicamente inerte y no tóxico, que se encuentra en forma de agregados en pequeños cristales hexagonales en la naturaleza por un metamorfismo en los sedimentos y ocurre en los esquistos y mármoles, también se encuentra en rocas ígneas (37).

2.2.1.3.2 Propiedades del concreto en estado fresco

El concreto es un producto artificial compuesto, donde la pasta es el resultado de la combinación química del cemento y agua, dentro del cual se encuentran embebidas los agregados; es decir, que está compuesto de pasta y agregado (19). El concreto en estado fresco o recién mezclado debe ser plástico, y al decir el término “plástico”, significa que debe ser flexible y capaz de ser moldeado (18). Las propiedades principales del concreto en estado fresco son:

A) Trabajabilidad

Es la facilidad de una mezcla de concreto fresco para ser manipulado, transportado y colocado con un mínimo trabajo y un máximo de homogeneidad (19). La trabajabilidad está influenciada por la pasta, contenido de agua y equilibrio entre agregados gruesos y finos, que en el caso óptimo un desplazamiento natural (20). Además, la trabajabilidad también es el grado que resiste a la segregación y los factores que también influyen en la trabajabilidad son la duración del transporte, consistencia del concreto, textura y forma de los agregados, cantidad de agua, temperatura del concreto y del aire (18). Entonces, la trabajabilidad involucra conceptos como capacidad de moldeo, cohesividad y capacidad de compactación (36).

B) Consistencia

En una propiedad del concreto que define la humedad en la mezcla por el grado de fluidez; es decir, cuanto más húmedo es la mezcla, mayor será la facilidad del concreto fluir durante su colocación (36), (19). La consistencia está relacionada con la trabajabilidad, pero no son sinónimos (19), ya que la consistencia se define por el grado de asentamiento o revenimiento (*Slump*), donde con el equipo de cono de Abrams, se puede medir la consistencia (18). La consistencia se clasifican en tres grupos que son el concreto de consistencia seca (0 – 2”), consistencia plástica (3” – 4”) y consistencia fluida (> 5”) (36).

2.2.1.3.3 Propiedades del concreto en estado endurecido

A) Resistencia a la compresión

Es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por el material sin romperse y es la propiedad más importante del concreto endurecido (36). Esta resistencia se puede realizar mediante la resistencia en compresión y resistencia en flexión, pero la resistencia en compresión se utiliza como índice de la calidad del concreto (19).

La resistencia a compresión es la carga máxima de la resistencia a carga axial, expresada en (kg/cm^2), (MPa) o ($lb/pulg^2$) y es obtenida mediante una probeta cilíndrica, que permanece 24 horas después del vaciado en el molde, para ser curado bajo agua hasta el momento del ensayo, con una carga uniforme de $2.45\ kg/cm^2/s$ (17),(18). La resistencia a la compresión (f'_c) se define como el promedio de la resistencia como mínimo de dos probetas o especímenes tomadas de la misma muestra ensayadas a los 28 días, según se detalla en las normas ASTM C 192M o NTP 339.183 y ASTM C 39 o NTP 339.034 (17).

Las probetas para el ensayo de resistencia a la compresión del concreto, pueden ser en moldes cilíndricos $100\ mm \times 200\ mm$ ($4 \times 8\ pulgadas$), que se utiliza para agregados de tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ pulgadas y es utilizado mayormente por que es más fácil de moldear y

requiere menos materiales, el peso es mucho menor y se tiene más espacio para el curado que las probetas 150 mm x 300 mm (6 x 12 pulgadas) (18).

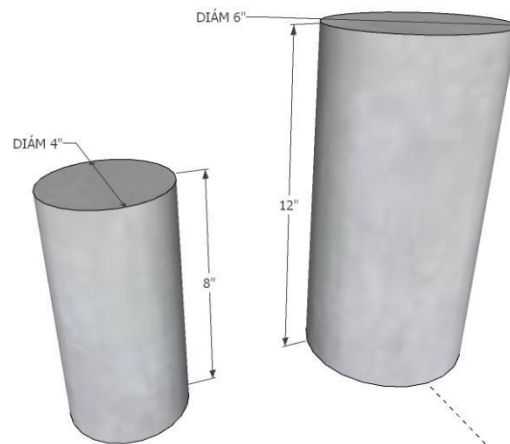


Figura 28. Especímenes cilíndricos de concreto de 4x8 pulgadas (izquierda) y 6x12 pulgadas (derecha), para ensayos a la resistencia a la compresión.

Para desarrollar la investigación, realizamos con moldes de 4 x 8 pulgadas y la norma ASTM C 39 o NTP 339.034, muestra el coeficiente de variación, donde son intervalos de valores aceptables para rotura de cilindros para ensayos a la compresión, correspondientes para una misma edad de concreto, como se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Precisión para ensayos de resistencia a compresión.

	Coeficiente de variación	Rango aceptable de resistencia de cilindros individuales	
		2 Cilindros	3 Cilindros
Cilindros de 150 mm x 300 mm			
Condiciones de laboratorio	2.4 %	6.6 %	7.8%
Condiciones de obra	2.9 %	8.0 %	9.5%
Cilindros de 100 mm y 200 mm			
Condiciones de laboratorio	3.2 %	9.0%	10.6%

Nota: Tomado de la NTP 339.034, 2015, p. 18.

Entonces, las mediciones de la resistencia a compresión de los cilindros se realizan para una misma muestra de concreto y ensayadas en una misma edad; es decir, pudimos roturar tres unidades cilíndricas para una edad específica del concreto, donde los resultados estuvieron dentro de

los parámetros del coeficiente de variación según la Tabla 17. Además, la norma NTP 339.034 menciona que los ensayos de compresión de especímenes curados en húmedo serán realizados tan pronto, luego de retirarlos del almacenaje húmedo (curado) y en la Tabla 18, se observó las edades de ensayos en la que se puede ensayar la resistencia a compresión, donde el número de probetas o especímenes ensayados por día, de una sola muestra, pueden ser como mínimo dos (17). Sin embargo, la norma ASTM C 192M o NTP 339.183, menciona que el número de especímenes moldeados, usualmente deben ser de tres o más para cada edad, por lo que para esta investigación utilizamos tres probetas para cada edad y para una sola muestra. Finalmente, pudimos elegir las edades para ser ensayadas según las edades establecidas en la Tabla 18.

Tabla 18. Edades de ensayo y tolerancias permisibles

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 h	$\pm 0.5 h$ ó 2.1 %
3 d	$\pm 2 h$ ó 2.8 %
7 d	$\pm 6 h$ ó 3.6 %
28 d	$\pm 20 h$ ó 3.0 %
90 d	$\pm 48 h$ ó 2.2 %%

Nota: Tomado de la NTP 339.034, 2015, p. 18.

B) Resistencia del concreto a la tracción

La resistencia del concreto a la tracción tiene un valor entre 8%-15% de la resistencia a la compresión, donde determinar este parámetro es difícil de obtener con ensayos directos (17). Es una magnitud muy variable y no es simple para ejecutar por su baja resistencia en tracción, su fragilidad y por la dificultad de aplicar cargas que distorsionen los resultados (11). Para estimar la resistencia del concreto a tracción se han diseñado dos métodos indirectos.

El primer método es el ensayo brasileño o ensayo de compresión diametral (Split test), qué consiste la rotura de una probeta cilíndrica cargada diametralmente, este procedimiento está especificado en la

norma ASTM C 496 (17), (11). La resistencia tracción o esfuerzo de compresión diametral (f_{sp}) se calcula según la ecuación 7, deducida de la teoría de la elasticidad para materiales homogéneos (11).

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi ld} \quad \text{Ecuación 7 (17), (11).}$$

Dónde: f_{sp} : *esfuerzo a compresión diametral*
 P : *Carga de rotura*
 l : *Longitud del cilindro*
 d : *Diámetro del cilindro*

El valor de f_{sp} puede variar entre $1.59 \sqrt{f'c}$ y $2.2 \sqrt{f'c}$, pero generalmente se puede optar por el valor de las ecuaciones 8 ó 9.

$$f_{sp} = 1.6 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 8 (17)}$$

$$f_{sp} \approx 1.7 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 9 (11).}$$

El segundo método es el ensayo de tracción por flexión (Módulo de rotura o ruptura), también es llamado pruebas de resistencia a flexión (11), (17). En este ensayo se utilizó una viga de sección transversal cuadrada de 150 mm (6 pulgadas) con una longitud de 700 mm (70 cm), con apoyos centrales en los 60 cm, cargados en los tercios de la luz entre apoyos; sin embargo, en la norma NTP 339.078 o ASTM C 78, menciona que la luz libre (longitud de la viga), tendrá un equivalente de tres veces su altura; es decir tres veces de 15 cm, con una tolerancia del 2%. La longitud de viga prismática simplemente apoyada es de 18 pulgadas (45cm), pero la normativa que menciona una tolerancia del 2%, podríamos utilizar una viga de 50 cm para los ensayos de resistencia a flexión (f_r) (11).

El parámetro obtenido, de resistencia a la flexión (módulo de rotura o ruptura) de expresa de la siguiente ecuación 10.

$$f_r = \frac{6M}{bh^2} \quad \text{Ecuación 10 (11), (17).}$$

Dónde: f_r : *Módulo de rotura (resistencia a flexión)*
 M : *Momento flector en la sección de falla*
 b : *Ancho de la sección rectangular*
 h : *Altura o peralte de la sección rectangular*

Después de un gran número de resultados experimentales, se tiene un promedio con mucha dispersión que es la ecuación 11, pero para el ACI sugiere la ecuación 12.

$$f_{sp} \approx 2.2\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 11 (11)}$$

$$f_{sp} = 2.0\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 12 (17)}$$

Sin embargo, las ecuaciones 11 y 12 se realizaron para cálculo de deflexiones en elementos de concreto armado y que en elementos de concreto simple (sin refuerzo de acero) sometidos a flexión se puede especificar según la ecuación 13 (11).

$$f_{sp} \approx 1.3\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 13 (11)}$$

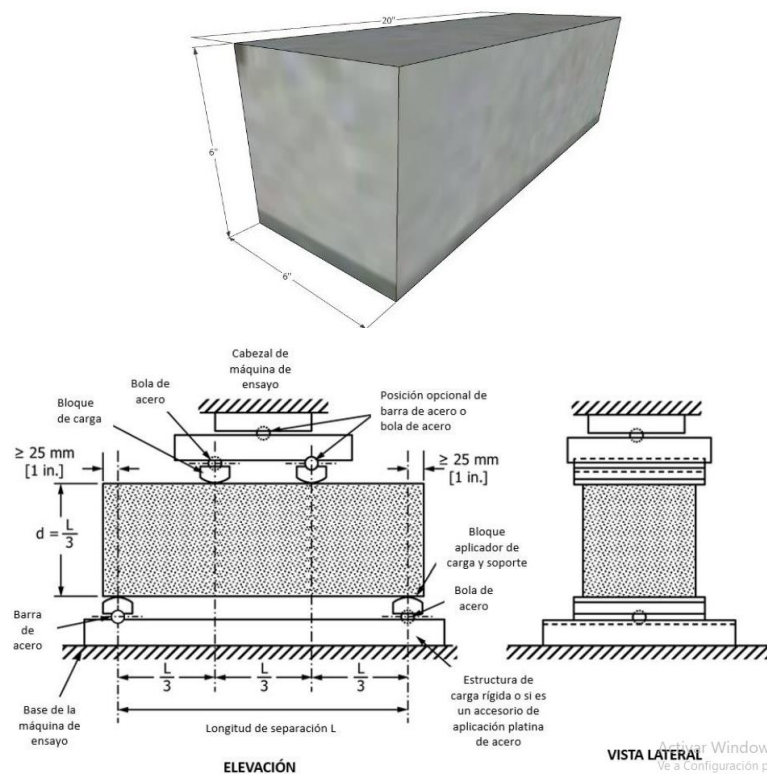


Figura 29. Especímenes de vigas prismáticas (superior) y el esquema para ensayar a flexión con cargas a los tercios según la NTP 339.078 (inferior). Tomado de NTP 339.078, 2012, p. 10.

En la Figura 29, podemos observar un ejemplo de una viga prismática para realizar el ensayo de resistencia a la flexión por medio del módulo de rotura para determinar su valor. Además, se analizó diferentes

resultados y se ha determinado que el módulo de rotura (f_r) es igual entre 1.25 y 1.50 veces la resistencia de compresión diametral (f_{sp}) (17).

2.2.1.3.4 **Diseño, mezclado, colocación y curado del concreto**

El mezclado, transporte, colocación y curado son operaciones que influyen en la calidad del concreto, también la utilización de los componentes del concreto (piedra, arena, agua y cemento) (17). Los principales factores que afectan la resistencia del concreto son la relación agua-cemento (w/c), el aire incorporado o atrapado, el tipo de cemento, la gradación y textura del agregado, la velocidad de carga o deformación del concreto y las condiciones de humedad y temperatura de curado (11). Por lo tanto, resumimos el procedimiento en base a la normativa ASTM, NTP y el ACI desde su elaboración hasta el resultado y ensayo final del concreto.

A) Diseño de mezcla del concreto

Es la aplicación técnica y práctica de los conocimientos científicos sobre sus componentes y su interacción, para obtener un material más eficiente para un proyecto constructivo con mezcla de concreto (20). En la actualidad tenemos varios tipos de mezcla de concreto, respecto a su diseño y desempeño, la más común es la mezcla de concretos normales que están entre $2300 - 2400 \text{ kg/m}^3$ y con resistencia máxima de $350 - 400 \text{ kg/m}^3$, que en la actualidad no son difíciles de lograr (20).

En la actualidad tenemos el Método del ACI, que es un método tradicional para el diseño de mezcla, donde los agregados con los requisitos físicos y granulométricos tiene que estar de acuerdo con el ASTM C 33, el agua de mezcla está empíricamente en función del tamaño máximo del agregado y el slump (asentamiento o revenimiento) como medida de trabajabilidad (véase Tabla 19), el agregado grueso compactado en seco está en función del tamaño máximo de la piedra y el módulo de fineza de la arena, también establecido empíricamente (véase Tabla 21); finalmente la relación agua/cemento (w/c) en peso está correlacionada con la resistencia a la compresión (véase Tabla 20) (20).

Tabla 19. Requisitos aproximados de agua en la mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños nominales máximos del agregado.

Asentamiento (Slump)	Tamaño máximo nominal de agregado							
	Agua en kilogramos por metro cúbico de concreto, para cada tamaño de agregado indicado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" - 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" - 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" - 7"	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire Incorporado								
1" - 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" - 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" - 7"	216	205	197	185	174	166	154	-
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje								
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Nota: Tomado de Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 190.

Tabla 20. Relación agua-cemento y resistencia a compresión del concreto.

Resistencia a compresión a 28 días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-cemento, por peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	-
400 (40)	0.43	-
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.71

Nota: Tomado de Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 187.

Tabla 21. Volumen de agregado grueso compactado en seco por metro cúbico de concreto.

Tamaño nominal máximo del agregado grueso en pulgada (mm)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8" (9.5)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2" (12.5)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4" (19.0)	0.66	0.64	0.62	0.60
1" (25.0)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2" (37.5)	0.76	0.73	0.71	0.69
2" (50.0)	0.78	0.76	0.74	0.72
3" (75.0)	0.82	0.80	0.78	0.76
6" (150.0)	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota: Tomado de Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William Panarese y Jussara Tanesi, 2004, p. 188.

En la Tabla 19, 20 y 21, son parámetros ya establecidos para desarrollar el diseño de mezcla por el método del ACI, detallado en el ACI 211.1-91 y también en el ACI 211.3R-97. Además, tenemos el diseño de mezcla por el método del módulo de fineza de la combinación de los agregados y otros. En esta investigación se realizó el diseño de mezcla con el método del ACI, por lo que se detalla el procedimiento.

- a) Selección del coeficiente de variación: El diseño para una resistencia promedio siempre debe ser superior que la resistencia de diseño especificada, pero tenemos variación en la calidad del concreto, que puede ser por la calidad de los materiales, proceso de elaboración o en el control de calidad, debido a esto, el coeficiente de variación recoge datos propios del laboratorio y lo relaciona con la ecuación 14, los valores que relaciona el grado de control con el coeficiente de variación se visualiza en la Tabla 22 (36).

Tabla 22. Coeficiente de variación y grados de control.

Obtenidos únicamente en ensayos de laboratorio	5%
Excelente en obra	10% a 12%
Bueno	15%
Regular	18%
Inferior	20%
Malo	25%

Nota: Tomado de Enrique Rivva López, 1992, p. 52.

$$V = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2)} \quad \text{Ecuación 14 (36).}$$

- b) Cálculo de la desviación estándar: Si en los últimos 12 meses, se tiene registros de sus resultados de ensayos, se deberá calcular la desviación estándar (ecuación 16) de 30 resultados como mínimo y consecutivos, en el caso se tenga un registro entre 15 – 29 ensayos consecutivos, se determinará la desviación estándar multiplicada por el factor de corrección de la Tabla 23. Si desarrollamos nuestros ensayos con muestras de resistencias de concreto, podemos utilizar los fundamentos estadísticos para desarrollar la distribución normal, el coeficiente de variación en función de la desviación estándar y las demás ecuaciones para determinar la resistencia requerida en función de "t" (factor de probabilidad de ocurrencia), según se puede visualizar en ecuaciones de la resistencia de diseño especificada ($f'c$) y requerida ($f'cr$). Además, se tiene la Tabla 24, donde se puede utilizar los valores de desviación estándar y coeficiente de variación, para diferentes grados de control que se puede esperar en el laboratorio o en una obra (20), (36).

Tabla 23. Factor de corrección de desviación estándar (<30 muestras).

Ensayos	Factor de corrección
Menos de 15	Usar Tabla
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o mas	1.00

Nota: Tomado de Enrique Rivva López, 1992, p. 55.

$$Y = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left(\frac{(X-\bar{X})}{s}\right)^2} \quad \text{Ecuación 15 (20), (36).}$$

$$s = \sqrt{\frac{(X_1-\bar{X})^2 + (X_2-\bar{X})^2 + \dots + (X_n-\bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación 16 (36), (20).}$$

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad \text{Ecuación 17 (36), (20).}$$

$$f'cr = f'c + ts \quad \text{Ecuación 18 (20), (36).}$$

$$f'_{cr} = \frac{f'_c}{(1-tV)} \quad \text{Ecuación 19 (20), (36).}$$

$$t = \frac{\underline{X} - f'_c}{s} \quad \text{Ecuación 20 (20), (36).}$$

Donde: s = Desviación estándar

V = Coeficiente de Variación

n = número de ensayos de la serie

$$X_1, X_2, X_n = \sum X, \text{número de ensayos de la serie}$$

Y = Distribución normal

X = resistencia a la compresión individual

$\underline{X}$ = Resistencia a compresión promedio de ensayos indiv.

$$\varepsilon = 2.71828$$

$$\pi = 3.14159$$

f'_c = Resistencia de diseño especificada a la compresión

f'_{cr} = Resistencia promedio requerida a la compresión

t = probabilidad de ocurrencia, factor que depende del % de resultados menores de f'_c

Tabla 24. Valores de dispersión en el control de concreto.

DISPERSIÓN TOTAL					
Clase de Operación	Desviación estándar para diferentes grados de control				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> 49.2
Concreto en laboratorio	< 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> 24.6
DISPERSIÓN ENTRE TESTIGOS					
Desviación estándar para diferentes grados de control					

Clase de Operación	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6.0
Concreto en laboratorio	< 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5.0

Nota: Tomado de Enrique Pasquel, 1999, p. 161.

- c) Cálculo de la resistencia promedio (f'_{cr}): La resistencia promedio requerida (f'_{cr}), se debe emplear como base para la selección de proporciones en una mezcla de concreto (36). En las ecuaciones 21 y 22, se debe emplear, según el caso, la desviación estándar calculada con la Tabla 24 y la ecuación 16.

$$f'_{cr} \geq f'_c + 1.34Ds \quad \text{Ecuación 21 (17), (20), (36).}$$

$$f'_{cr} \geq f'_c + 2.33Ds - 35 \quad \text{Ecuación 22 (17), (20), (36).}$$

La ecuación 21, proporciona una probabilidad de 1/100 donde el promedio de tres resultados de ensayos pueda estar por debajo de la resistencia de diseño especificada, al igual que la ecuación 22, con la misma probabilidad con un valor de 35 kg/cm² puedan estar por debajo de la resistencia de diseño especificada. Sin embargo, en el caso que no se cuente con un registro de resultados que posibilite el cálculo de la desviación estándar, se puede utilizar la Tabla 25 (36).

Tabla 19. Resistencia promedio requerida (f'_{cr}) cuando no se tiene resultados para determinar la desviación estándar.

Si, $f'_c \leq 210 \frac{kg}{cm^2}$	$f'_{cr} = f'_c + 70 \frac{kg}{cm^2}$
Si, $210 \frac{kg}{cm^2} < f'_c \leq 350 \frac{kg}{cm^2}$	$f'_{cr} = f'_c + 84 \frac{kg}{cm^2}$
Si, $f'_c > 350 \frac{kg}{cm^2}$	$f'_{cr} = f'_c + 98 \frac{kg}{cm^2}$

Nota: Tomado de Teodoro Harmsen, 2002, p. 14.

Todo lo que se ha detallado hasta el momento está de acuerdo al ACI-318 y el comité europeo desarrolló una ecuación para determinar la resistencia promedio requerida, que está en función del número máximo de resultados pueda ser un valor inferior a la resistencia de diseño

especificada, como también la cantidad de resultados empleados para calcular el coeficiente de variación y esto se puede visualizar en la ecuación 17 (36).

B) Preparación, mezclado y colocación de concreto

En concreto en estado fresco se puede determinar con ensayos de asentamiento, medir su temperatura, pero en esta parte detallamos lo que realizamos para una adecuada utilización de nuestros materiales del concreto, cuando ya hemos desarrollado el diseño de mezcla que se detalló anteriormente. Estos métodos para el proceso de la preparación y mezclado del concreto, está detallado según la normativa ASTM, NTP y el ACI.

En la NTP 339.036 o ASTM C 172, en un concreto fresco el tiempo transcurrido entre la obtención de la porción inicial y final de una muestra compuesta no excederá los 15 minutos. Los ensayos de asentamiento, temperatura y del contenido de aire se debe realizar dentro de los 5 minutos después de haber obtenido la última muestra y el inicio del moldeo de especímenes para el ensayo de resistencia debe estar dentro de los 15 minutos después de elaborar la muestra compuesta y hacer que esto sea lo más corto posible, protegiendo del sol, viento fuentes de rápida contaminación y evaporación. Además, el tamaño de la muestra para el ensayo de resistencia deberá tener como mínimo 1 pie³.

El tiempo de mezclado inicia desde el momento que todos los ingredientes (agregado grueso y fino, cemento y agua) están en la máquina y se requiere un tiempo mínimo de un minuto y medio, con esto podemos definir como el inicio de preparación y mezclado de concreto (17). Entonces, después finalizado la porción (una mezcla de concreto fresco preparado en una mezcladora giratoria, para este caso), cuando finalice la primera muestra de mezcla de concreto, nos aseguramos realizar los pasos de la norma para un concreto fresco obtenido, donde debemos realizar los ensayos de temperatura, asentamiento y contenido de aire dentro de los 5 minutos y finalmente dentro de los 15 minutos posteriores realizar la parte de la colocación de la mezcla de concreto en los moldes. En esta última parte de los moldes, para esta investigación desarrollamos para moldes cilíndricos y

vigas prismáticas, según se detalló anteriormente, se desarrolló en laboratorio debiendo seguir el procedimiento, de acuerdo a la norma NTP 339.183 / ASTM C 192M, que es la elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio y aplica para moldes cilíndricos y prismáticos.

Finalmente, como se detalló en las propiedades del concreto endurecido, la resistencia a la compresión del concreto fue de acuerdo a la norma NTP 339.034 / ASTM C 39, siguiendo las dimensiones de los moldes cilíndricos para utilizar, los días o edades de ensayos y el porcentaje máximo de variación que debe tener los moldes, de la misma forma es la normativa NTP 339.078 / ASTM C 78, para las vigas prismáticas.

2.3 Definición de términos básicos

2.3.1 Adición o adiciones en el concreto: Son materiales minerales, que se incorporan en la fabricación del cemento, según la NTP. 334.001, o son adicionados al concreto en la mezcla, para aumentar la resistencia del concreto y mejorar propiedades como la durabilidad y otros (17).

(Extraído del libro “Diseño de estructuras de Concreto Armado”, página 15; de la norma “American Society for Testing and Materials, ASTM C 219” página 1; y de la “Norma Técnica Peruana, NTP 334.001-2001”, sección 4.1, pág 2).

2.3.2 Concreto (C): Es un material constituido por la mezcla de cemento, agregado grueso (piedra), agregado fino (arena), agua y opcionalmente aditivos (20).

(Extraído del libro “Tópicos de tecnología del Concreto”, páginas 11-13).

2.3.3 Exfoliación en fase líquida (G_L): Es un método ventajoso para hacer dispersiones altamente concentradas a gran escala en numerosos sistemas de solventes, producida a través del deslaminado de grafito a capas de grafeno asistida por un solvente o moléculas llamadas agentes exfoliantes (16). “Este proceso requiere de dos componentes principales como la fuerza mecánica para superar las interacciones entre capas adyacentes en el cristal de grafito y un agente estabilizador que evita que las escamas de grafeno se vuelvan a apilar para formar termodinámicamente más estables” (16). La exfoliación en fase líquida se puede lograr mediante ultrasonido, alto cizallamiento, molienda de bolas o potencial electroquímico (16).

(Extraído del libro “Introduction to Graphene”, Sección del libro “Capítulo 2 – Synthetic routes to Graphene preparation from the perspective of possible biological applications”, páginas 23,24).

- 2.3.4** Exfoliación por cizallamiento o corte: Es un método de mayor rendimiento y eficiencia en la exfoliación en fase líquida, más conocido como “Shear exfoliation” en inglés y es un método para generar una alta fuerza mecánica para separar capas de grafeno del cristal de grafito aplicando alto cizallamiento “High Shear”, donde la fuerza mecánica es una fuerza normal paralela al plano de las hojas de grafeno, como fuerza de corte “Shear force” que provoca la deslaminación del grafito y esto se logra con un dispersor o una licuadora de cocina (16).

(Extraído del libro “Introduction to Graphene”, Sección del libro “Capítulo 2 – Synthetic routes to Graphene preparation from the perspective of possible biological applications”, páginas 26,27).

- 2.3.5** Grafeno (G): El término “Grafeno” se originó al estudiar los compuestos de intercalación del grafito, el material original, que es la forma tridimensional (3-D) y natural del grafeno, y se utiliza para representar a los derivados del grafeno (15). El grafeno es el último alótropo de carbono estable donde los átomos de carbono sp^2 se orientan en una red de panal bidimensional (2-D) para formar capas atómicamente delgadas (15).

(Extraído del libro “Introduction to Graphene”, Sección del libro “Capítulo 1 – Discovery of Graphene and beyond”, páginas 2,4).

- 2.3.6** Grafito (Gp): Es una forma cristalina tridimensional (3-D) del elemento carbono y consiste puramente en enlaces con hibridación sp^2 y está compuesto de una estructura laminar en capas y planas (14).

(Extraído del libro “Graphene – Fabrication, Characterizations, Properties and Applications”, Sección del libro “Capítulo 1 – Structure and Properties of Graphene”, páginas 1,2).

- 2.3.7** Resistencia a la compresión: Es la máxima resistencia a carga axial de especímenes de concreto expresados en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²), megapascuales (MPa) o en libras por pulgada cuadrada (lb/pulg² o

psi) (18). Está designada como resistencia especificada a la compresión del concreto (f'_c), resistencia real a la compresión del concreto (f_c) (18) y resistencia promedio a la compresión requerida (f'_{cr}) (20). Este parámetro es obtenido mediante un método de ensayo en especímenes de moldes cilíndricos, establecido en las normas NTP 339.034 / ASTM C 39 (17).

- 2.3.8** Resistencia a la flexión: Es la resistencia a la tracción del concreto sometido a flexión y es una propiedad más variable que la resistencia a la compresión y es igual entre el 8%-15% de la resistencia a la compresión (ACI 318.14) (17). Los resultados se calculan y reportan como el módulo de rotura o ruptura (f'_r), donde el parámetro es obtenido mediante un ensayo en especímenes de moldes prismáticos, establecidos en las normas NTP 339.078 / ASTM C 78.

(Extraído del libro “Diseño de estructuras de Concreto Armado”, páginas 24-26; y del reglamento “American Concrete Institute, ACI 318S-14”, sección R22.2.2.2, página 372).

- 2.3.9** Resistencia del concreto: Es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por el concreto sin romperse, donde se puede utilizar en resistencia a la compresión como un índice de la calidad del concreto y/o la resistencia a la flexión que normalmente se utiliza en pavimentos (19).

*(Extraído del libro “Naturaleza y materiales del Concreto”, página 232).
(Extraído de los libros “Diseño y control de mezcla de Concreto”, página 232; “Tópicos de tecnología del Concreto”, página 158; “Diseño de estructuras de Concreto Armado”, página 21).*

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcances de la investigación

3.1.1 Método de la Investigación

A) Método general de la investigación

En esta investigación se utilizó como método general el Método Científico, para explicar las hipótesis planteadas del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, como adición en el concreto y deducir el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en la resistencia del concreto, mediante la elaboración de especímenes de concreto siguiendo la normativa, para ser ensayados y comparados los grupos experimentales con el grupo de control.

B) Método específico de la investigación

El Hipotético, Deductivo y Experimental, por el que se obtuvo el grafeno mediante la exfoliación en fase líquida del grafito, por su producción a gran escala, el nanomaterial grafeno se obtiene en diferentes concentraciones de grafeno/agua (g/l), para adicionar al agua en una mezcla de concreto, representadas como $GC - 1$ ($C_G 0.10 g/l$), $GC - 2$ ($C_G 0.21 g/l$), $GC - 3$ ($C_G 0.35 g/l$), $GC - 4$ ($C_G 0.52 g/l$), para ser comparados con un concreto estándar SC ($C_G 0.00 g/l$); es decir, sin

concentración de grafeno. En la normativa, NTP, ASTM y ACI, se puede observar los métodos para realizar los ensayos de compresión y flexión, que incluye conceptos teóricos y parámetros numéricos para determinar la resistencia del concreto en (kg/cm^2) y la resistencia a la flexión con el módulo de rotura para cada grupo experimental y grupo de control.

En primer lugar, para evaluar la resistencia del concreto a compresión y flexión, se realizó el diseño de mezcla para un concreto de 210 kg/cm^2 por el método del ACI, donde realizamos el cálculo, interpolamos, determinamos la cantidad de cemento, agua, agregados finos y agregados gruesos, mediante los cuadros que nos brinda el método del ACI. Cuando tuvimos las cantidades de los materiales que componen el concreto (cemento, agua, agregado grueso y fino) obtenidos por el diseño de mezcla, nos concentramos en conocer la cantidad de agua que se necesita y con este material modificamos su composición adicionando diferentes concentraciones de grafeno (C_G) en cantidades de (0.10, 0.21, 0.35, 0.52) en g/l , que son grupos experimentales, con la excepción del concreto estándar SC ($C_G\ 0.00\ g/l$), que es nuestro grupo de control para ser comparado con las diferentes concentraciones.

El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida se obtiene, mediante la exfoliación del grafito por el método de alto cizallamiento o exfoliación con cizalla en un medio líquido, que permite separar el grafito en forma tridimensional en diferentes capas en forma bidimensional que es el grafeno, esto también incluye agentes exfoliantes que permiten estabilizar el grafeno; es decir, no permite a la reagrupación y regrese a ser grafito. Para este procedimiento, utilizamos los materiales como el agua como medio líquido, el polímero de alcohol polivinílico (PVA) como agente exfoliante y el grafito en polvo ($< 20\ \mu m$), que se solicitó de Sigma Aldrich. La mezcla de cizallamiento se realizó con una cuchilla doméstica o de cocina colocada en un máquina que es un taladro de $750\ W$ de potencia a $3250\ rpm$, en un tiempo de 75 minutos siguiendo los procedimientos ya establecidos, analizados y estudiados de otras investigaciones. Sin embargo, el volumen máximo de mezcla de cizallamiento a preparar es en una cantidad de agua de $6\ l$, ya que utilizamos un parámetro analizado que es la ecuación $P/V = 100\ W/l$. Además, las concentraciones de grafito inicial agregadas a la mezcla por cizallamiento fueron de $1.5\ g/l$, $5\ g/l$, $8.5\ g/l$ y $12\ g/l$, en una proporción de 5:1 de grafito/PVA, para también adicionar el polímero como estabilizador, que son para los cuatro grupos

experimentales y un grupo de control que no se utilizó ninguna concentración de grafeno obtenido por exfoliación de grafito, y cuando se realizó cada mezcla pudimos seguir observando grafito en la mezcla y el grafeno exfoliado por cizallamiento, como menciona y detalla en otras investigaciones; entonces, comúnmente para separar el grafito excedente no exfoliado del líquido sería llevar a una centrífuga y decantar el grafito de la mezcla por su mayor masa, pero no es adecuado por su bajo nivel de rendimiento, ya que solo se realiza en pequeñas cantidades y para el concreto se requiere grandes cantidades de líquidos. Entonces, para decantar el grafito no exfoliado de la mezcla, se colocó en un lugar, estando estático por un tiempo de 5 días, hasta que pudimos observar la separación y sedimentación del grafito excedente no exfoliado por acción de la gravedad y esta cantidad de días pudo ser variable, ya que también se pudo observar que en un solo día, el grafito se puede sedimentar en la mezcla.

Finalmente, después de los 5 días el líquido con la concentración de grafeno exfoliado se vierte en un recipiente quedando el grafito no exfoliado en la base (grafito final), que también es retirado adicionando un poco de agua del mismo líquido del grafeno exfoliado para remover, diluimos el grafito final de la base y luego vertimos en otro recipiente más pequeño, que en este caso utilizamos un vaso de precipitado, para poder ser medido y pesado, en una balanza de precisión a dos decimales. Posteriormente, al finalizar cada mezclado de 6 litros por el método de la exfoliación por cizallamiento, retiramos el grafito final de la base para cada grafito inicial que se añadió a la mezcla (1.5 g/l , 5 g/l , 8.5 g/l , 12 g/l) y vertido en una vaso de precipitados, siendo acumulativo para cada mezclado por cizallamiento, porque se necesitaría aproximadamente 18 litros; es decir, tres mezclados de exfoliación grafito por alto cizallamiento de 6 litros para cada grupo experimental. Entonces, cuando se finalizó con el vertimiento del grafito final en los vasos de precipitado, se procedió a calentar hasta eliminar el contenido de agua existente en el grafito final, teniendo un grafito seco, para luego ser medido su peso. Se determinó el peso del grafito inicial y final, para conocer la concentración de grafeno exfoliado en el líquido.

Entonces, finalizados el cálculo de la diferencia de pesos de entre el grafito inicial y final, obtuvimos las siguientes concentraciones de grafeno para todos los grupos experimentales, $GC - 1$ ($C_G 0.10 \text{ g/l}$), $GC - 2$ ($C_G 0.21 \text{ g/l}$), $GC - 3$ ($C_G 0.35 \text{ g/l}$), $GC - 4$ ($C_G 0.52 \text{ g/l}$) y SC ($C_G 0.00 \text{ g/l}$) para ser comparados con este grupo de control, como ya se detalló anteriormente. Posteriormente, se realizó la

preparación del concreto utilizando un equipo mecánico que es una mezcladora de concreto, para mezclar todos los materiales y elaboramos el concreto para cada grupo ($SC, GC - 1, GC - 2, GC - 3$ y $GC - 4$), reemplazando solo el agua de la mezcla convencional por las concentraciones de grafeno/agua, solo para los grupos experimentales. Finalizado el proceso de mezclado, ya tuvimos elaborado el concreto fresco para proceder con la colocación de las mezclas de concreto en moldes o probetas cilíndricas y vigas prismáticas, esta preparación de especímenes de concreto mediante moldes está de acuerdo con la normativa.

La preparación de estos especímenes cilíndricos para la resistencia a la compresión se realizó en probetas cilíndricas de 4×8 pulgadas o 10×20 cm, y las vigas prismáticas para la resistencia a flexión (módulo de rotura), todo esto para los grupo $SC, GC - 1, GC - 2, GC - 3$ y $GC - 4$, donde en cada grupo se prepararon especímenes cilíndricos de concreto en las edades o días 3, 7, 21 y 28, y los especímenes prismáticos solo para el día 28. Además, cada edad del concreto en días, se tuvieron como mínimo dos especímenes de concreto, que menciona en la normativa, pero en nuestra investigación realizamos con tres especímenes o moldes para cada edad, en especímenes cilíndricos y prismáticos, finalmente realizamos la media aritmética y tuvimos una resistencia promedio. En los ensayos de resistencia a compresión y flexión, aplicados a cada espécimen o muestra de concreto a diferentes edades, fueron sometidos a esfuerzos con el equipo “Prensa hidráulica” para compresión en cilindros de concreto y flexión en vigas prismáticas.

Las muestras del ensayo de resistencia a la flexión se elaboraron paralelamente con las muestras del ensayo de resistencia a la compresión para cada grupo experimental, por lo que se elaboraron tres especímenes cilíndricos para cada edad en los días (3, 7, 14, 28) y tres vigas prismáticas para el día 28, que curados primero y luego fueron llevados al equipo “Prensa hidráulica para flexión de Vigas de Concreto” en la edad que le corresponde para determinar la resistencia a la flexión con cargas a los dos tercios de la longitud de la viga simplemente apoyada a los extremos, para determinar el módulo de ruptura o rotura, este proceso solo se realizó para el día 28, el mismo procedimiento para las probetas cilíndricas; donde finalmente se determinó el promedio aritmético de los resultados de las tres vigas prismáticas al día 28, y tres probetas cilíndricas a los días (3, 7, 14, 28), según lo especificado en la norma ASTM y NTP, donde también se especifica los procedimientos de ensayo que se han detallado.

3.1.2 Alcances de la investigación

A) Tipo de investigación

La investigación fue aplicada, tecnológica o utilitaria, tal como sostienen Patiño et al. (2021, p. 13) en la siguiente afirmación: “Busca conocimientos con fines de aplicación inmediata a la realidad para modificarlo; es decir, presenta solución a problemas prácticos más que formular teorías sobre ellos”.

Porque se determinó la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en la resistencia del concreto, donde utilizamos los conocimientos existentes sobre la resistencia del concreto a compresión y flexión, analizamos las propiedades del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida y sus efectos en la resistencia del concreto. Además, se realizó mediante la normativa y procedimientos establecidos, los ensayos de la resistencia del concreto adicionando grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, de manera práctica y la aplicamos a la realidad, para analizar su influencia en la resistencia de concreto.

B) Nivel de investigación

El nivel de la investigación es explicativo. Ya que, de manera concreta, según Patiño et al (2021) explican lo siguiente:

El científico se preocupa más en buscar las causas o los por qué de la ocurrencia del fenómeno, de cuáles son las variables o características que presenta y de cómo se dan sus interrelaciones. Su objetivo es encontrar las relaciones de causa-efecto que se dan entre los hechos a objeto de conocerlos con mayor profundidad”. (p.14).

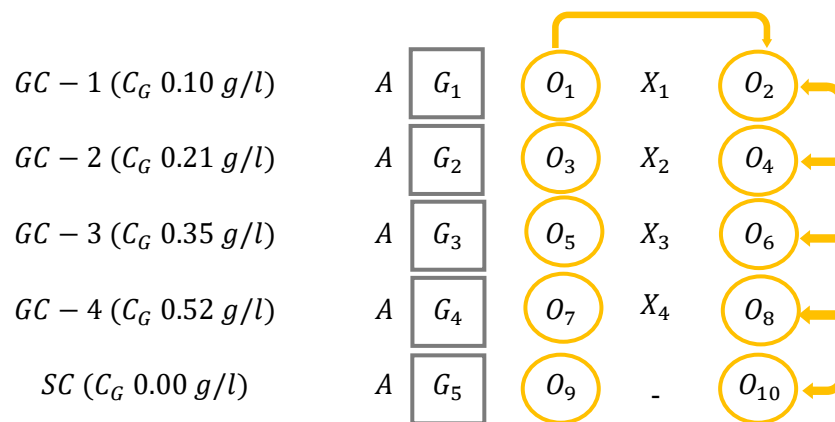
Porque determinamos la adición de grafeno obtenido por la exfoliación en fase líquida en el concreto a diferentes concentraciones y la asociamos respecto al concreto estándar que no tiene adición de grafeno. Explicativo porque su finalidad es buscar las causas y efectos de la aplicación de la variable independiente (Grafeno), como adición en la variable dependiente (resistencia del concreto); es decir, se determinó un estudio de tipo causal, explicando la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en la resistencia del concreto.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental, porque pudimos medir, manipular y administrar un tratamiento a nuestra variable independiente (grafeno), para intervenir, adicionar a diferentes concentraciones y observar cómo influyó en la variable dependiente (resistencia del concreto).

3.2.1 Tipo de diseño de investigación

Es experimental puro, porque tuvimos cuatro grupos experimentales ($GC - 1, GC - 2, GC - 3, GC - 4$) y un grupo de control (SC); además, la variable independiente (grafeno), la elaboramos siguiendo los procedimientos de otras investigaciones y es manipulado intencionalmente, también los grupos son equivalentes, porque utilizamos los mismos materiales para el concreto y aplicamos lo mismos ensayos para la variable dependiente (resistencia del concreto), a excepción de la variable independiente (grafeno) y se eligen de forma aleatoria en la medición del pre test y pos test.



3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población establecida en la presente investigación, estuvo constituida por todos los elementos estructurales elaborados de concreto en la ciudad de Lima - 2021.

3.3.2 Muestra

La muestra fue no probabilística y estratificada, porque seleccionamos por conveniencia un tamaño de 60 unidades de probetas cilíndricas y 15 unidades de vigas prismáticas, probabilísticamente en 5 grupos (SC , $GC - 1$, $GC - 2$, $GC - 3$, $GC - 4$) con 12 unidades en probetas cilíndricas para grupo en los 3, 7 14 y 28 días, y 3 unidades para cada grupo en los 28 días, donde se determinará estadísticamente la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La confiabilidad de las técnicas e instrumentos estuvo verificada por las fichas de registro evaluadas, donde se realizó de acuerdo a un procedimiento estándar y se puede visualizar en el Anexo F y la validez se obtuvo mediante la Ficha de validación por criterio de Expertos, como se puede visualizar en el Anexo B. Las técnicas e instrumentos utilizados en esta investigación para la recolección de datos se realizaron según la figura y se detalla posteriormente.

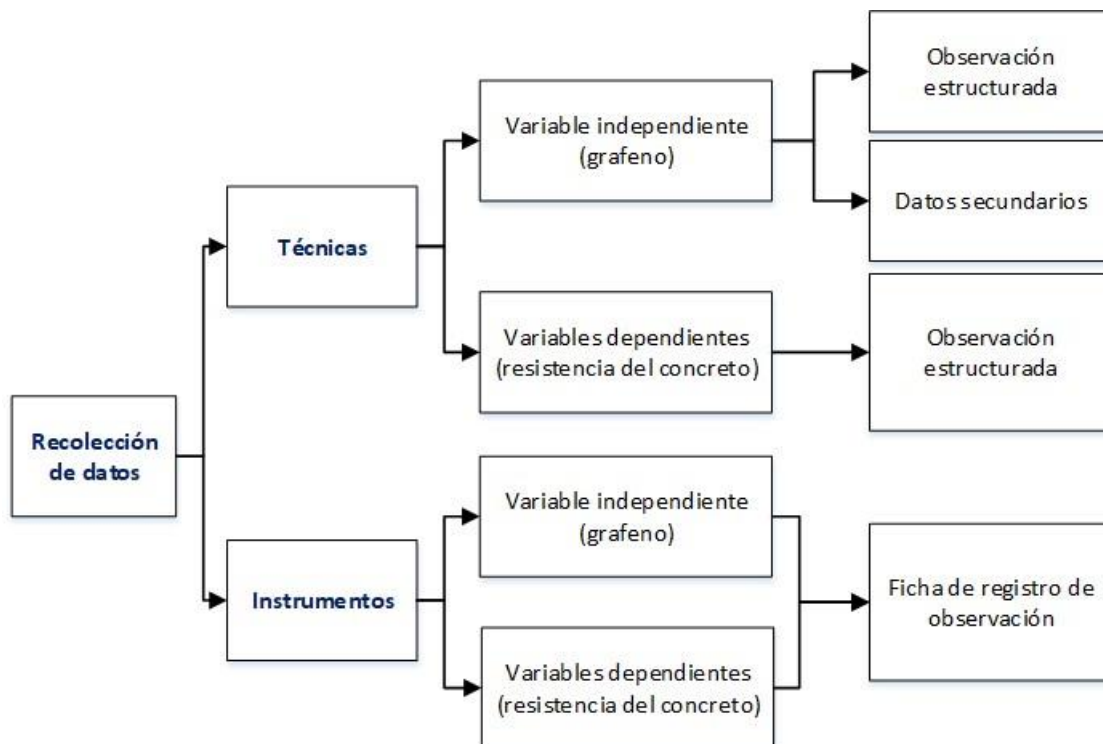


Figura 30. Técnicas e instrumentos desarrollados en la investigación de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en el concreto.

3.4.1 Técnicas utilizadas en la recolección de datos

En la investigación utilizamos la técnica directa de observación estructurada para recolectar datos de la variable independiente (grafeno), para elaborar grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida y también recolectar datos de la variable dependiente (resistencia del concreto), mediante los controles de calidad. Además, utilizamos la técnica indirecta de datos secundarios en la variable independiente (grafeno), para revisar otras investigaciones desarrolladas en la elaboración de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida.

3.4.2 Instrumentos utilizados en la recolección de datos

En la investigación se utilizó el instrumento ficha de registro de observación en la variable independiente (grafeno) para evaluar las características obtenidas por exfoliación en fase líquida con otras investigaciones anteriores y también se utilizó la misma técnica en la variable dependiente (resistencia del concreto) para observar y analizar su comportamiento en el grupo de control y grupos experimentales.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de información

4.1.1 Materiales para el concreto

Para el desarrollo del diseño de mezcla por el método del ACI, para la elaboración de concreto, utilizamos los siguientes materiales, conociendo la ubicación de la cantera para extracción de los agregados gruesos y finos.

4.1.1.1 Cemento

El cemento que utilizamos fue el tipo I de uso general y la marca fue cemento Sol y sus propiedades físicas y químicas (véase Tabla 26 y 27), como se detallan en el Anexo E.

Tabla 20. Propiedades físicas del Cemento Sol - Tipo I

Parámetro	Cantidad	Unidad
Contenido de aire	6.62	%
Expansión autoclave	0.08	%
Superficie específica	336	m ² /kg
Densidad (Peso específico)	3.12	g/ml

Nota: Tomado de Cemento Sol, p. 2, https://www.cementosol.com.pe/img/Ficha_Cemento_Sol.pdf.

Tabla 21. Propiedades químicas del Cemento Sol – Tipo I

Parámetro	Cantidad	Unidad
C_2S	11.9	%
C_3S	54.2	%
C_3A	10.1	%
C_4AF	9.7	%
MgO	2.93	%
SO_3	3.00	%
Pérdida al fuego	2.2	%
Residuo insoluble	0.7	%

Nota: Tomado de Cemento Sol, p. 2, https://www.cementosol.com.pe/img/Ficha_Cemento_Sol.pdf.



Figura 31. Cemento Portland tipo I – cemento Sol.

En la Tabla 27, podemos visualizar las propiedades químicas del cemento Sol de la Figura 31, con estas propiedades pudimos conocer las reacciones químicas que tuvo el grafeno en la fase de hidratación del cemento. Estas características están de acuerdo a la norma NTP 334.009:2011 / ASTM C 150.

4.1.1.2 Agregados

El agregado grueso que utilizamos fue el tamaño máximo nominal de 3/4", ya que según (18), este tamaño está siendo utilizado muy comúnmente para concretos de alta resistencia. El agregado fino también fue de la misma ubicación de la cantera del agregado grueso.



Figura 32. Ubicación de la cantera de agregados en Carabayllo-Lima.

Información de la ubicación de la cantera de Carabayllo – Lima (véase Figura 32).

- Dirección: Av. Trapiche (Ref. 3 cuadras de la Av. San Felipe y Av. Trapiche)
- Distrito: Carabayllo
- Provincia: Lima
- Coordenadas UTM: X: 277081.067; Y: 8684298.654

El agregado grueso obtenido es del tipo piedra chancada (grava) de tamaño máximo nominal, y la extracción del agregado grueso y fino, está de acuerdo a la norma NTP 400.010:2001 / ASTM D 75.



Figura 33. Agregado grueso de 3/4" de tamaño nominal máximo.



Figura 34. Ubicación de la cantera de agregados en Carabayllo-Lima.

4.1.1.3 Agua

El agua para la mezcla que es permitida por la NTP 399.088 / ASTM C 1602 que no requiere ensayar es el agua potable para una mezcla con cemento Portland, que es apto para el consumo humano. Entonces se realizó el diseño de mezcla con la misma cantidad de agua para todos los grupos, donde en cada grupo experimental ($GC - 1, GC - 2, GC - 3, GC - 4$), fueron reemplazados el agua en su totalidad por concentraciones de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida (C_G), obtenida por exfoliación de grafito por cizallamiento, con excepción del grupo de control que es el concreto estándar (SC), que el agua en la mezcla fue el agua potable. Entonces para conocer la cantidad de materiales utilizados, especialmente la cantidad necesaria del agua, realizamos el diseño de mezcla.

4.1.2 Diseño de mezcla por el método ACI

Para la elaboración del concreto utilizamos el método del ACI, pero antes realizamos la caracterización de los agregados y definimos los parámetros de diseño a realizar, como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 22. Parámetros para el diseño de mezcla

$f'c$	210 kg/cm^2	Resistencia especificada a la compresión
Slump	6 pulgadas	Asentamiento o revenimiento
Cemento Sol tipo I	3.12	Densidad o peso específico

En la caracterización de los agregados se realizaron ensayos como la granulometría del agregado fino y grueso con la norma NTP 400.012 / ASTM C 136, el ensayo de peso unitario será de acuerdo con la norma NTP 400.017 / ASTM C 29. Los ensayos para el peso específico y absorción con la norma NTP 400.022 / ASTM C 128 en el agregado fino y NTP 400.021 / ASTM C 127 en el agregado grueso, estos resultados podemos visualizar en la Tabla 29.

Tabla 23. Caracterización de los agregados.

Ensayos		Piedra (Grava)	Arena	Cemento
Tamaño nominal máximo	Tn max.	3/4"	-	-
Peso específico	Pe	2.68	2.76	3.12
Absorción	%Ab	0.80	1.40	
Humedad	%W	0.60	1.30	
Peso unitario compactado	PUS	1547	1579	
Peso unitario suelto	PUC	1651	1831	
Módulo de fineza	MF	6.58	2.96	

Entonces, la curva granulométrica que se utilizó fue con el Huso 67 por el tamaño nominal máximo de 3/4" que estuvimos utilizando, como se muestra en la Tabla 15, donde la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites permisibles según la Figura 35 y 36. Además, necesitamos el volumen del concreto que vamos a necesitar para preparar la mezcla, por lo tanto, tenemos la Tabla 30 donde podemos ver el volumen para las probetas cilíndricas y prismáticas.

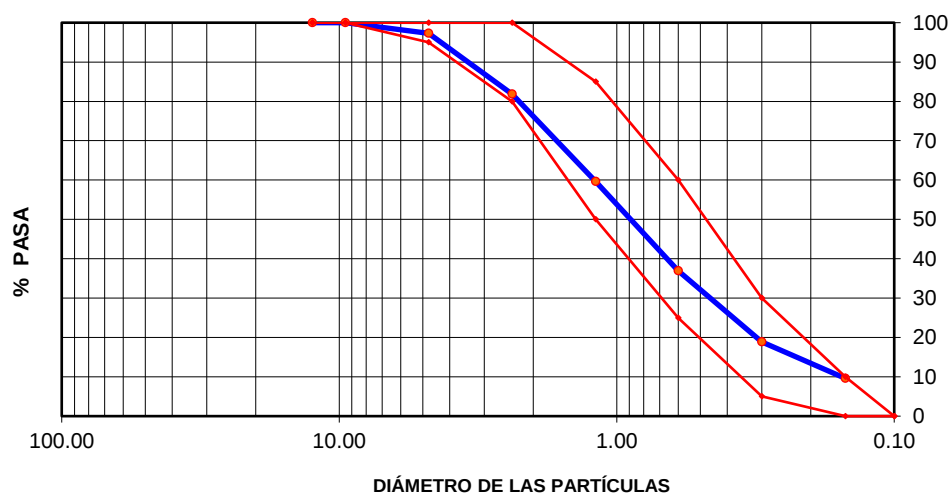


Figura 35. Curva de granulometría del agregado grueso.

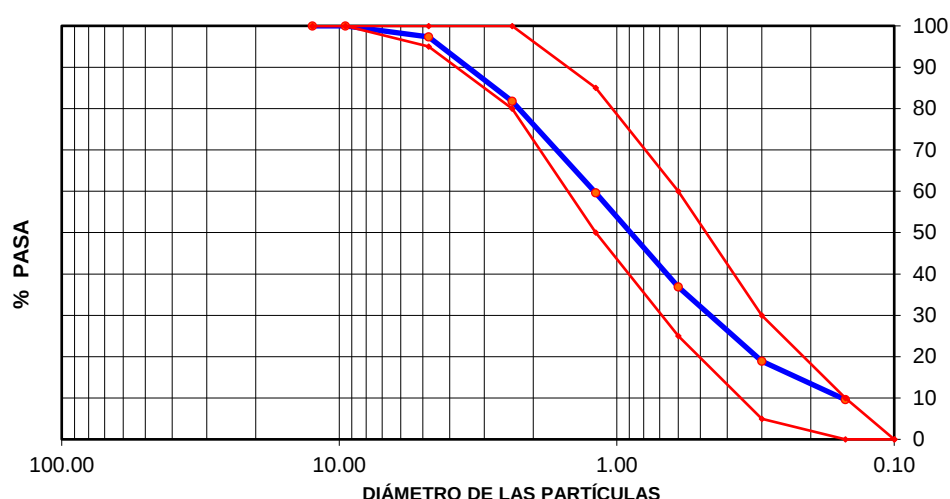


Figura 36. Curva de granulometría del agregado fino.

En la Tabla 30, calculamos el volumen de los especímenes cilíndricos y vigas prismáticas, que son como moldes para elaborar la mezcla de concreto fresco y ser colocados en estos moldes. Se analizó anteriormente, que utilizamos cilindros de concreto o también llamados probetas de concreto de 4×8 pulgadas ó 10×20 cm para la resistencia a compresión y vigas prismáticas de $15 \times 15 \times 50$ cm, para la resistencia a la flexión (módulo de rotura). Entonces, el volumen obtenido para una unidad de probeta de concreto cilíndrico es de 0.0016 m^3 y en una unidad de viga de concreto 0.0113 m^3 . En la Tabla 31, calculamos la cantidad que necesitamos por grupo de ensayo y luego se multiplicó el volumen de una unidad de cilindro y viga, para poder determinar que volumen de concreto requerimos para los ensayos y consecuentemente la cantidad de material que requerimos, que resultó del diseño de mezcla. Estas dimensiones deben estar de acuerdo a la normativa NTP 339.034:2015 / ASTM C 39 y la NTP 339.078:2012 / ASTM C 78, para probetas cilíndricas y vigas, respectivamente.

Tabla 24. Dimensiones de los especímenes o moldes para ensayos de resistencia.

Volumen de un espécimen cilíndrico (4" x 8")		Volumen de un espécimen prismático (0.15 x 0.15 x 0.50 m)	
Diámetro	4" (10 cm)	Altura	0.15 m
Altura	8" (20 cm)	Ancho	0.15 m
Área transversal	0.0081 m^2	Longitud	0.50 m
Volumen	0.0016 m^3	Volumen	0.113 m^3

Tabla 25. Volumen de concreto por grupo.

Cantidad y volumen de cilindros por grupo					
Edad (días)	CS	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
3	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
7	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
14	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
28	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Cantidad (und)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Volumen de un cilindro (m ³)	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
Volumen de los cilindros por grupo (m³) (A)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Cantidad y volumen de vigas por grupo					
Edad (días)	CS	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
28	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Cantidad (und)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Volumen de una viga (m ³)	0.0113	0.0113	0.0113	0.0113	0.0113
Volumen de las vigas por grupo (m³) (B)	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
TOTAL DE VOLUMEN POR GRUPO					
Volumen total por grupo (A)+(B)	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054

En la elaboración del concreto siempre tenemos desperdicios, y para determinar la cantidad de materiales (cemento, agua y agregados) requerimos multiplicar por un 20% más de desperdicios al volumen total por grupo que obtuvimos (0.054 m^3), teniendo un resultado de (0.065 m^3). Entonces, con este valor que está incluido los desperdicios, elaboramos el diseño de mezcla por método ACI, utilizando las Tablas 19, 20 y 21, que están detallados en el ACI 211.1-91 y el ACI 211.3R-97. El diseño de mezcla por el método ACI, lo podemos visualizar en la Tabla 32, que se realizó con las caracterizaciones del agregado de la Tabla 29, donde se realizó los cálculos e interpolaciones para determinar la cantidad de los materiales. Entonces, el material necesario para la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida está en función a la cantidad de agua, para que se pueda reemplazar en el concreto y tener los grupos experimentales. Además, debemos saber que en un diseño de mezcla, colocamos y asumimos ($1 \text{ l} = 1 \text{ kg}$); es decir, peso específico del agua 1000 kg/m^3 , y esta información la utilizamos para producir grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida para su adición en el concreto.

Diseño de mezcla por el método ACI	DISEÑO ESTÁTICO					DISEÑO DINÁMICO				
	Peso inicial (kg)	Peso específico (g/cm³)	Volumen 1 (m³)	Reducción unitaria	Peso final (kg)	Reducción unitaria	Cantidad por bolsa de cemento (kg)	Cantidad por 1 m3 (kg/m³)	Grupos SC, GC-1, GC-2, GC-3, GC-4	
									Volumen por grupo (m3)	Cantidad por grupo (kg)
Relación agua/cemento (w/c) = 0.64										
Cemento	336.40	3.12	0.108	1.000	336.40	1.000	42.50	336.4	0.065	21.9
Agua	212.33	1.00	0.212	0.631	215.12	0.652	27.71	215.1	0.065	14.0
Piedra	997.20	2.68	0.372	3.040	1,003.20	3.058	126.74	1,003.2	0.065	65.2
Arena	794.22	2.76	0.288	2.490	804.54	2.509	101.64	804.5	0.065	53.3
%Aire	2.00%	-	0.020	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 26. Diseño de mezcla por el método ACI, cálculos y correcciones.

Cálculo de agua =		206.67 L	Cálculo de cemento =		369.18 kg	Cálculo de Piedra =		327.40 kg	Correcciones	
Slump	Tn max		f'c	sin		Dmax	MF		Piedra	1003.19 kg
4	205		200	0.70		3/4"	2.96		Arena	823.10 kg
6	H2O	H2O = 212.33	243	a/c	a/c = 0.63	De la Tabla 21:			H2O	213.89 lt
7	216		250	0.62		(Piedra = PUC x b/bo)		b/bo = 0.604		
						2.80	2.96	3.00		
						0.62	b/bo	0.60		

4.1.3 Elaboración y producción de grafeno por exfoliación en fase líquida

En la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, tenemos como material principal el grafito en polvo ($< 20 \mu\text{m}$), solicitado a Sigma Aldrich según se detalla en el Anexo C.

Tabla 27. Especificaciones del grafito de Sigma Aldrich.

Nombre de producto	Grafito en polvo (graphite powder), $< 20 \mu\text{m}$, sintético
Fórmula química	C
Peso de la fórmula	12.01 g/mol
Humedad	0.80
Tamaño	$\leq 20 \text{ micrómetros}$
Código de producto	282863
Apariencia (Color)	Gris oscuro a negro
Apariencia (Forma)	Polvo (powder)

Nota: Tomado de Sigma Aldrich, <https://www.sigmaaldrich.com/PE/es/product/aldrich/282863>



Figura 37. Grafito en polvo.

En la Tabla 33, podemos visualizar algunas características principales del grafito, especialmente su fórmula química que es toda su composición de carbono (C), y también en la Figura 37, donde se observa el grafito que se utilizó para la investigación,

donde (3), también se utilizó para producir grafeno. Entonces, realizado el diseño de mezcla pudimos saber las cantidades de materiales, principalmente el agua que fueron 14 l para los cinco grupos (*SC*, *GC* – 1, *GC* – 2, *GC* – 3 y *GC* – 4), obteniendo una cantidad de 56 litros de agua para diferentes concentraciones de grafeno, excluyendo el concreto estándar (*SC*) que no se adicionó grafeno por exfoliación en fase líquida, porque es el grupo de control.

Entonces, para producir grafeno por exfoliación en fase líquida, debemos conocer la cantidad de grafito para su exfoliación y se realizó según la Tabla 34 (4), donde proporcionó los parámetros para realizar la exfoliación de grafito en agua y utilizó como agente exfoliante el colato de sodio, pero nosotros utilizamos el alcohol polivinílico (PVA), que según (3), es un polímero que también es un agente exfoliante estabilizador.

Tabla 28. Materiales para la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida.

Input materials			Blending parameters		Final concentration
Graphite/water ratio	Sodium Cholate/water ratio	Graphite/sodium cholate ratio	Blending time	Blending speed	Few layer graphene/water
50 g/L	10 g/L	5:1	2h	5000 rpm	2.4 g/L
25 g/L	5 g/L	5:1	2h	5000 rpm	0.9 g/L
12.5 g/L	2.5 g/L	5:1	2h	5000 rpm	0.6 g/L
6.25 g/L	1.25 g/L	5:1	2h	5000 rpm	0.3 g/L

Nota: Tomado de Dimitar Dimov, Iddo Amit, Olivies Gorrie, Matthew Barnes y et al. (Supporting Information), 2018, p. 2.

Tabla 29. Especificaciones de polímero alcohol polivinílico.

Parámetro	Especificaciones	Resultado
Cenizas [Na_2O] (%)	0.50 máx.	0.43
Grado de hidrólisis (%)	87.00 – 89.00	88.65
Metanol (%)	0.90 máx.	0.58
pH [sol.4%]	45.00 – 55.00	5.30
VOC	1.00 máx.	0.63
Viscosidad Brookfield [sol.4%] (cps)	45.00 – 55.00	50.60
Volátiles [1h/105° C] (%)	5.00 máx.	3.92

El polímero PVA, que utilizamos se detalla en el Anexo D y en la Tabla 35, donde se muestra las características químicas en solución, utilizado como estabilizador en la exfoliación con grafeno; según (22) el polímero recubre las láminas de grafeno durante

el proceso de mezcla de la solución. Entonces, también debemos conocer la cantidad de alcohol polivinílico que utilizamos para la exfoliación de grafeno y lo realizamos también de acuerdo a la Tabla 34.

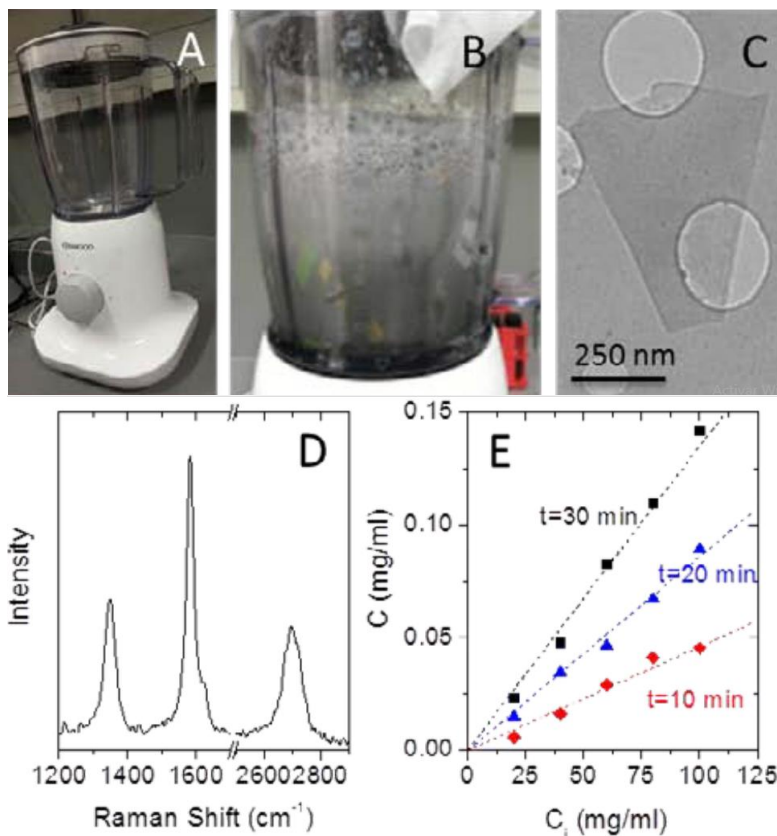


Figura 38. A) Licuadora Kenwood para la exfoliación por cizallamiento de grafito. B) Proceso de mezcla usando detergente doméstico. C) Una imagen TEM de una escama de grafeno producida por exfoliación por cizallamiento en una licuadora. D) Espectroscopia Raman típica de grafeno exfoliado. E) Concentración de grafeno exfoliado vs concentración de grafito para tres tiempos de mezcla diferentes. Tomado de “Scalable production of large quantities of defect-free few layer Graphene by shear-exfoliation in liquids” Supplementary Information, por Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, p. 50.

La mezcla se realizó con un cuchillo doméstico como un instrumento de corte o cizallamiento, ya que según la exfoliación por cizallamiento del grafito no se limita a un tipo de mezclador específico y que puede ser con un mezclador crudo como son las cuchillas (*blades*) de la licuadora doméstica, como se puede visualizar en la Figura 38 (3). Se puede visualizar con imágenes de microscopía electrónica de transmisión (TEM), y espectroscopia Raman que confirman que se puede producir grafeno, pero determinar la concentración de grafeno exfoliado, puede ser difícil debido a la base de la licuadora, que ocasiona desperdicios, para pesar el grafito no exfoliado y no se puede obtener el peso exacto al medir en una balanza de precisión (3). Entonces, ensamblamos la cuchilla de una licuadora doméstica con un taladro Bosch (véase Figura 39), de manera que la cuchilla se

encuentre en suspensión y permita al grafito no exfoliado (grafito final), sedimentarse en la base del recipiente para que se pueda medir el peso y conocer la concentración de grafeno exfoliado por la diferencia con el grafito inicial que se agregó a la mezcla.



Figura 39. Taladro Bosch y cuchilla doméstica de licuadora para la exfoliación del grafito por cizallamiento.

En la Figura 39 podemos visualizar el taladro que tienen características similares en potencia con respecto a una licuadora doméstica, pero también tenemos que conocer el volumen de agua para la exfoliación de grafito. El número de Reynolds (Re) asociado con una cuchilla (*blade*) giratoria es la siguiente ecuación 23 (3).

$$Re_{blade} = ND^2\rho/n \quad \text{Ecuación 23 (3).}$$

Donde: $(\text{Densidad del líquido}) \rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
 $(\text{Viscosidad de líquido}) n = 0.001 \text{ Pa s}$

$N = \text{máximo valor en una licuadora Kenwood, } 18 \text{ krpm}$

$D = \text{Diámetro de la cuchilla giratoria}$

Cuando el valor de N está en su máximo valor para una licuadora Kenwood (18 krpm), entonces sería el resultado de la ecuación 24:

$$Re_{blade} = 10^6 \quad \text{Ecuación 24 (3).}$$

El valor de la ecuación 24 está muy por encima de $Re_{(blade)} \sim 10^4$, donde la turbulencia se desarrolla por completo y el número de Reynolds mínimo para una mezcla por cizallamiento, se ha desarrollado muchas ecuaciones y cálculos, obteniendo la Figura 40, que realizó con un máquina Silverson para el cizallamiento, pero también este valor lo aplica para el cizallamiento con una licuadora (3).

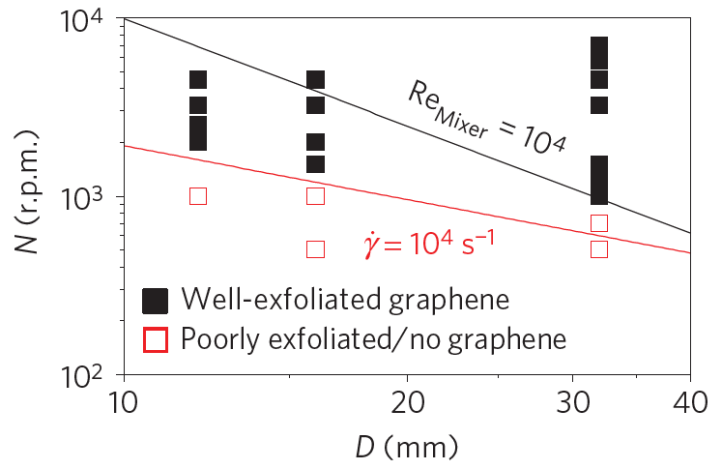


Figura 40. La región encima de la línea negra representa turbulencia ($Re > 10^4$), mientras que la región de la línea roja representa un mínimo de $\dot{\gamma}_{min} > 10^4 s^{-1}$. Tomado de “Scalable production of large quantities of defect-free few layer Graphene by shear-exfoliation in liquids”, por Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varrla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, p. 3.

Entonces, de la ecuación 24, el movimiento turbulento resulta una fuerte variación espacial y temporal de la tasa de cizallamiento local. Sin embargo, la tasa media de cizallamiento turbulento está controlado por la tasa de disipación de energía (por unidad de masa), ε (3).

$$\dot{\gamma}_t = \sqrt{\varepsilon \rho / \eta} \quad \text{Ecuación 25 (3).}$$

Donde: $\dot{\gamma}_t$ = tasa media de cizallamiento
 ε = tasa de disipación de energía por unidad de masa

Asumiendo, que toda la potencia introducida (P) se disipa a través de la turbulencia, es decir ($\varepsilon \approx P / \rho V$), podemos reemplazar en la ecuación 25, obteniendo la ecuación 26 (3).

$$\dot{\gamma}_t \approx \sqrt{P / \eta V} \quad \text{Ecuación 26 (3).}$$

Donde: V = Volumen del agua
 P = Potencia

Entonces, debemos usar la ecuación 26, para determinar que excederá la tasa de cizallamiento mínima de $\dot{\gamma}_{min} \approx 10^4 S^{-1}$, y así producirá grafeno cuando la densidad de potencia sea mayor que aproximadamente la ecuación 27, que es fácilmente alcanzable en licuadoras de cocina (3).

$$\frac{P}{V} \sim \frac{100 W}{l} \quad \text{Ecuación 27 (3).}$$

Donde: $V = \text{Volumen del agua en litros (l)}$
 $P = \text{Potencia en Watts (W)}$

La ecuación 27, nos permite establecer un parámetro muy importante respecto al volumen de agua que utilizamos, la potencia del taladro Bosch y velocidad giratoria (*rpm*), que debemos tener para efectuar las ecuaciones. Entonces, el taladro Bosch tiene una potencia de 750 W, velocidad de 3250 *rpm*, volumen de agua es de 6 l y las cuchillas de una licuadora tiene varios diámetros que depende de la capacidad y marca de licuadora, pero nosotros tenemos una cuchilla de 5 cm de diámetro (véase Figura 39). Obteniendo todos estos parámetros de los instrumentos y equipos que utilizamos para la exfoliación de grafito por cizallamiento para obtener grafeno por exfoliación en fase líquida, desarrollamos los cálculos con las ecuaciones 23, 26 y 27.

$$\text{De la ecuación 23; } Re_{blade} = \frac{ND^2\rho}{n} = \frac{3250 \text{ rpm} \times (0.05 \text{ m})^2 \times 1000 \text{ Kg/m}^3}{0.001 \text{ Pa s}}$$

$$Re_{blade} = \frac{3250 \left(\frac{1}{60 \text{ s}}\right) \times (0.05 \text{ m})^2 \times 1000 \text{ Kg/m}^3}{0.001 \text{ kg/m s}}$$

$$Re_{blade} = \frac{54.17 \text{ s}^{-1} \times 2.5 \text{ Kg/m}}{0.001 \text{ kg/m s}}$$

$$Re_{blade} = 13.54 \times 10^4 > 10^4 \text{ (Reynolds mínimo para cizallamiento)}$$

$$\text{De la ecuación 26; } \dot{\gamma}_t \approx \sqrt{\frac{P}{Vn}} \approx \sqrt{\frac{750 \text{ W}}{6 \text{ l} \times 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ s}}} \approx \sqrt{\frac{750 \text{ W}}{0.006 \text{ m}^3 \times 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ s}}}$$

$$\dot{\gamma}_t \approx 1.118 \times 10^4 \text{ s}^{-1} > 10^4 \text{ s}^{-1} \text{ (tasa de cizallamiento mínimo)}$$

$$\text{De la ecuación 27; } \frac{P}{V} \sim \frac{100 W}{l}$$

$$\text{De la ecuación 27; } \frac{P}{V} = \frac{750 \text{ W}}{6 \text{ l}}$$

$$\text{De la ecuación 27; } \frac{P}{V} \sim 125 \text{ W/l} > 100 \text{ W/l (densidad de potencia mínimo)}$$

Los resultados obtenidos de las ecuaciones 23, 26 y 27, es factible matemáticamente que se puede preparar grafeno con esos parámetros y el tiempo de mezcla para la exfoliación del grafito es importante y realizamos de acuerdo a la Figura 41, donde se muestra una ecuación lineal de la concentración de grafeno producido en función del tiempo de mezcla, y nosotros logramos maximizar la producción de grafeno y lo realizamos en un tiempo de 90 minutos de mezclado.

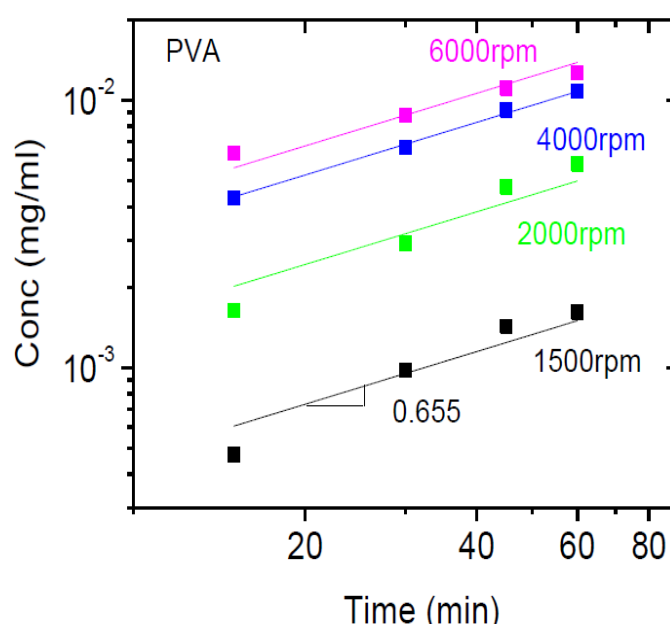


Figura 41. Concentración de grafeno v/s tiempo de mezcla, utilizando PVA. Tomado de “Scalable production of large quantities of defect-free few layer Graphene by shear-exfoliation in liquids” Supplementary Information, por Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, p. 50.

Entonces, definido los parámetros realizamos la mezcla, ahora definimos la cantidad de grafito inicial para agregar a la mezcla que lo denominamos la concentración de grafito inicial (C_i) y lo realizamos de acuerdo a (4), con la Tabla 34 y obtenemos la Tabla 36, donde podemos observar que vamos a agregar C_i (1.50 g/l, 5.00 g/l, 8.50 g/l, 12.00 g/l) en agua, tiempo de 90 minutos, velocidad de 3250 rpm, para obtener una concentración de grafeno para cada grupo experimental GC – 1, GC – 2, GC – 3 y GC – 4) y el grupo de control (SC).

Tabla 30. Parámetros y las proporciones de materiales para la mezcla.

Materiales			Parámetros de mezcla		Concentración de grafeno/agua (C_G)
Grafito/Agua (g/l)	PVA/Agua (g/l)	Proporción Grafito: PVA	Tiempo de mezcla	Velocidad de mezcla	
-	-	-	-	-	SC
1.50	0.30	5:1	90 min	3250 rpm	GC-1
5.00	1.00	5:1	90 min	3250 rpm	GC-2
8.50	1.70	5:1	90 min	3250 rpm	GC-3
12.00	2.40	5:1	90 min	3250 rpm	GC-4

Nota: Grupo de control (SC) y grupos experimentales (GC-1, GC-2, GC-3, GC-4).

Además, debemos recordar que de la Tabla 32, del diseño de mezcla obtuvimos agua en una cantidad de 14 l, para cada grupo experimental y de control que se utilizó. Sin embargo, nosotros pudimos realizar tres procesos de mezclado de 5 l para cada grupo experimental, pero, al finalizar el proceso de mezclado y al momento de retirar el grafito no exfoliado o grafito sedimentado, que lo denominamos grafito final (C_f) que se obtiene al final de la exfoliación y utilizamos agua adicional del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, para remover el grafito sedimentado o grafito final que está en la base del recipiente (3),(4). Esto nos permitió evitar el desperdicio y tener un peso real del grafito final (C_f). Entonces, al utilizar agua adicional del grafeno exfoliado, realizamos con una cantidad de 6 l, donde ya se realizó los cálculos de las ecuaciones proporcionadas por (3) y nos permitió garantizar que vamos a obtener grafeno.

Tabla 31. Cantidad total de material por cada grupo de ensayo.

Grupo de ensayo	Total agua (l)	Total Grafito (g)	Total PVA (g)	Total Grafito/Agua (g/l)	Total PVA/Agua (g/l)
SC	14.00	-	-	-	-
GC-1	18.00	27.00	5.40	1.50	0.30
GC-2	18.00	90.00	18.00	5.00	1.00
GC-3	18.00	153.00	30.60	8.50	1.70
GC-4	18.00	216.00	43.20	12.00	2.40

En la Tabla 37, es la cantidad para el total de materiales que utilizamos para cada grupo experimental y de control, pero lo realizamos en tres procesos o preparaciones, como se muestra en Tabla 38, donde agregamos las concentraciones de grafito inicial, agua y PVA. En el proceso de mezclado que realizamos, por 90 minutos tuvimos una espuma generada, posiblemente por el PVA que actuó como estabilizador y que se puede ver en la Figura 42.



Figura 42. Espuma generada después del mezclado.

Tabla 32. Las tres preparaciones de mezcla para medir la cantidad de grafito sedimentado después del mezclado.

GRAFENO OBTENIDO POR EXFOLIA- CIÓN EN FASE LÍQUIDA	Materiales para el mezclado para agregar Grafito Inicial (C_i)						Después del proceso de mezclado				
	GRUPOS DE ENSAYO	Materiales iniciales					Grafito sedimentado				
		agua (l)	Grafito inicial (g)	PVA (g)	Tiempo de mezcla	Velocidad de mezcla	Grafito sedimentado (inc. Peso de vaso) (g)	Agua adicional (g)	Grafito sedimentado + agua adicional (g)	Vaso de precipitado (g)	Grafito sedimentado (inc. Agua adicional) (g)
			(X)				(A)	(B)	(C=B+A)	(D)	(E=C-D)
Primer mezclado	GC-1	6.00	9.00	1.80	75 min	3250 rpm	47.01	60.00	107.01	98.16	8.85
	GC-2	6.00	30.00	6.00	75 min	3250 rpm	94.46	80.00	174.46	98.16	76.30
	GC-3	6.00	51.00	10.20	75 min	3250 rpm	294.18	110.00	404.18	298.43	105.75
	GC-4	6.00	72.00	14.40	75 min	3250 rpm	343.46	130.00	473.46	298.43	175.03
Segundo mezclado	GC-1	6.00	9.00	1.80	75 min	3250 rpm	65.22	60.00	125.22	98.16	27.06
	GC-2	6.00	30.00	6.00	75 min	3250 rpm	86.16	80.00	166.16	98.16	68.00
	GC-3	6.00	51.00	10.20	75 min	3250 rpm	249.58	110.00	359.58	298.43	61.15
	GC-4	6.00	72.00	14.40	75 min	3250 rpm	308.32	130.00	438.32	298.43	139.89
Tercer mezcla- do	GC-1	6.00	9.00	1.80	75 min	3250 rpm	54.17	60.00	114.17	98.16	16.01
	GC-2	6.00	30.00	6.00	75 min	3250 rpm	108.23	80.00	188.23	98.16	90.07
	GC-3	6.00	51.00	10.20	75 min	3250 rpm	306.81	110.00	416.81	298.43	118.38
	GC-4	6.00	72.00	14.40	75 min	3250 rpm	321.59	130.00	451.59	298.43	153.16

Tabla 33. Determinando la concentración de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida por la exfoliación de grafito por cizallamiento.

GRU- POS DE ENSA YO	Grafito sedimentado					Grafito final				Cálculo de la concentración de grafeno/agua (C_G)					
	Grafito sedimentado (inc. Peso de vaso) (g)	Agua adicional (g)	Grafito sedimentado + agua adicional (g)	Vaso de precipitado (g)	Grafito sedimentado (inc. Agua adicional) (g)	Grafito final + peso de vaso (g)	Vaso de precipitado (g)	Grafito final (g)	Agua evaporada (g)	Grafito inicial (g)	Grafito final (g)	Volumen de agua neta (VN= agua inicial- Σ B-I)		grafito exfoliado ~Grafeno (g)	Concentración grafeno/agua
	(ΣA)	(ΣB)	$(C=\Sigma B+\Sigma A)$	(D)	$(E=C-D)$	(F)	(G)	$(H=F-G)$	$(I=E-H)$	(X)	$(Y=H)$			$(X-Y)$	$(X-Y)/VN$
												(g)	(l)		
GC-1	166.40	180.00	346.40	98.16	248.24	123.33	98.16	25.17	223.07	27.00	25.17	17,596.93	17.60	1.83	0.1040
GC-2	288.85	240.00	528.85	98.16	430.69	184.47	98.16	86.31	344.38	90.00	86.31	17,415.62	17.42	3.69	0.2119
GC-3	850.57	330.00	1,180.57	298.43	882.14	445.45	298.43	147.02	735.12	153.00	147.02	16,934.88	16.93	5.98	0.3531
GC-4	973.37	390.00	1,363.37	298.43	1,064.94	505.68	298.43	207.25	857.69	216.00	207.25	16,752.31	16.75	8.75	0.5223

Tabla 34. Concentraciones de grafeno/agua (exfoliación en fase líquida) obtenida

Materiales			Parámetros de mezcla		Grupo de concentraciones grafeno/agua (C_G)	Concentración grafeno/agua (X-Y)/VN
Grafito/Agua (g/l)	PVA/Agua (g/l)	Proporción Grafito: PVA	Tiempo de mezcla	Velocidad de mezcla		
-	-	-	-	-	SC	0.00
1.50	0.30	5:1	90 min	3250 rpm	GC-1	~0.10
5.00	1.00	5:1	90 min	3250 rpm	GC-2	~0.21
8.50	1.70	5:1	90 min	3250 rpm	GC-3	~0.35
12.00	2.40	5:1	90 min	3250 rpm	GC-4	~0.52

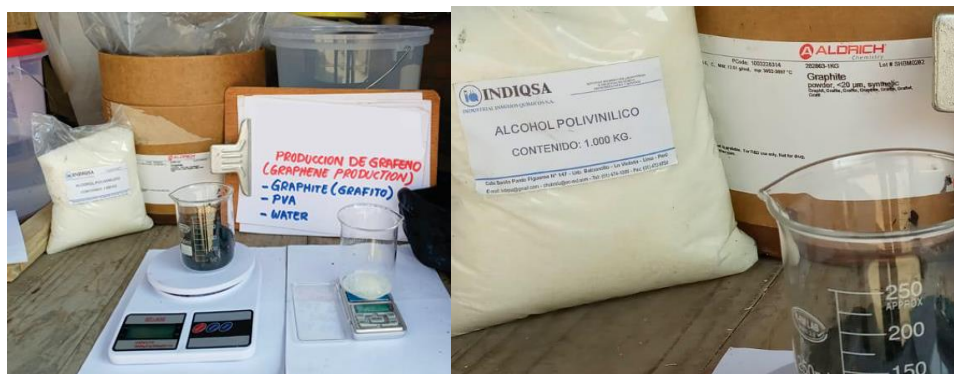


Figura 43. Medición de peso de los materiales para la producción de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida mediante la exfoliación del grafito por cizallamiento.

En la Figura 43, realizamos la medición de todos los pesos con una balanza de precisión, para realizar la producción de grafeno, según se detalla en la Tabla 38 y desde la finalización del proceso de mezclado por 90 minutos, lo dejamos en reposo estático por 5 días para decantar el líquido por acción de la gravedad y el grafito se pueda sedimentar como indica la columna de “grafito sedimentado” en las Tablas 38 y 39. Al finalizar los 5 días, el grafito exfoliado se vierte en otro recipiente para separar el grafito sedimentado y el grafeno en suspensión (véase Figura 44).

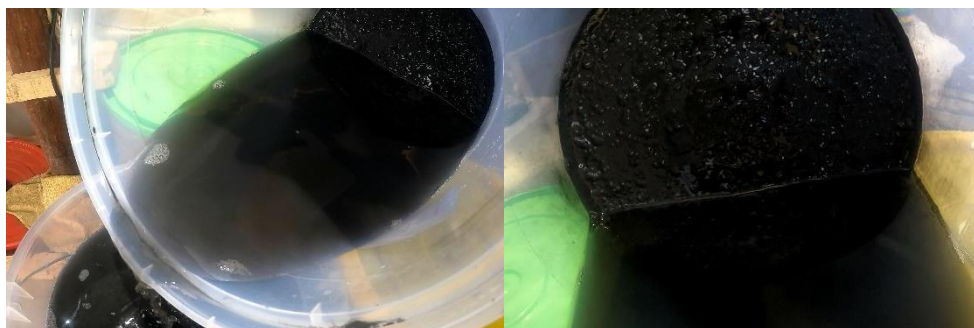


Figura 44. Separación del grafeno exfoliado por cizallamiento del grafito sedimentado por acción de la gravedad, después de 5 días estático del recipiente con la mezcla.

Sin embargo, al momento de retirar el grafito sedimentado se tiene la dificultad de remover, debido a esto utilizamos una pequeña cantidad de agua adicional del grafeno suspendido; es decir, el líquido que se está vertiendo (véase Figura 44), y este “agua adicional” lo podemos observar en la Tabla 38 y 39. Entonces, en la Figura 45 se puede visualizar, que se tiene la dificultad de retirar el grafito de la base y agregando agua adicional evitamos desperdicios y la medición del peso del grafito final pueda ser más exacto, al retirar el grafito sedimentado se coloca en unos vasos de precipitado para luego medir el peso del grafito sedimentado.



Figura 45. Medición del grafito sedimentado después de la mezcla.

Después de la medición del peso, el grafito sedimentado se calienta en un horno de cocina para eliminar el contenido de agua y obtener el grafito final como se detalla en la Tabla 38 y 39. Finalizando este procedimiento, se procede a dejar en un ambiente cerrado en un tiempo de 2 días, hasta eliminar posiblemente moléculas de agua restantes. En la Figura 46, se visualiza el grafito final, obtenido después de la eliminación de las moléculas de agua, que contenía el grafito sedimentado de la Figura 45.



Figura 46. Grafito final, después de eliminar el agua del grafito sedimentado.

Posteriormente, después de la medición del grafito final con balanzas de precisión pudimos obtener las cantidades exactas de la concentración de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida (véase Tabla 40). El grafeno obtenido se puede visualizar en la Figura 47.



Figura 47. Recipiente con grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida mediante la exfoliación de grafito por cizallamiento

4.1.4 Elaboración de la mezcla de concreto para ensayos de resistencia.

Las concentraciones de grafeno para los grupos experimentales $GC - 1$ (C_G 0.10 g/l), $GC - 2$ (C_G 0.21 g/l), $GC - 3$ (C_G 0.35 g/l) y $GC - 4$ (C_G 0.52 g/l), se adicionan en mezclas de concreto reemplazando la totalidad del agua (14 l), con excepción de SC (C_G 0.00 g/l) que es con agua sin concentración de grafeno.

Tabla 35. Proporciones de materiales para la elaboración de mezclas de concreto.

Grupo	Cemento portland tipo I	Agregado fino (Arena)	Agregado grueso (Piedra)	Agua	Concentración de grafeno/agua
	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(l)	(Kg)
SC	21.9	53.3	65.2	14.0	0.00
GC-1	21.9	53.3	65.2	14.0	0.10
GC-2	21.9	53.3	65.2	14.0	0.21
GC-3	21.9	53.3	65.2	14.0	0.35
GC-4	21.9	53.3	65.2	14.0	0.52

En la Tabla 41, podemos observar las proporciones de los materiales obtenidas del diseño de mezcla del concreto de la Tabla 32 y la elaboración del grafeno con las Tablas 38, 39 y 40, por lo que empezamos a elaborar la mezcla de concreto y su colocación en los moldes de especímenes cilíndricos y vigas, como se puede visualizar en la Figura 48.



Figura 48. Elaboración de mezclas de concreto en vigas prismáticas y probetas cilíndricas.

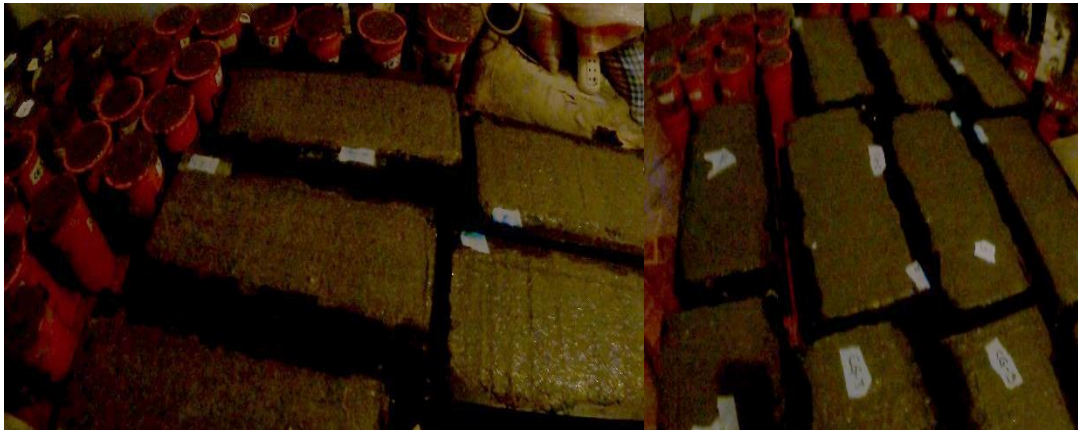


Figura 49. Elaboración de mezclas de concreto en vigas prismáticas y probetas cilíndricas.

La elaboración del concreto está de acuerdo con la normativa NTP y ASTM, donde se elaboraron 15 probetas cilíndricas y 3 vigas prismáticas para cada grupo, para realizar los ensayos de resistencia en edades 3, 7, 14 y 28 días. En la Figura 49, podemos observar las mezclas en los moldes respectivos de los grupos experimentales y grupo de control, después de 24 horas se desencofran de los moldes cilíndricos y prismáticos, para pasar por el proceso de curado, como se visualiza en la Figura 50.



Figura 50. Curado y desencofrado de los especímenes cilíndricos y prismáticos.

Entonces, con las muestras desencofradas, estos especímenes cilíndricos fueron ensayados en los días 3, 7, 14 y 28 para determinar su resistencia y en el caso de las vigas prismáticas sólo a los 28 días. Además, se realizaron ensayos de resistencia para tres unidades individuales por cada grupo y obtener un promedio aritmético. Los resultados de la resistencia a compresión, se muestran en la Tabla 42, donde visualizamos las tres unidades de resistencias por grupo y para cada edad. Las cargas que obtuvimos mediante el ensayo de resistencia a compresión con la prensa hidráulica están en (kg), esto se puede visualizar en la Figura 51 que son algunas de probetas cilíndricas ensayadas.

Tabla 36. Resultados en carga axial del ensayo de resistencia a compresión (kg).

Edad	SC (0.00 g/l)	GC-1 (0.10 g/l)	GC-2 (0.21 g/l)	GC-3 (0.35 g/l)	GC-4 (0.52 g/l)
3 días	13,470	13,530	14,580	14,510	15,030
	13,560	14,230	14,240	13,890	14,830
	13,790	13,810	13,770	13,880	14,190
7 días	17,060	18,480	17,360	18,240	18,270
	17,420	17,780	17,120	18,340	18,500
	17,850	17,920	17,970	18,040	18,630
14 días	18,790	19,180	19,980	19,760	20,790
	19,120	19,440	19,050	20,620	20,380
	18,890	19,420	19,730	19,840	21,060
28 días	20,710	21,740	21,540	21,720	21,420
	20,960	20,820	21,120	21,320	22,540
	20,050	21,020	21,780	21,960	21,990



Figura 51. Ensayo de resistencia a compresión.

Las probetas cilíndricas son de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, y realizamos el cálculo del área del cilindro y utilizando la ecuación 28, obteniendo esfuerzo a la compresión en kg/cm^2 que especifica en la norma NTP 339.034 / ASTM C 39, o también denominado resistencia real a la compresión del concreto (f_c) (18).

$$\text{Esfuerzo } (\sigma), \text{ resistencia real } (f_c) = \frac{\text{Carga (kg)}}{\text{Área (cm}^2\text{)}} \quad \text{Ecuación 28.}$$

$$\text{Módulo de rotura } (f_r) = \frac{PL}{bh^2} \quad \text{Ecuación 29.}$$

En la Tabla 43, se puede observar todas las resistencias reales a la compresión del concreto (f_c) de los grupos experimentales y grupo de control, donde realizamos la comprobación del coeficiente de variación (V), desviación estándar (s) y su rango aceptable (%). Además, según la norma NTP 339.034 / ASTM C 39, que se visualiza en la Tabla 17, indica que para cilindros de $10 \times 20 \text{ cm}$, la resistencia de tres cilindros individuales su rango aceptable o dispersión debe ser máximo el 10.60% y el coeficiente de variación en 3.2%.

Entonces, de acuerdo a los cálculos realizados en la Tabla 43, confirmamos la precisión de nuestros resultados de los ensayos de resistencia a la compresión, que están dentro de los 10.60% de dispersión para todos los grupos $GC - 1$ (C_G 0.10 g/l), $GC - 2$ (C_G 0.21 g/l), $GC - 3$ (C_G 0.35 g/l), $GC - 4$ (C_G 0.52 g/l) y SC (C_G 0.00 g/l) y para todas las edades del concreto (3, 7, 14 y 28 d). En la Figura 52, se observa un modelo gráfico del ensayo de la resistencia a la compresión, siguiendo los procedimientos de la normativa NTP 339.034 / ASTM C 39.

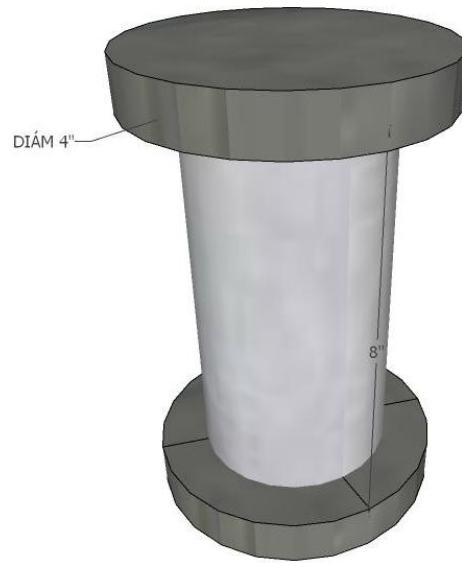


Figura 52. Modelo gráfico del ensayo de resistencia a compresión.

Tabla 37. Cálculo de la dispersión de los resultados de resistencias a la compresión (kg/cm²).

Edad	Muestra (n)	SC (0.00 g/l)			GC-1 (0.10 g/l)			GC-2 (0.21 g/l)			GC-3 (0.35 g/l)			GC-4 (0.52 g/l)		
		X	$X - \underline{X}$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}^*$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}^*$	$(X - \underline{X})^2$
3 días	1	171.51	1.74	3.03	172.27	4.16	17.30	185.64	4.88	23.82	184.75	5.31	28.14	191.37	4.41	19.48
	2	172.65	0.59	0.35	181.18	4.75	22.60	181.31	0.55	0.30	176.85	2.59	6.70	188.82	1.87	3.49
	3	175.58	2.33	5.45	175.83	0.59	0.35	175.33	5.43	29.51	176.73	2.72	7.38	180.67	6.28	39.45
ΣX		519.74		8.83	529.29		40.25	542.27		53.64	538.33		42.23	560.86		62.42
n		3.00			3.00			3.00			3.00			3.00		
$\underline{X} = \frac{\Sigma X}{n}$		173.25			176.43			180.76			179.44			186.95		
$\Sigma(X - \underline{X})^2$		8.83			40.25			53.64			42.23			62.42		
$n - 1$		2.00			2.00			2.00			2.00			2.00		
σ^2		4.41			20.12			26.82			21.11			31.21		
σ		2.10			4.49			5.18			4.59			5.59		
V		1.21%			2.54%			2.87%			2.56%			2.99%		
$X_{\text{máximo}}$		175.58			181.18			185.64			184.75			191.37		
$X_{\text{mínimo}}$		171.51			172.27			175.33			176.73			180.67		
Rango aceptable %		2.35%			5.05%			5.71%			4.47%			5.72%		
7 días	1	217.21	4.88	23.82	235.29	5.35	28.60	221.03	1.57	2.47	232.24	0.42	0.18	232.62	2.50	6.27
	2	221.80	0.30	0.09	226.38	3.57	12.71	217.98	4.63	21.40	233.51	1.70	2.88	235.55	0.42	0.18
	3	227.27	5.18	26.81	228.16	1.78	3.18	228.80	6.20	38.40	229.69	2.12	4.50	237.20	2.08	4.32
ΣX		666.29		50.72	689.84		44.48	667.81		62.26	695.44		7.57	705.37		10.78
n		3.00			3.00			3.00			3.00			3.00		

$\underline{X} = \frac{\sum X}{n}$		222.10		229.95		222.60		231.81		235.12						
$\Sigma(X - \underline{X})^2$		50.72		44.48		62.26		7.57		10.78						
$n - 1$		2.00		2.00		2.00		2.00		2.00						
s^2		25.36		22.24		31.13		3.78		5.39						
s		5.04		4.72		5.58		1.94		2.32						
V		2.27%		2.05%		2.51%		0.84%		0.99%						
$X_{\text{máximo}}$		227.27		235.29		228.80		233.51		237.20						
$X_{\text{mínimo}}$		217.21		226.38		217.98		229.69		232.62						
Rango aceptable %		4.53%		3.88%		4.86%		1.65%		1.95%						
Edad	Muestra (n)	SC			GC-1			GC-2			GC-3			GC-4		
		X	$X - \underline{X}$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}^*$	$(X - \underline{X})^2$	X	$X - \underline{X}^*$	$(X - \underline{X})^2$
14 días	1	239.24	1.82	3.33	244.21	2.12	4.50	254.39	5.01	25.08	251.59	3.99	15.92	264.71	0.59	0.35
	2	243.44	2.38	5.65	247.52	1.19	1.41	242.55	6.83	46.69	262.54	6.96	48.45	259.49	4.63	21.40
	3	240.51	0.55	0.30	247.26	0.93	0.87	251.21	1.82	3.33	252.61	2.97	8.83	268.14	4.03	16.26
ΣX		723.20		9.28	738.99		6.79	748.16		75.10	766.74		73.19	792.34		38.01
n		3.00			3.00			3.00			3.00			3.00		
$\underline{X} = \frac{\sum X}{n}$		241.07			246.33			249.39			255.58			264.11		
$\Sigma(X - \underline{X})^2$		9.28			6.79			75.10			73.19			38.01		
$n - 1$		2.00			2.00			2.00			2.00			2.00		
s^2		4.64			3.39			37.55			36.59			19.01		
s		2.15			1.84			6.13			6.05			4.36		

V																
		0.89%			0.75%			2.46%			2.37%			1.65%		
$X_{\text{máximo}}$		243.44			247.52			254.39			262.54			268.14		
$X_{\text{mínimo}}$		239.24			244.21			242.55			251.59			259.49		
Rango aceptable %		1.74%			1.34%			4.75%			4.28%			3.28%		
28 días	1	263.69	1.74	3.03	276.80	6.96	48.45	274.26	0.76	0.58	276.55	0.68	0.46	272.73	7.17	51.45
	2	266.87	4.92	24.24	265.09	4.75	22.60	268.91	4.58	21.01	271.45	4.41	19.48	286.99	7.09	50.24
	3	255.28	6.66	44.40	267.63	2.21	4.87	277.31	3.82	14.59	279.60	3.73	13.95	279.99	0.08	0.01
ΣX		785.84		71.67	809.53		75.91	820.48		36.18	827.61		33.89	839.70		101.69
n		3.00			3.00			3.00			3.00			3.00		
$\underline{X} = \frac{\Sigma X}{n}$		261.95			269.84			273.49			275.87			279.90		
$\Sigma(X - \underline{X})^2$		71.67			75.91			36.18			33.89			101.69		
$n - 1$		2.00			2.00			2.00			2.00			2.00		
s^2		35.83			37.96			18.09			16.95			50.84		
s		5.99			6.16			4.25			4.12			7.13		
V		2.29%			2.28%			1.56%			1.49%			2.55%		
$X_{\text{máximo}}$		266.87			276.80			277.31			279.60			286.99		
$X_{\text{mínimo}}$		255.28			265.09			268.91			271.45			272.73		
Rango aceptable %		4.42%			4.34%			3.07%			2.95%			5.09%		

En la Figura 53, se representa de manera gráfica, estos ensayos de resistencia que se realizaron, en el caso de la viga para la resistencia a la flexión, la normativa NTP 339.078 / ASTM C 78, nos indica que el coeficiente de variación (V) está establecido en 5.7% y en dos ensayos individuales de vigas no debe diferir en más del 16% (*dispersión*) y la ecuación 29 lo utilizamos para determinar el módulo de rotura de las vigas de concreto.

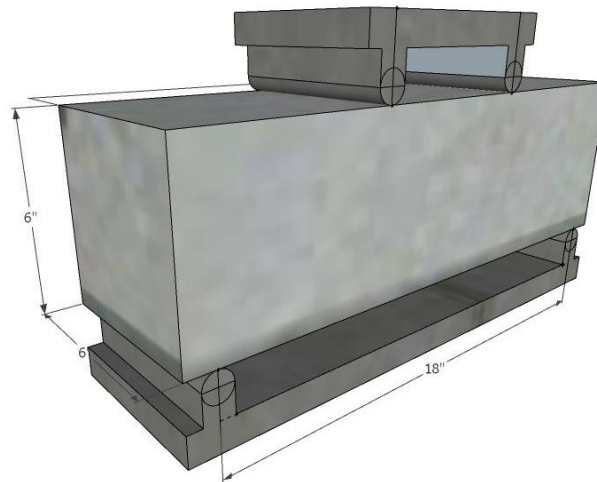


Figura 53. Modelo gráfico del ensayo de resistencia a flexión (módulo de rotura).



Figura 54. Ensayos de resistencia a la flexión (módulo de rotura).

Tabla 38. Resultados en carga en los tercios del tramo para ensayo de resistencia a flexión.

Edad	SC (0.00 g/l)	GC-1 (0.10 g/l)	GC-2 (0.21 g/l)	GC-3 (0.35 g/l)	GC-4 (0.52 g/l)
28 días	2440.00	2770.00	2860.00	2860.00	2760.00
	2710.00	2680.00	2720.00	2790.00	2970.00
	2520.00	2820.00	2590.00	2880.00	2780.00

En la Tabla 44, se visualiza las cargas (kg) para la resistencias a flexión obtenidas para cada viga ensayada, como visualiza en la Figura 54, para determinar el módulo de rotura con la carga obtenida (kg). Entonces, de la ecuación 29 del módulo de rotura, tenemos el valor del ancho promedio de la viga ($b = 15\text{ cm}$), la altura promedio de la viga ($h = 15\text{ cm}$), la longitud o luz libre entre apoyos (45 cm) y la carga (P) lo obtenemos de la Tabla 44. Entonces, realizamos el cálculo del módulo de rotura (fr), y tenemos los siguientes resultados de la Tabla 45, donde la viga se realizó el ensayo solo a los 28 días de edad del concreto y se realizó el ensayo de resistencia a flexión a tres unidades por cada grupo, para realizar el promedio aritmético.

Tabla 39. Cálculo del módulo de rotura de las vigas de concreto a 28 días de edad.

Grupo de ensayo	b(cm)	d (cm)	Lv (cm)	Carga (kg)	fr
SC	15.00	15.00	45.00	2440	32.53
SC	15.00	15.00	45.00	2710	36.13
SC	15.00	15.00	45.00	2520	33.60
GC-1	15.00	15.00	45.00	2770	36.93
GC-1	15.00	15.00	45.00	2680	35.73
GC-1	15.00	15.00	45.00	2820	37.60
GC-2	15.00	15.00	45.00	2860	38.13
GC-2	15.00	15.00	45.00	2720	36.27
GC-2	15.00	15.00	45.00	2590	34.53
GC-3	15.00	15.00	45.00	2860	38.13
GC-3	15.00	15.00	45.00	2790	37.20
GC-3	15.00	15.00	45.00	2880	38.40
GC-4	15.00	15.00	45.00	2760	36.80
GC-4	15.00	15.00	45.00	2970	39.60
GC-4	15.00	15.00	45.00	2780	37.07

En la Tabla 46, realizamos el cálculo de la dispersión de nuestros resultados de ensayo a flexión, donde obtuvimos dispersiones menores del 16% como indica la normativa, confirmando la precisión de nuestros resultados.

Tabla 40. Cálculo de la dispersión de resultados de resistencia a flexión (módulo de rotura).

Edad	muestra	SC (0.00 g/l)	GC-1 (0.10 g/l)	GC-2 (0.21 g/l)	GC-3 (0.35 g/l)	GC-4 (0.52 g/l)
		X	X	X	X	X
28 días	1	31.02	35.2	36.36	36.36	35.09
	2	34.45	34.1	34.58	35.47	37.76
	3	32.04	35.9	32.93	36.61	35.34
$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$		32.50	35.05	34.62	36.15	36.06
n		3	3	3	3	3
$X_{\text{máximo}}$		34.45	35.9	36.36	36.61	37.76
$X_{\text{mínimo}}$		31.02	34.1	32.93	35.47	35.09
Rango aceptable %		10.56%	5.08%	9.91%	3.17%	7.40%

4.1.5 Resultado de las resistencias del concreto a compresión y flexión

Los resultados obtenidos en la resistencia a compresión utilizamos la Tabla 42 y ecuación 28, obteniendo la resistencia real a compresión (kg/cm^2) (véase Tabla 47) y calculamos el promedio aritmético ($\bar{X}$) para cada edad y grupo.

Tabla 41. Resistencia real del concreto obtenido con el ensayo de resistencia a compresión.

Edad	SC (0.00 g/l)	GC-1 (0.10 g/l)	GC-2 (0.21 g/l)	GC-3 (0.35 g/l)	GC-4 (0.52 g/l)
3 días	171.51	172.27	185.64	184.75	191.37
	172.65	181.18	181.31	176.85	188.82
	175.58	175.83	175.33	176.73	180.67
$\bar{X}$	173.25	176.43	180.76	179.44	186.95
7 días	217.21	235.29	221.03	232.24	232.62
	221.80	226.38	217.98	233.51	235.55
	227.27	228.16	228.80	229.69	237.20
$\bar{X}$	222.10	229.95	222.60	231.81	235.12
14 días	239.24	244.21	254.39	251.59	264.71
	243.44	247.52	242.55	262.54	259.49
	240.51	247.26	251.21	252.61	268.14
$\bar{X}$	241.07	246.33	249.39	255.58	264.11
28 días	263.69	276.80	274.26	276.55	272.73
	266.87	265.09	268.91	271.45	286.99
	255.28	267.63	277.31	279.60	279.99
$\bar{X}$	261.95	269.84	273.49	275.87	279.90

Entonces, graficamos los resultados obtenidos en una curva de resistencia a la compresión y edad del concreto (véase Figura 55).

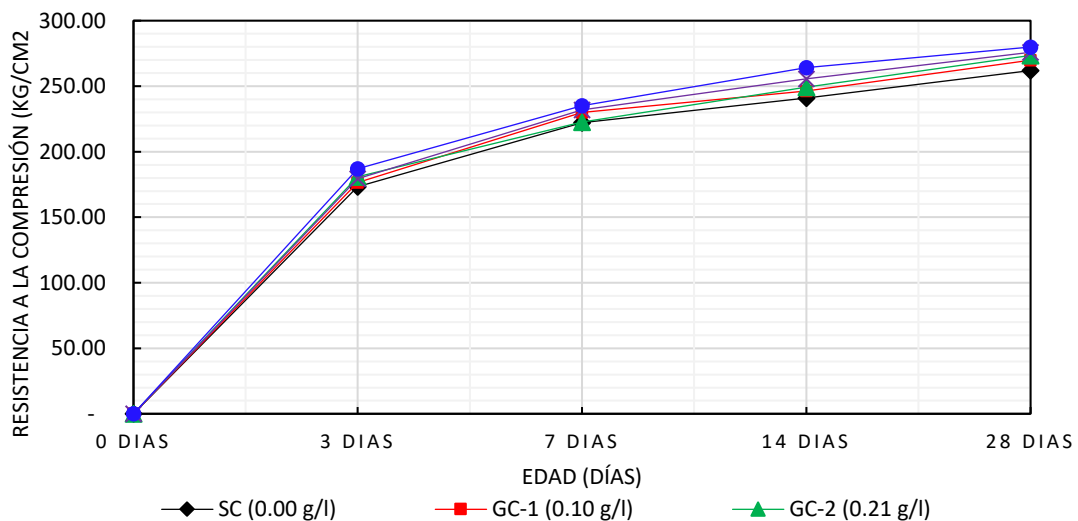


Figura 55. Resistencia del concreto a la compresión vs edad del concreto (tiempo).

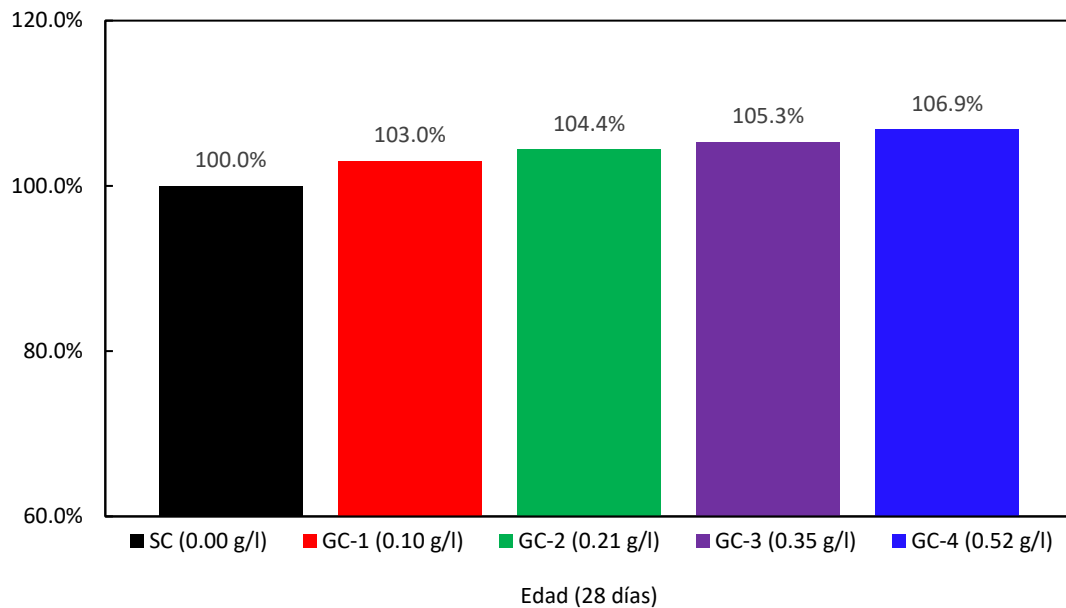


Figura 56. Resistencia a la compresión del concreto con adición de diferentes concentraciones (C_G) grafeno/agua en función del concreto estándar.

En la Figura 55, podemos visualizar la curva de resistencias para cada grupo de control y grupo experimental, donde se puede observar que la adición de grafeno a mayor concentración ofrece una mayor resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de edad. Finalmente, analizamos la influencia de la adición de grafeno en el concreto mediante la Figura 56, donde los grupos experimentales $GC - 1$, $GC - 2$, $GC - 3$ y $GC - 4$ con adiciones de ($C_G 0.10 g/l$), ($C_G 0.21 g/l$), ($C_G 0.35 g/l$) y ($C_G 0.52 g/l$) de grafeno por exfoliación en fase líquida, aumenta la resistencia a la compresión en 3.0%, 4.4%, 5.3% y 6.9%, respecto al concreto estándar, respectivamente.

En los resultados obtenidos para la resistencia a la flexión, se realizó solo a la edad de 28 días y utilizando la Tabla 45 con los resultados del módulo de rotura (fr) en (kg/cm^2), calculamos el promedio aritmético ($\bar{X}$) y obtuvimos la Tabla 48.

Tabla 42. Módulo de rotura del concreto obtenido con el ensayo de resistencia a flexión.

Edad	SC (0.00 g/l)	GC-1 (0.10 g/l)	GC-2 (0.21 g/l)	GC-3 (0.35 g/l)	GC-4 (0.52 g/l)
28 días	32.53	36.93	38.13	38.13	36.80
	36.13	35.73	36.27	37.20	39.60
	33.60	37.60	34.53	38.40	37.07
$\bar{X}$	34.09	36.76	36.31	37.91	37.82

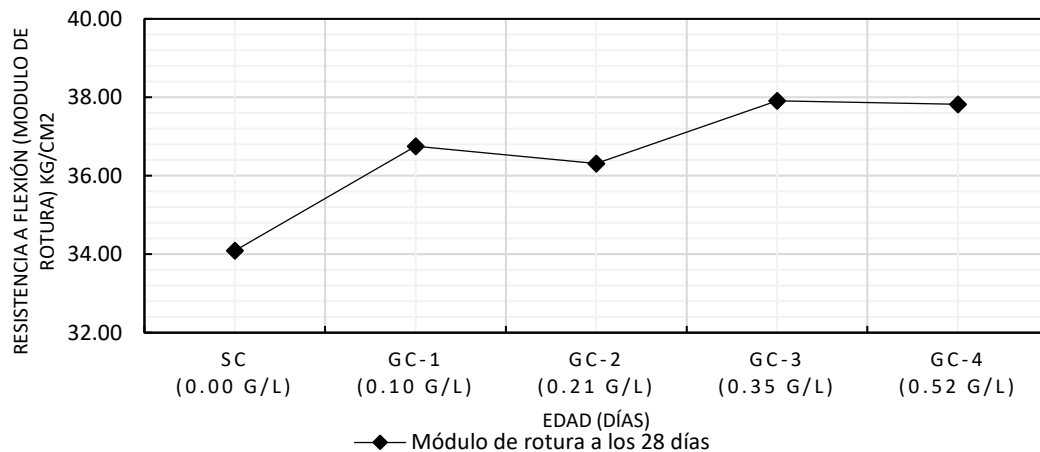


Figura 57. Resistencia del concreto a la flexión (módulo de rotura).

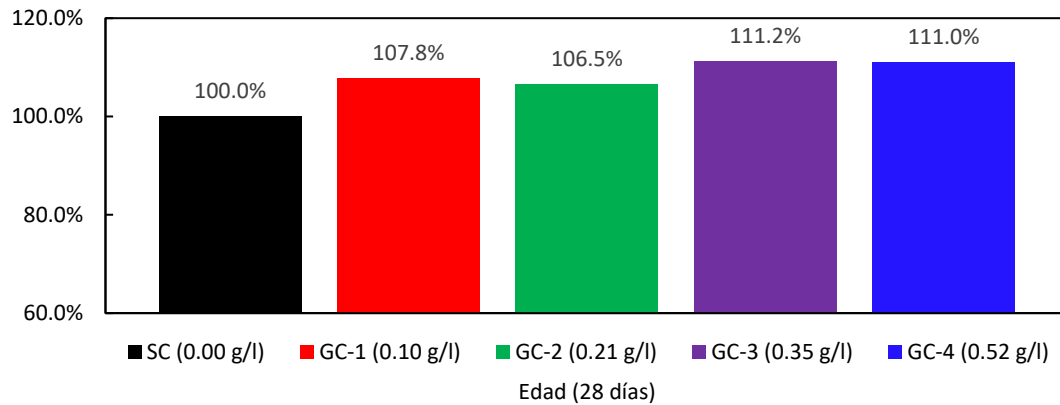


Figura 58. Resistencia a flexión (módulo de rotura) del concreto con adición de diferentes concentraciones (C_G) grafeno/agua en función del concreto estándar.

En la Figura 57, se visualiza el gráfico de resultados del módulo de rotura, donde cada punto es el promedio de tres resultados, donde la adición de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en el concreto influyen en la resistencia a la flexión que el concreto. Entonces, para analizar la influencia del grafeno en el concreto, realizamos la Figura 58 el grupo experimental $GC - 1$, $GC - 2$, $GC - 3$ y $GC - 4$ con adiciones de (C_G 0.10 g/l), (C_G 0.21 g/l), (C_G 0.35 g/l) y (C_G 0.52 g/l), aumentó la resistencia a la flexión en 7.80%, 6.5%, 11.2% y 11.0%, respecto al concreto estándar, respectivamente.

Analizando los resultados, determinamos que el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influyó en la resistencia del concreto, Lima-2021, aumentando su resistencia a compresión y flexión. Estas adiciones óptimas tienen una concentración (C_G 0.52 g/l) que mejora en 6.9% la resistencia a compresión y (C_G 0.35 g/l) que mejora 11:2% la resistencia a la flexión, respecto al concreto estándar.

4.2 Prueba de Hipótesis

4.2.1 Análisis descriptivo

Analizando mediante estadística descriptiva, para la dispersión de nuestros resultados utilizamos medidas de tendencia central (media y mediana), y variabilidad como (rango, desviación estándar y varianza), siguiendo los procedimientos de las normativas NTP 339.034 / ASTM C 39 y la NTP 339.078 / ASTM C 78.

Tabla 43. Análisis estadístico descriptivo de la resistencia a compresión (kg/cm²).

Edad	SC	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
3 días	171.51	172.27	185.64	184.75	191.37
	172.65	181.18	181.31	176.85	188.82
	175.58	175.83	175.33	176.73	180.67
Media ($\bar{X}$)	173.25	176.43	180.76	179.44	186.95
Mediana (Me)	172.65	175.83	181.31	176.85	188.82
Rango (R)	4.07	8.91	10.31	8.02	10.70
Varianza (s^2)	4.41	20.12	26.82	21.11	31.21
Desviación estándar (s)	2.10	4.49	5.18	4.59	5.59
7 días	217.21	235.29	221.03	232.24	232.62
	221.80	226.38	217.98	233.51	235.55
	227.27	228.16	228.80	229.69	237.20
Media ($\bar{X}$)	222.10	229.95	222.60	231.81	235.12
Mediana (Me)	221.80	228.16	221.03	232.24	235.55
Rango (R)	10.06	8.91	10.82	3.82	4.58
Varianza (s^2)	25.36	22.24	31.13	3.78	5.39
Desviación estándar (s)	5.04	4.72	5.58	1.94	2.32
14 días	239.24	244.21	254.39	251.59	264.71
	243.44	247.52	242.55	262.54	259.49
	240.51	247.26	251.21	252.61	268.14
Media ($\bar{X}$)	241.07	246.33	249.39	255.58	264.11
Mediana (Me)	240.51	247.26	251.21	252.61	259.49
Rango (R)	4.20	3.31	11.84	10.95	8.66
Varianza (s^2)	4.64	3.39	37.55	36.59	19.01
Desviación estándar (s)	2.15	1.84	6.13	6.05	4.36
28 días	263.69	276.80	274.26	276.55	272.73
	266.87	265.09	268.91	271.45	286.99
	255.28	267.63	277.31	279.60	279.99
Media ($\bar{X}$)	261.95	269.84	273.49	275.87	279.90
Mediana (Me)	263.69	267.63	274.26	276.55	279.99
Rango (R)	11.59	11.71	8.40	8.15	14.26
Varianza (s^2)	35.83	37.96	18.09	16.95	50.84
Desviación estándar (s)	5.99	6.16	4.25	4.12	7.13

En el diseño de mezcla desarrollado, se obtuvo una resistencia promedio a la compresión requerida (f'_{cr}) de 243 kg/cm^2 que es un valor menor, respecto a la resistencia real a la compresión del concreto (f_c), que se puede visualizar en la Tabla 49, a los 28 días de edad en el concreto, donde es comparado con la media o promedio de las resistencias obtenidas por cada grupo. Entonces, la presente investigación tuvo como objetivo, determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021 y analizando los resultados de la estadística descriptiva obtenidos, determinamos que el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima – 2021, con el incremento de la resistencia.

Tabla 44. Análisis estadístico descriptivo de la resistencia a la flexión (kg/cm^2).

Edad	SC	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
28 días	32.53	36.93	38.13	38.13	36.80
	36.13	35.73	36.27	37.20	39.60
	33.60	37.60	34.53	38.40	37.07
Media ($\bar{X}$)	34.09	36.76	36.31	37.91	37.82
Mediana (Me)	33.60	36.93	36.27	38.40	37.07
Rango (R)	3.60	1.87	3.60	1.20	2.80
Varianza (s^2)	3.42	0.89	3.24	0.40	2.39
Desviación estándar (s)	1.85	0.95	1.80	0.63	1.55

Entonces, realizado el análisis descriptivo (véase Tabla 49), donde se determinó que, el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influyó en la resistencia a la compresión del concreto, Lima – 2021, con el incremento en 6.9% respecto al concreto estándar, para una concentración óptima de (C_G 0.52 g/l). Finalmente, según el resultado obtenido por el análisis descriptivo (véase Tabla 50), determinamos que el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influyó en la resistencia a la flexión del concreto, Lima – 2021, con el incremento en 11.2% respecto al concreto estándar, para una concentración óptima de (C_G 0.35 g/l).

4.2.2 Análisis inferencial

Los resultados fueron sometidos a la prueba de normalidad, que permitió determinar la prueba que utilizamos para el análisis estadístico. Entonces, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, porque es menor que 50 muestras y realizamos la prueba de normalidad pos test a la variable dependiente (resistencia del concreto) y

sus dimensiones (resistencia a la compresión y flexión), donde la variable dependiente (resistencia del concreto) se validó con los datos de la resistencia a la compresión, la resistencia a la compresión es un indicador de la calidad del concreto (11), (19). Se requiere normalmente 28 días para ser ensayado; por lo tanto, la prueba de normalidad lo realizamos a esta edad del concreto (17).

Tabla 45. Prueba de normalidad

Pruebas de normalidad			
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig. p-valor
VD RESISTENCIA DEL CONCRETO			
D1 28 DÍAS GC-1	0,903	3	0,397
D1 28 DÍAS GC-2	0,976	3	0,701
D1 28 DÍAS GC-3	0,979	3	0,725
D1 28 DÍAS GC-4	1,000	3	0,980
DIMENSIÓN 1 (D1): RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO			
D1 28 DÍAS GC-1	0,903	3	0,397
D1 28 DÍAS GC-2	0,976	3	0,701
D1 28 DÍAS GC-3	0,979	3	0,725
D1 28 DÍAS GC-4	1,000	3	0,980
DIMENSIÓN 2 (D2): RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO			
D2 28 DÍAS GC-1	0,974	3	0,690
D2 28 DÍAS GC-2	1,000	3	0,963
D2 28 DÍAS GC-3	0,908	3	0,413
D2 28 DÍAS GC-4	0,822	3	0,167

Los resultados obtenidos nos muestran que si es mayor que $pvalor > \alpha = 0.05$, la distribución es normal y se debe probar las hipótesis con la prueba paramétrica t-student, para detallar esto seguimos con los procedimientos para tomar una decisión.

4.2.2.1 Hipótesis planteadas

Se probaron las hipótesis para las edades del concreto (3, 7, 14 y 28 días), donde la hipótesis nula y alternativa se representa de la siguiente forma.

$$H_0: \mu_{GC} \leq \mu_{SC}$$

$$H_1: \mu_{GC} > \mu_{SC}$$

Se presenta como μ_{SC} , la media aritmética del concreto estándar y como μ_{GC} la media aritmética del concreto con adición de grafeno. La prueba de hipótesis que se realizó es unilateral de cola a la derecha.

4.2.2.2 Nivel de significancia

El nivel de significancia es $\alpha = 5\%$

4.2.2.3 Valor de prueba

Se realizó la prueba paramétrica con el estadístico de prueba t-student de muestras relacionadas, utilizando las tablas del t-student y la ecuación, para determinar si la influencia de cada concentración de grafeno en el concreto es mayor respecto a un concreto estándar. Los cálculos realizados se pueden visualizar en el Anexo.

$$t_{\varepsilon} = \frac{\frac{d}{s_d}}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 30.}$$

Donde: t_{ε} = estadístico de prueba

$\underline{d}$ = promedio de las diferencias

s_d = desviación estándar de las diferencias

n = tamaño de la muestra

A) Hipótesis general y nula de la investigación

Se realizó la prueba estadística a diferentes concentraciones de grafeno en el concreto, sólo para el día 28 mediante la resistencia a compresión que es un índice de la calidad de la resistencia del concreto.

Hipótesis general y nula

Ho: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición no influye en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

Hi. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

Tabla 46. Cálculo del estadístico de prueba (t) para la resistencia del concreto.

Edad	SC	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
28 días	263.69	276.80	274.26	276.55	272.73
	266.87	265.09	268.91	271.45	286.99
	255.28	267.63	277.31	279.60	279.99
Promedio de diferencias ($\underline{d}$)	-	2.66	2.95	1.58	0.46
Tamaño de las muestras (n)	-	3.00	3.00	3.00	3.00
Desviación estándar de dif. (s_d)	-	8.39	10.03	9.91	8.05
p-valor	-	0.122	0.092	0.068	0.031
Estadístico de prueba (t_{ε})	-	1.63	1.99	2.43	3.86

Tabla 47. Verificación con SPSS estadística con *t*-student - resistencia del concreto.

Prueba de muestras emparejadas								
	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. p-valor
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
GC-1 RESISTENCIA DEL CONCRETO - SC RESISTENCIA DEL CONCRETO	7,89333	8,38597	4,84164	-12,93856	28,72523	1,630	2	0,1225
GC-1 RESISTENCIA DEL CONCRETO - SC RESISTENCIA DEL CONCRETO	11,54667	10,03072	5,79124	-13,37103	36,46437	1,994	2	0,0920
GC-1 RESISTENCIA DEL CONCRETO - SC RESISTENCIA DEL CONCRETO	13,92000	9,91260	5,72304	-10,70426	38,54426	2,432	2	0,0680
GC-1 RESISTENCIA DEL CONCRETO - SC RESISTENCIA DEL CONCRETO	17,95667	8,05588	4,65107	-2,05525	37,96859	3,861	2	0,0305

El valor crítico es $t_{(1-\alpha)(n-1)}$ es $t_{0,95,2}$ para datos de la resistencia del concreto a 28 días, con un valor crítico de $t_{0,95,2} = 2.92$. Además, la resistencia del concreto con adición de grafeno $GC - 4$, tiene un $p - valor < \alpha = 0.05$ y el $t_e > t_{0,95,2} = 2.92$, entonces se rechaza la hipótesis nula. Finalmente, la estadística inferencial muestra resultado positivo para $GC - 4$, concluyendo que tiene influencia significativa el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

B) Hipótesis específica de la investigación

Se realizó la prueba estadística a la resistencia a compresión y flexión a diferentes concentraciones de adición de grafeno en el concreto.

Hipótesis específica 1 – Concentración óptima de grafeno como adición

Ho: La concentración óptima de grafeno como adición no afecta en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

Hi: La concentración óptima de grafeno como adición afecta en la resistencia del concreto, Lima - 2021.

Hipótesis específica 2 – Resistencia a la compresión

Ho: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición no influye en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021.

Hi: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021.

Tabla 48. Cálculo estadístico de prueba (t) para la resistencia a compresión del concreto.

Edad	SC	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
3 días	171.51	172.27	185.64	184.75	191.37
	172.65	181.18	181.31	176.85	188.82
	175.58	175.83	175.33	176.73	180.67
Promedio de diferencias ($\bar{d}$)		3.18	7.51	6.20	13.71
Tamaño de las muestras (n)		3.00	3.00	3.00	3.00
Desviación estándar de dif. (s_d)		4.64	7.26	6.29	7.69
p-valor		0.179	0.108	0.115	0.045
Estadístico de prueba (t_e)		1.19	1.79	1.71	3.09
7 días	217.21	235.29	221.03	232.24	232.62
	221.80	226.38	217.98	233.51	235.55
	227.27	228.16	228.80	229.69	237.20
Promedio de diferencias ($\bar{d}$)		7.85	0.51	9.72	13.03
Tamaño de las muestras (n)		3.00	3.00	3.00	3.00
Desviación estándar de dif. (s_d)		9.05	3.92	6.53	2.81
p-valor		0.136	0.422	0.062	0.008
Estadístico de prueba (t_e)		1.50	0.23	2.58	8.03
14 días	239.24	244.21	254.39	251.59	264.71
	243.44	247.52	242.55	262.54	259.49
	240.51	247.26	251.21	252.61	268.14
Promedio de diferencias ($\bar{d}$)		5.26	8.32	14.51	23.05
Tamaño de las muestras (n)		3.00	3.00	3.00	3.00
Desviación estándar de dif. (s_d)		1.36	8.28	3.97	6.16
p-valor		0.011	0.112	0.012	0.012
Estadístico de prueba (t_e)		6.70	1.74	6.33	6.48
28 días	263.69	276.80	274.26	276.55	272.73
	266.87	265.09	268.91	271.45	286.99
	255.28	267.63	277.31	279.60	279.99
Promedio de diferencias ($\bar{d}$)		7.89	11.54	13.92	17.95
Tamaño de las muestras (n)		3.00	3.00	3.00	3.00
Desviación estándar de dif. (s_d)		8.39	10.03	9.91	8.05
p-valor		0.123	0.092	0.068	0.031
Estadístico de prueba (t_e)		1.63	1.99	2.43	3.86

Se realizó la comprobación de los cálculos realizados con el software SPSS estadística.

Tabla 49. Verificación con SPSS estadística con t-student - resistencia a la compresión.

Prueba de muestras emparejadas								
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. p-valor
				Inferior	Superior			
GC-1 RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS	318,0000	464,02478	267,90483	-834,70146	1470,70146	1,187	2	0,179
GC-2 RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS	7,5133	7,25825	4,19055	-10,51717	25,54383	1,793	2	0,108
GC3 RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS	6,1967	6,28745	3,63006	-9,42223	21,81556	1,707	2	0,115
GC-4 RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A COMPRESION 3 DÍAS	13,7067	7,68695	4,43806	-5,38878	32,80211	3,088	2	0,045
GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS	7,8500	9,04951	5,22474	-14,63024	30,33024	1,502	2	0,136
GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS	0,5100	3,92080	2,26368	-9,22982	10,24982	0,225	2	0,422
GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS	9,7200	6,53629	3,77373	-6,51705	25,95705	2,576	2	0,062
GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 DÍAS	13,0300	2,81005	1,62239	6,04944	20,01056	8,031	2	0,008
GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	5,2667	1,35950	,78491	1,88949	8,64385	6,710	2	0,011
GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	8,3200	8,28062	4,78082	-12,25021	28,89021	1,740	2	0,112
GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	14,5167	3,97125	2,29280	4,65153	24,38180	6,331	2	0,012
GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESION 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 14 DÍAS	23,0500	6,15763	3,55511	7,75360	38,34640	6,484	2	0,012
GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS	7,8933	8,38597	4,84164	-12,93856	28,72523	1,630	2	0,123
GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS	11,5467	10,03072	5,79124	-13,37103	36,46437	1,994	2	0,092
GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS	13,9200	9,91260	5,72304	-10,70426	38,54426	2,432	2	0,068
GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 DÍAS	17,9567	8,05588	4,65107	-2,05525	37,96859	3,861	2	0,031

El valor crítico es $t_{0,95,2} = 2.92$ y la resistencia del concreto con adición de grafeno GC – 4, tiene un $p - \text{valor} < \alpha = 0.05$ y el $t_e > t_{0,95,2} = 2.92$ para los días 3, 7, 14 y 28 días. Entonces, se rechaza la hipótesis nula y la estadística inferencial muestra resultados positivos para GC – 4, concluyendo que tiene influencia significativa el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la compresión del concreto, Lima – 2021.

Hipótesis específica 3 – Resistencia a la flexión

Ho: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición no influye en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021.

Hi: El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021.

Tabla 50. Cálculo estadístico de prueba (t) para la resistencia a flexión del concreto.

Edad	SC	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4
28 días	32.53	36.93	38.13	37.20	36.80
	36.13	35.73	36.27	38.13	39.60
	33.60	37.60	34.53	38.40	37.07
Promedio de diferencias ($\bar{d}$)		2.67	2.22	3.82	3.73
Tamaño de las muestras (n)		3.00	3.00	3.00	3.00
Desviación estándar de dif. (s_d)		2.66	2.95	1.58	0.46
p-valor		0.113	0.1611	0.026	0.003
Estadístico de prueba (t_e)		1.73	1.30	4.19	14.01

Tabla 51. Verificación con SPSS estadística con t-student - resistencia a la flexión.

Prueba de muestras emparejadas								
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. p-valor
				Inferior	Superior			
GC-1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC	2,6667	2,66333	1,53768	-3,94941	9,28275	1,734	2	0,113
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS								
GC-2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC	2,2233	2,95084	1,70367	-5,10695	9,55362	1,305	2	0,161
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS								
GC-3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC	3,8233	1,58039	0,91244	-0,10257	7,74924	4,190	2	0,026
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS								
GC-4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC	3,7367	0,46188	0,26667	2,58929	4,88404	14,012	2	0,003
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS								

El valor crítico es $t_{0.95,2} = 2.92$ y la resistencia del concreto con adición de grafeno GC – 3 y GC – 4, tiene un $p - valor < \alpha = 0.05$ y el $t_e > t_{0.95,2} = 2.92$ para 28 días. Entonces, se rechaza la hipótesis nula y la estadística inferencial muestra resultados positivos para GC – 3 y GC – 4, concluyendo que tiene influencia significativa el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la compresión del concreto, Lima – 2021.

4.2.2.4 Decisión

Se realizó la toma de decisión de acuerdo a los cálculos realizados y la verificación con el software SPSS estadística.

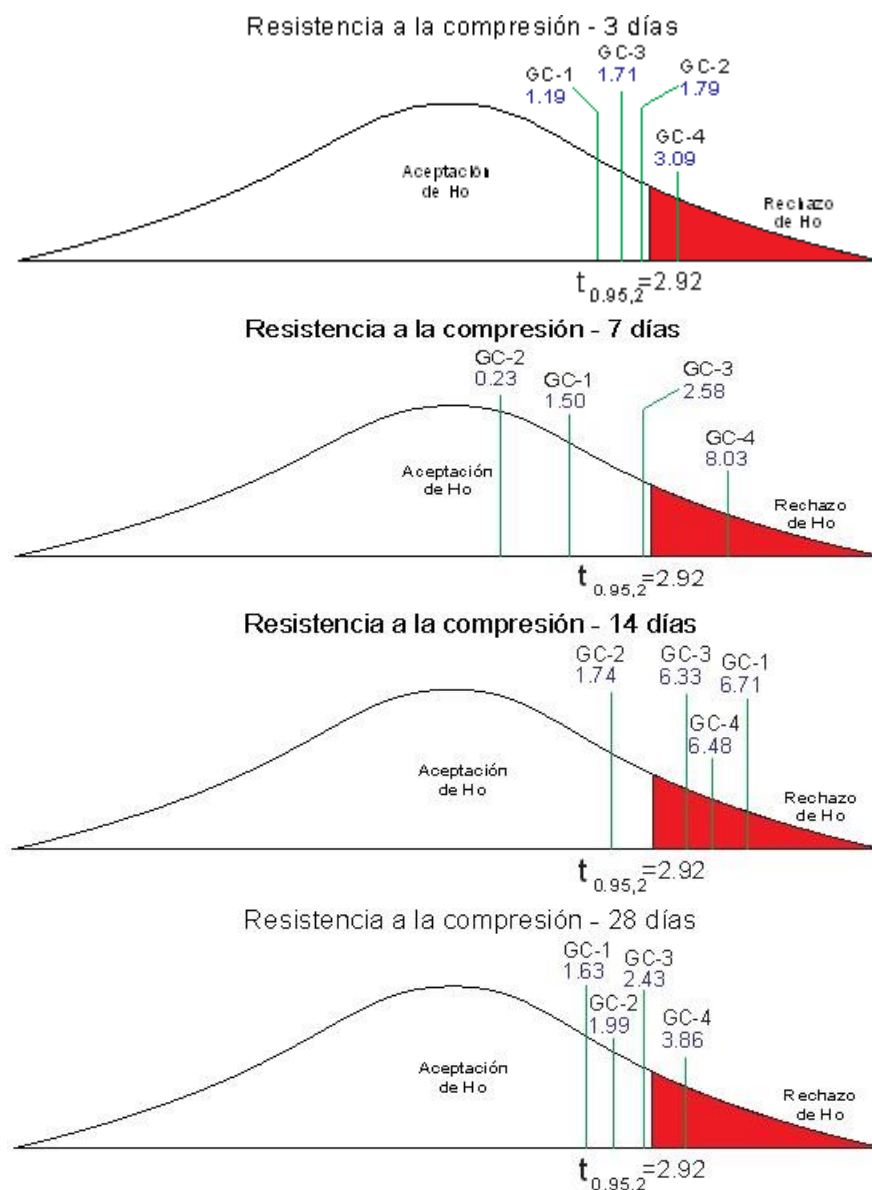


Figura 59. Toma de decisión de la resistencia a la compresión del concreto

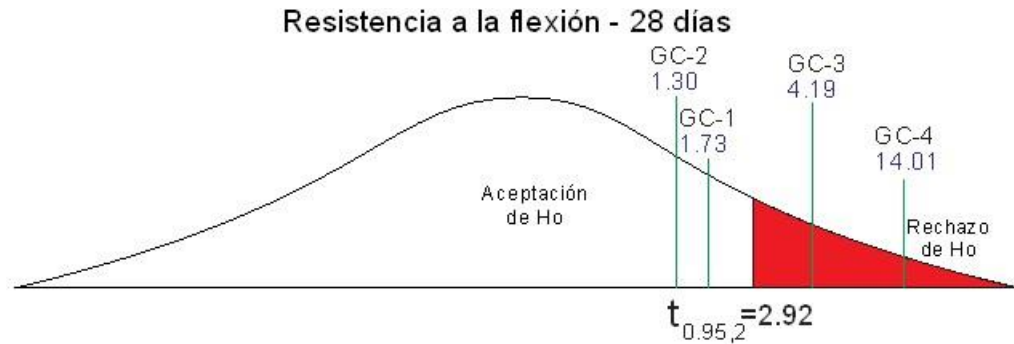


Figura 60. Toma de decisión de la resistencia a la flexión del concreto.

En conclusión, rechazamos la hipótesis nula H_0 y determinamos que el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima – 2021. Estas adiciones óptimas tienen una concentración para $GC - 4$ (C_G 0.52 g/l) que mejora en 6.9% la resistencia a compresión y $GC - 3$ (C_G 0.35 g/l) que mejora 11.2% la resistencia a la flexión, respecto al concreto estándar, según el análisis estadístico inferencial obtenido.

4.3 Discusión de resultados

La transparencia del grafeno se convierte en una indicación eficaz del número de capas de grafeno, esto se puede visualizar Figura 9-b (14). Se realizó la clasificación de tamaños de grafeno exfoliado, mediante el proceso de centrifugación controlada en volumen de 10 ml, en pasos consecutivos, cada uno con mayor velocidad de centrifugación, donde el sobrenadante se somete a las siguientes velocidades de centrifugación visualizadas en la Figura 61, que tiene longitudes de grafeno exfoliado más pequeños (3). Se obtuvo tamaños desde 0.07 hasta $1.06 \mu m^2$ con el análisis SEM y también le realizó espectroscopia Raman, donde reveló películas de nanoláminas que varían de 4 a 7 capas, pero la mayoría de grafeno tenía 6 capas de espesor (4). Además, indica que las suspensiones de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida por centrifugado son más adecuadas porque aparte de obtener tamaños de grafeno más pequeños, también se puede obtener grafeno de pocas capas, pero el contenido de grafeno son muy pequeños que no será suficiente para reforzar el concreto (4).

Entonces, frente a lo realizado en esta investigación no se utilizó la centrifugación, ya que según, lo más adecuado para reforzar el concreto son las suspensiones de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida con una simple decantación; por lo tanto, el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en la

exfoliación de grafito por cizallamiento se dejaron por 5 días en reposo o estático para decantar el grafito sedimentado y descartar el exceso de grafito no exfoliado (4).

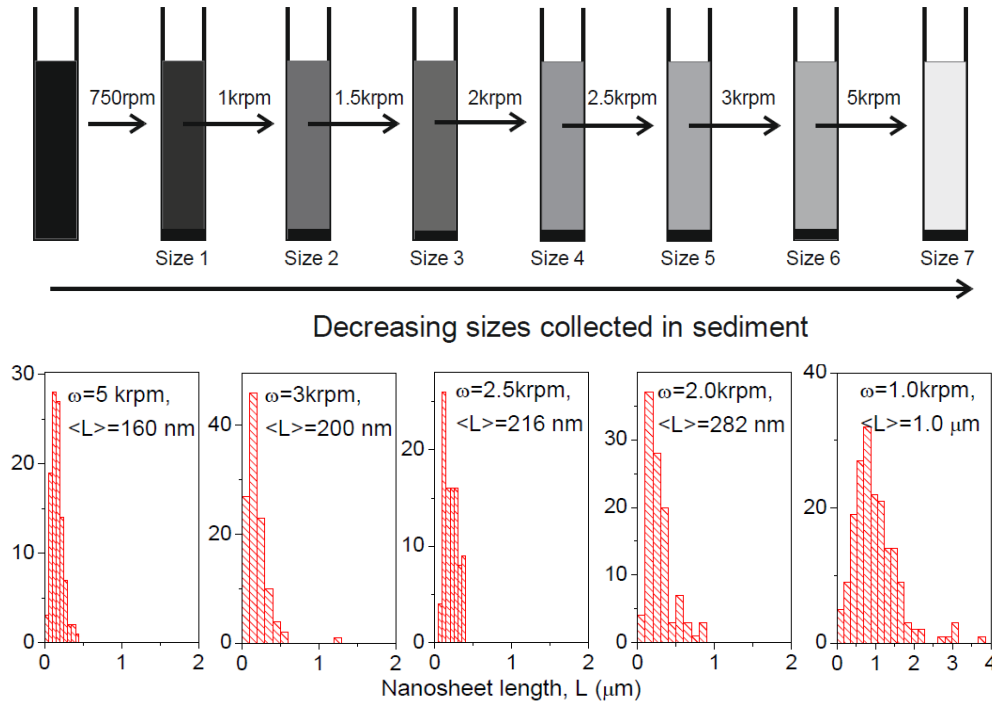


Figura 61. Esquema de protocolo de centrifugación para seleccionar una amplia variación de tamaños a partir de una dispersión (superior) y un histograma de longitud TEM de muestras seleccionadas por tamaño con longitud media y velocidad de centrifugación (inferior). Tomado de “Scalable production of large quantities of defect-free few layer Graphene by shear-exfoliation in liquids” Supplementary Information, por Jonathan Coleman, Keith Paton, Eswaraiah Varla, Claudia Backes, Ronan Smith et al., 2014, pp. 23-24.

En la exfoliación del grafito realizado con un mezclador como una licuadora doméstica se logró producir grafeno de entre 4 – 5 capas con una tasa media de cizallamiento ($\dot{\gamma}_t \approx 2.8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$) y un Reynolds ($Re_{blade} = 1 \times 10^6$) (3). En esta investigación, donde también utilizamos la cuchilla de licuadora en un taladro Bosch, obtuvimos un tasa media de cizallamiento de ($\dot{\gamma}_t \approx 1.1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$) y un Reynolds ($Re_{blade} = 13.54 \times 10^4$), estos resultados son mayores de los mínimos establecidos para producir grafeno de tasa de cizallamiento mínima y un Reynolds mínimo de $\dot{\gamma}_{mínima} \approx 1.0 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ y ($Re_{blade} \sim 1.0 \times 10^4$) (3). Entonces, en esta investigación obtuvimos grafeno de 4 capas como mínimo, como obtuvo grafeno por el mismo procedimiento de la exfoliación de grafito por cizallamiento de las investigaciones de (4), (3). También podríamos afirmar que obtuvimos grafeno hasta de 10 capas, pero se puede descartar una estructura de grafito que son > 10 capas (3),(12). Se incorporó grafito ultrafino (UTGr) entre 20 – 21 capas en el concreto y se tuvo una disminución de resistencia, debido a que las partículas de 24 nm de grosor del grafito, obstaculizaron la

reacción de hidratación y bloqueando los cristales de cemento para formar un enclavamiento adecuado (Figura 62-c y 62-d) (4).

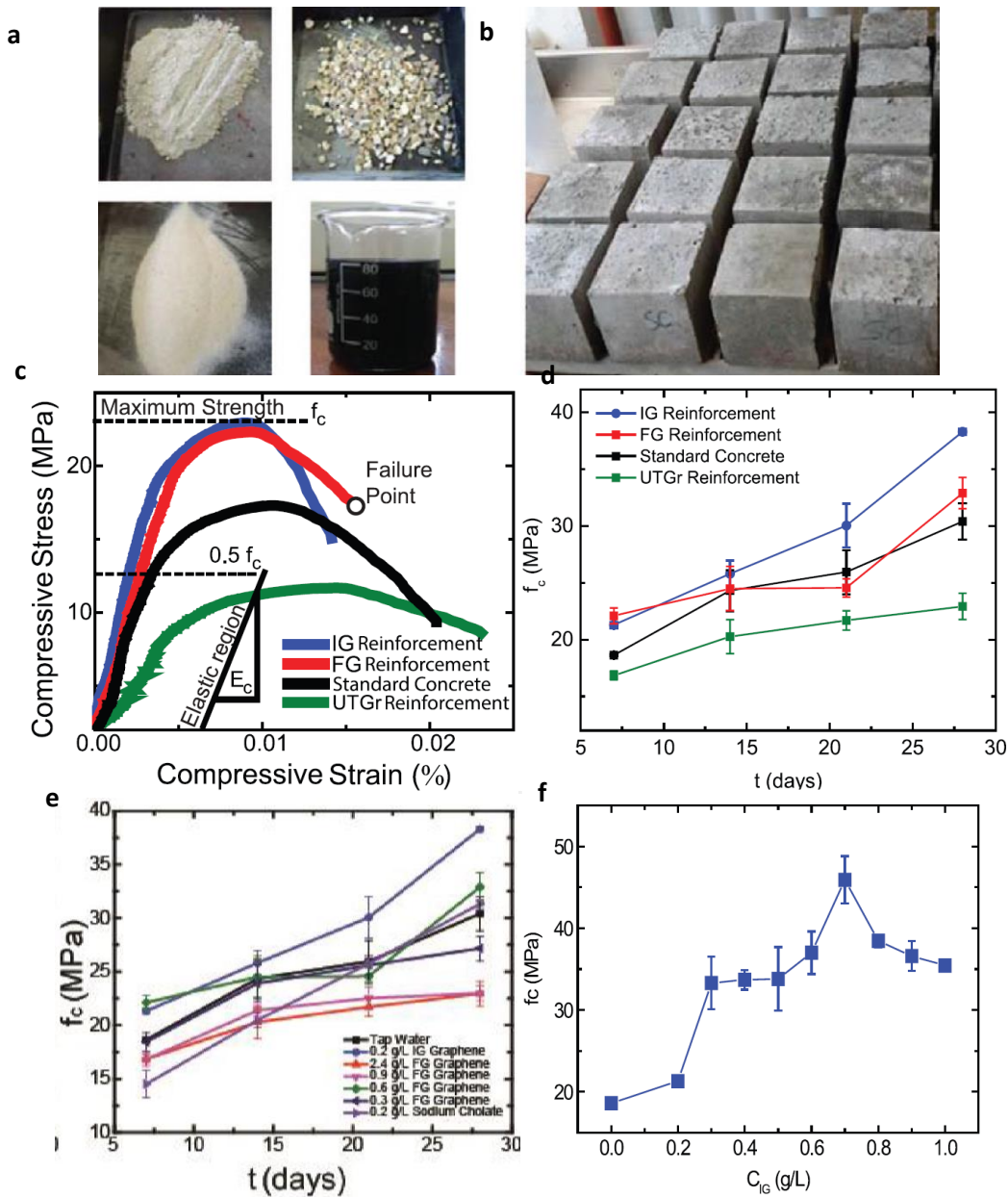


Figura 62. Resistencia a la compresión del concreto reforzado con grafeno. a) Materiales para la elaboración del concreto y el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida. b) Cubos de concreto para los ensayos. c) Curva de esfuerzo-deformación de un cubo de concreto en compresión, comparado el concreto estándar con refuerzo de grafeno (IG y FG) y grafito (UTGr). d) La evolución de resistencia a la compresión del concreto (f_c) a diferentes tiempos de (IG, FG, UTGr y concreto estándar). e) evolución del (f_c), con diferentes concentraciones de FG. f) determinando la concentración de IG óptimo para un f_c , cada punto es promedio de tres cubos. Tomado de "Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications" Supporting Information, por Dimitar Dimov, Iddo Amit, Olivies Gorrie, Matthew Barnes et al., 2018, p. 10.

Se elaboró cubos de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ de concreto reforzado con grafeno (Figura 62-a y 62-b) reemplazando en una solución de agua en diferentes concentraciones de escamas de grafito (FG) y nanoplaquetas de grado industrial (IG) y se comparó con el concreto estándar para ensayos de resistencia a compresión y flexión (4). En la Figura 62-c, el refuerzo de grafeno proporciona una región más elástica en comparación del concreto estándar, que indica un material más rígido con uniones más fuertes entre cemento y agregados, también una deformación plástica con cambios irreversibles que se deben a los efectos del flujo viscoso de la pasta de cemento hidratada en el hormigón y el crecimiento de microfisuras iniciales que también el comportamiento fue similar a la región elástica (4).

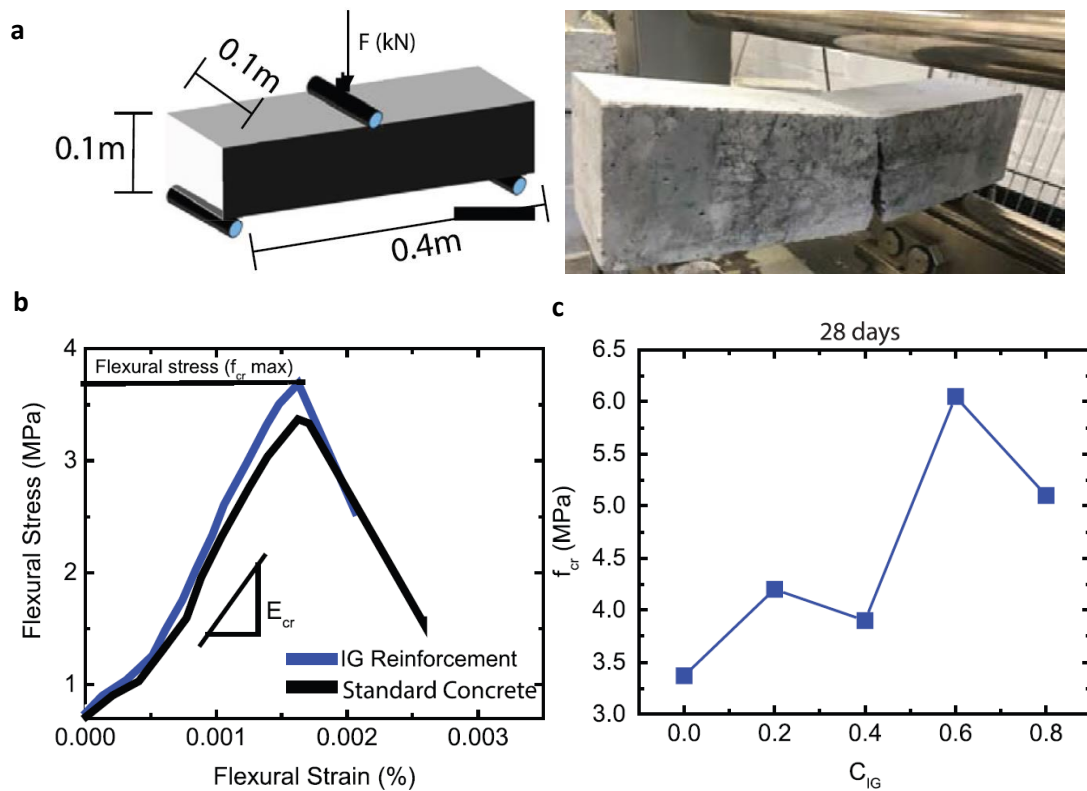


Figura 63. Resistencia a la flexión del concreto reforzado con grafeno. a) Esquema de la resistencia a flexión de una viga de concreto. b) Curva de esfuerzo-deformación de una carga máxima de esfuerzo de flexión y deformación f_{cr} , en concreto estándar y reforzado con grafeno (IG). c) Evolución de la resistencia a la flexión (f_{cr}), con la concentración de IG reforzado en el concreto. Tomado de "Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications", por Dimitar Dimov, Iddo Amit, Olivies Gorrie, Matthew Barnes et al, 2018, p. 4.

En la Figura 62-d, podemos ver el f_c del concreto, donde cada punto es un promedio de tres cubos y obteniendo que el refuerzo de grafeno con una concentración óptima de 0.7 g l^{-1} de IG y 0.59 g l^{-1} de FG, aumenta la resistencia en

26% y 8% respecto al concreto estándar, respectivamente (4). Para determinar estas concentraciones, se realizó otros estudios para determinar la concentración óptima de grafeno por exfoliación en fase líquida para IG y FG, que se visualiza en la Figura 61-f y 61-e (4). Entonces, los resultados muestran que la adición de grafeno por exfoliación en fase líquida aumenta la resistencia a compresión del concreto.

Adicionalmente, también se realizó estudios sobre la resistencia a la flexión (f_{cr}) en vigas rectangulares de $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$, con procedimiento similar a la resistencia a la flexión por el módulo de rotura (f_r), con la diferencia que la fuerzas o cargas son a los dos tercios del tramo (véase Figura 54), y aplica la fuerza al centro de la viga, ver la Figura 63-a, para esto se prepararon vigas para concreto estándar y para IG, donde se visualiza con la curva esfuerzo-deformación (véase Figura 62-b) (4). En la resistencia a flexión, la concentración de grafeno por exfoliación en fase líquida mejoraron sus propiedades, encontrando un óptimo de 0.6 g l^{-1} de IG, que aumentó la resistencia a flexión (f_{cr}) en 79% respecto al concreto estándar a los 28 días de curado, como se visualiza en la Figura 63-c (4).

Entonces, se confirma que el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida aumenta la resistencia a compresión en 26% con 0.7 g l^{-1} de IG y 8% con 0.59 g l^{-1} de FG, en la flexión un 79% con 0.6 g l^{-1} de IG, comparando con los resultados de esta investigación que se obtuvo en resistencia a compresión un aumento en 6.9% con 0.52 g l^{-1} y en la resistencia a la flexión en 11.2% para 0.35 g l^{-1} (4). Esta diferencia en el aumento de la resistencia con la adición de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, pudieron ser por diferentes factores como el agente exfoliante utilizado y la cantidad en proporción utilizada, tiempo de mezclado para la exfoliación por cizallamiento, el tipo de grafito utilizado y la concentración de grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida utilizada, donde precisamente se utilizó el agente exfoliante colato de sodio (NaC) en una proporción de grafito/colato de sodio de 5:1, tiempo de mezclado fue 2 horas o 120 minutos con nanoplaquetas de grafito de grado industrial (IG) y escamas de grafito (FG), y las concentraciones ya mencionadas (4). Por lo tanto, en esta investigación utilizamos el agente exfoliante de PVA en una proporción grafito/PVA de 5:1, con un tiempo de mezcla de 90 minutos, utilizamos grafito en polvo $< 20 \mu\text{m}$ y también con la cantidad de concentración de grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida utilizada que estuvieron detalladas anteriormente. Estos factores pudieron influir en las propiedades de grafeno obtenidas como la longitud, número de capas y espesor, que en consecuencia su adición influye en la resistencia del concreto.

El tiempo de mezcla lo utilizamos de acuerdo a la Figura 41, de la concentración de grafeno, obtenida en función del tiempo utilizando el polímero PVA, donde definimos el tiempo de 90 minutos y la proporción de grafito/PVA en la Tabla 34. Sin embargo, una mezcla en solución es el método más sencillo, para la incorporación de polímero, pero las propiedades de nanocompuestos grafeno/polímeros, pueden ser afectados por el tipo de grafeno utilizado, el tipo de grafeno y el estado de dispersión del grafeno, es decir, la mezcla por cizallamiento, por lo tanto, podría ser por el tipo de grafeno que se ha utilizado para la exfoliación por cizallamiento (22). Además, a medida que aumenta el contenido de grafeno en el compuesto polimérico, se tiene un incremento en el módulo de Young para un compuesto polimérico reforzado con grafeno, entonces pudo ser que al adicionar mayor concentración de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida utilizando PVA como agente exfoliante pudimos obtener mayor resistencia del concreto (21). Entonces, esta mayor concentración de grafeno se puede obtener aumentando el tiempo de mezcla o posiblemente aumentando el contenido del polímero PVA en la mezcla por cizallamiento.

Se utilizó el óxido de grafeno (GO) en el concreto, que es otro derivado de grafeno obtenido por un método químico, sintetizando con el método Hummer modificado y determinó que un 0.08% GO (en función al peso del cemento) aumentó la resistencia a compresión y flexión en 49% y 38% a una edad de 90 días respecto a un concreto estándar, respectivamente (25). Además, el óxido de grafeno actúa como catalizador y ayuda a acelerar la hidratación del cemento, sin causar ningún cambio en los grupos funcionales oxigenados, unidos en las nanoláminas de GO, donde estos grupos funcionales atraen partículas de cemento y la alta relación de área superficial/masa del GO, ayuda en la nucleación para la formación de hidratos de cemento y desarrolla fuertes enlaces covalentes entre la matriz de cemento y GO (25). Entonces, el aumento de resistencia de la adición de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, también podría tener esa reacción química con el cemento. Adicionalmente, se realizó un análisis microestructural con el análisis SEM del cemento hidratado (cristales) a $50\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m}$ cerca de la zona transición interfacial (ITZ) y encontró que la inclusión a partir de 0.06% GO en la mezcla de concreto sufre una mejora significativa con cristales hidratados densificados y poros menores, que pueden atribuirse a la formación de C-S-H junto con C-H cristales laminares y etringita (cristales fibrosos y en forma de aguja) (25). Entonces, los cristales hidratados continúan volviéndose complejos apilados uno sobre otro, de forma masiva y gruesa, que implica que la adición de GO en el concreto es un refuerzo prometedor (25).

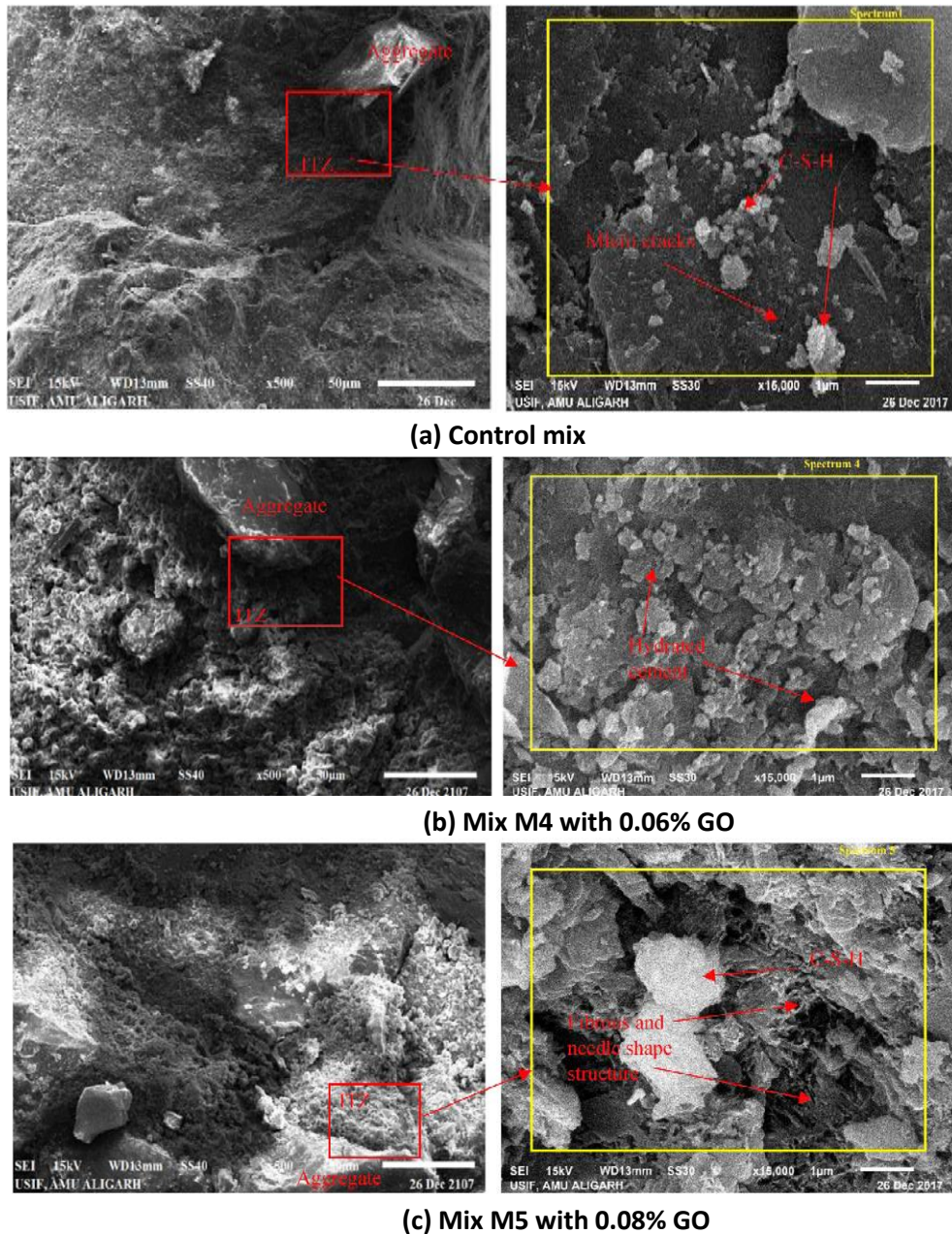


Figura 64. Imágenes SEM (a) concreto 0.0% GO, (b) 0.06% GO, (c) 0.08% GO. Tomado de "Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete", por Devid S.C y Khan R.A, 2019, p. 8.

En otra investigación, se revisó también óxido de grafeno (GO) en el concreto y encontró que hasta una adición del 0.1% GO (respecto al peso del cemento), aumenta la resistencia del concreto a compresión y flexión en 37.5% y 77.7% respectivamente (13). Además, descubrió en otros resultados que las láminas de GO grandes (14 nm de espesor y 900 nm de tamaño medio) mejoraron resistencia a la compresión en un máximo de 63% y las más pequeñas y delgadas (3 nm de espesor y 100 nm de tamaño medio) formó estructuras cristalinas superiores con una mejora de

resistencia máxima del 86%, donde también investigó que disminuyó los poros entre 10-100 nm y aumentó los nanoporos menores a 10 nm, que puede atribuirse a la mejora de la durabilidad del concreto. Entonces, estas investigaciones relacionadas con el aumento de la resistencia del concreto adicionando el óxido de grafeno (GO) está relacionada con un grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida, que también aumenta la resistencia, pero con una estructura química diferente; sin embargo, el efecto del grafeno ayuda en la hidratación del cemento, donde menciona que la fuerte enlace covalente entre el grafeno y cemento puede aumentar la eficiencia de transferencia de carga de la matriz a las láminas de grafeno y se considera que una lámina de grafeno puede entrelazar la matriz de cemento al unir productos de hidratación separados como C-S-H y portlandita (13). Las simulaciones empíricas de dinámica molecular (MD) se encontró la capacidad de unión de C-S-H / grafeno aumenta la polaridad del grupo funcional y los contraiones de Ca^{2+} juegan un papel mediador en las interacciones interfaciales y concluye que la resistencia mecánica de los compuestos C-S-H y láminas de grafeno se rige principalmente por los grupos hidroxilo funcionales y los contraiones de Ca^{2+} mediadores.

Adicionalmente de las investigaciones realizadas, la matriz de cemento se podría también entrelazar con el grafeno obtenido de la exfoliación fase líquida por cizallamiento y para verificar esto, también utilizó grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en el concreto como se detalló en la Figura 62 y 63, donde se menciona que el silicato de calcio hidratado (C-S-H), es uno de los principales elementos responsables de las propiedades mecánicas del concreto (4). Cuando las moléculas de agua y el polvo microcristalino de cemento sufren transformaciones físicas en cristales fibrosos que contienen principalmente silicato de calcio, aluminoferritas e hidróxido de calcio ($Ca(OH)^2$). Además, las monocapas o pocas capas de grafeno tiene una gran superficie específica y un alto módulo de Young, el grafeno interactúa con varios elementos que forman los grandes grupos de elementos C-S-H y altera la morfología de los cristales de hidratación (4). Entonces, debido a la alta energía superficial del grafeno, las partículas C-S-H se unen al grafeno y actúan como sitios de nucleación, promoviendo el crecimiento de geles C-S-H a lo largo de las láminas de grafeno, donde este proceso conduce a un aumento en la fuerza de unión del cemento, se puede explicar también como un plano basal libre de defectos del material de grafeno que forma una plataforma ideal para el crecimiento de cristales C-S-H con mayor grado de cristalinidad que los cristales que se encuentran en un concreto estándar y este grado de cristalinidad es un

parámetro físicos más importantes responsable de las propiedades mecánicas que determina el módulo de Young y la resistencia (4).

Al mismo tiempo, se analizó la permeabilidad de concreto y sugirió que la formación de cristales de hidratación C-S-H y la alta superficie de grafeno forma una red más densa de cristales de cemento entrelazados y disminuir drásticamente la cantidad de agua que pueda penetrar a través de poros capilares, donde esta propiedad es importante para la durabilidad del concreto (4). También se realizó la adición de 0.025% de láminas de grafeno (en función al peso del cemento) aumentó la resistencia a compresión y flexión en 14.9% y 23.6% (27).

Se utilizó grafeno en cantidades de 0.5%, 1% y 1.5% (función al peso del cemento) que aumentó la resistencia en 16% respecto al concreto estándar para estas tres adiciones (28), pero utilizando adiciones de grafeno con una cantidad mucho mayor a otras investigaciones, cuando podemos utilizar adiciones de grafeno en el concreto con cantidades mucho menores, como se detalla en investigaciones. El máximo utilizado para aumentar la resistencia del concreto fue un 0.08% GO (25).

Además, en esta investigación realizada con grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida, utilizamos la óptima concentración de 0.52 g/l, convertido en porcentaje, utilizando el diseño de mezcla de la Tabla 32 con la cantidad de agua de 14 l por grupo y multiplicado por el 0.52 g/l, obtuvimos 7.28 g de grafeno, que dividido entre 21 900 g, que es la cantidad total de cemento por grupo (véase Tabla 32), siendo de ~0.03% de adición de grafeno utilizado. Entonces, se puede no necesitar grandes cantidades de grafeno utilizado para mejorar la resistencia del concreto, con esto podemos optimizar los costos de materiales.

Finalmente, de acuerdo a otras investigaciones, la interacción entre el grafeno y la matriz de cemento aumenta la cristalización en la hidratación del cemento y disminuyendo los poros, que aumentan la resistencia del concreto a compresión y flexión que está relacionado con la durabilidad del concreto; y puede mejorar la vida útil del concreto (1). También debemos tener en cuenta la reacción química del polímero PVA (véase Figura 21) en la matriz de cemento, que se debe estudiar en futuras investigaciones.

4.3.1 Análisis de costos

Se visualiza que el grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida de la exfoliación de grafito por cizallamiento es la producción de grafeno más viable económicamente en la actualidad, por su producción a gran escala que es esencial para su utilización en el concreto (12).

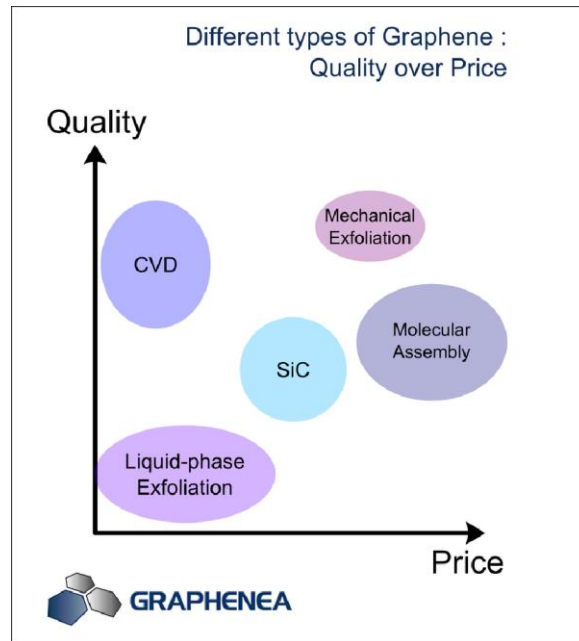


Figura 65. Calidad y precios de diferentes métodos. Tomado de “The investors’ Guide to Graphene”, por Warwick Grigor, 2015, p. 15.

Tabla 52. Cantidad de materiales y recursos utilizados para determinar el costo total.

	Materiales	Precio unitario (inc. IGV) USD	Cantidad				
			SC (0.00 g/l)	GC-1 (0.10 g/l)	GC-2 (0.21 g/l)	GC-3 (0.35 g/l)	GC-4 (0.52 g/l)
Costo directo	Grafito en polvo < 20 μm de sigma aldrich	0.138 USD / Kg	-	27.0 g	90.0 g	153.0 g	216.0 g
	Polímero PVA	0.010 USD / Kg	-	5.4 g	18.0 g	30.6 g	43.2 g
	Cemento	0.1422 USD / Kg	21.9 kg	21.9 kg	21.9 kg	21.9 kg	21.9 kg
	Agregado grueso	0.014 USD / Kg	65.2 kg	65.2 kg	65.2 kg	65.2 kg	65.2 kg
	Agregado fino	0.020 USD / Kg	53.3 kg	53.3 kg	53.3 kg	53.3 kg	53.3 kg
	Agua	0.0009783 USD/l	14.0 l	14.0 l	14.0 l	14.0 l	14.0 l
Costo Indirecto	Energía eléctrica, logística, gastos de operación y otros	54.0 USD	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Entonces, detallamos en la Tabla 49 todas las cantidades de materiales utilizados para cada grupo con el precio unitario estimado. En la Tabla 50, podemos visualizar el costo total de todos los materiales y recursos utilizados para la elaboración de esta investigación con grafeno líquido en la resistencia del concreto. Según (2), el grafeno en el mercado puede estar entre 300 € – 100 €, dependiendo de su calidad y cantidad; sin embargo, el precio del grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida es la gran diferencia para optar por este nanomaterial.

Tabla 53. Costo total del grafeno obtenida por exfoliación en fase líquida y el concreto.

		PRECIO (USD)					TOTAL
	Materiales	SC	GC-1	GC-2	GC-3	GC-4	
		(0.00 g/l)	(0.10 g/l)	(0.21 g/l)	(0.35 g/l)	(0.52 g/l)	
Costo directo	Grafito en polvo < 20 μ m de sigma aldrich	-	3.73	12.42	21.11	29.81	67.07
	Polímero PVA	-	0.06	0.18	0.31	0.43	0.98
	Cemento	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	15.55
	Agregado grueso	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	4.55
	Agregado fino	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	5.35
	Agua	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.07
Costo Indirecto	Energía eléctrica, logística, gastos de operación y otros	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	270.0
COSTO TOTAL	(Dólares americanos USD)	59.11	62.90	71.70	80.52	89.34	363.57

CONCLUSIONES

1. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima - 2021, con el incremento de la resistencia a compresión y flexión del concreto.
2. La concentración óptima de grafeno como adición afecta en la resistencia del concreto, Lima - 2021, con el grupo (GC-4) de 0.52 g/l de concentración de grafeno (CG), obteniendo la máxima resistencia del concreto.
3. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la compresión, Lima – 2021, con el incremento del 6.9% respecto al concreto estándar con una adición de concentración de grafeno (CG) de 0.52 g/l
4. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la flexión, Lima – 2021, con el incremento del 11.2% respecto al concreto estándar con una adición de concentración de grafeno (CG) de 0.35 g/l.

RECOMENDACIONES

1. Se debe evaluar la influencia del concreto a diferentes concentraciones de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición para la resistencia del concreto con tiempos mayores de los 90 minutos para la exfoliación de grafito por cizallamiento y en menor volumen de agua.
2. Se debe analizar el efecto de la exfoliación por cizallamiento a diferentes proporciones del grafito y alcohol polivinílico (PVA); es decir, grafito / PVA para obtener nueva concentración óptima de grafeno como adición en la resistencia del concreto.
3. Se debe determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida con una adición de concentración de grafeno de 0.52 g/l en el concreto para la resistencia a compresión del concreto, el módulo de elasticidad y la curva de esfuerzo-deformación.
4. Se debe analizar la influencia de las lavavajillas y detergentes domésticos como agente exfoliante para obtener grafeno por exfoliación en fase líquida y su adición en la resistencia a flexión del concreto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACAR, Volkan, ÇAKIR, Ferit, UYSAL, Habib, SEYDİBEYOĞLU, M. Özgür, AKBULUT, Hamit and MOSALAM, Khalid M. Strengthening of concrete beams by monolayer prepreg composites with and without graphene reinforcement. *Construction and Building Materials* [online]. 2017. Vol. 151, p. 866–880. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.150. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.150>
2. BBC MUNDO. Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina. [online]. 2017. [Accessed 17 December 2020]. Available from: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41343606>
3. BROWNSON, D. A. C. and BANKS, C. E. *Handbook of graphene electrochemistry* [online]. First Edit. Manchester, UK: Springer, London, 2014. ISBN 978-1-4471-6428-9. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6428-9>
4. CCOPA, H. *Efecto del Grafeno como aditivo nanotecnológico en la resistencia del concreto* [online]. Universidad Nacional del Altiplano, 2017. Available from: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4534>
5. CHAO, E., GONZALES, J. F., OCHOA, R. and VALDÉS, A. Construcción y tecnología en concreto. *Nanotecnología y concreto* [online]. 2016. Vol. 06, No. 02, p. 60.
6. COSS, W. Los sismos y su efecto en las estructuras. *Revista Protocolo* [online]. 2015. [Accessed 18 February 2021]. Available from: <http://www.protocolo.com.mx/internacional/los-sismos-y-su-efecto-en-las-estructuras/>
7. DEVID, S. C. and KHAN, R. A. Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. *Journal of Building Engineering* [online]. 2019. Vol. 27, p. 12. DOI 10.1016/j.jobbe.2019.101007. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101007>
8. DIMOV, D. et al. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications. *Advanced Functional Materials* [online]. 2018. Vol. 28, no. 23, p. 1–12. DOI 10.1002/adfm.201705183. Available from: <https://doi.org/10.1002/adfm.201705183>
9. GALPAYA, D. et al. Recent Advances in Fabrication and Characterization of Graphene-Polymer Nanocomposites. *Graphene* [online]. 2012. Vol. 01, no. 02, p. 30–49. DOI 10.4236/graphene.2012.12005. Available from: <http://dx.doi.org/10.4236/graphene.2012.12005>
10. GARCÍA, G. Cada año se levantan 50 mil viviendas informales, sin licencia de construcción. *La República* [online]. 2019. [Accessed 8 January 2021]. Available from: <https://larepublica.pe/economia/700948-cada-ano-se-levantan-50-mil-viviendas-informales-sin-licencia-de-construccion/>
11. GÉSSICA, F. et al. Produção e Caracterização de Óxido de Grafeno e Óxido de Grafeno Reduzido com Diferentes Tempos de Oxidação Production and Characterization of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide with Different Oxidation Times. *Revista Materia* [online]. 2017. Vol. 22, no. e-11918, p. 10. DOI 10.1590/S1517-707620170005.0254. Available from: <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v22s1/1517-7076-rmat-22-suppl-e11918.pdf>
12. GRIGOR, W. The Investors' Guide to Graphene Graphene-based nanocarbons. *Far East Capital*. 2015. P. 19.
13. HACK, R. et al. Characterization of graphene nanosheets obtained by a modified hummer's method. *Revista Materia* [online]. 2018. Vol. 23, no. 01, p. 11. DOI 10.1590/s1517-707620170001.0324. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0324>
14. HARMSSEN, T. *Diseño de estructuras de Concreto Armado*. Tercera. Lima, Perú: Fondo Editorial PUCP, 2002. ISBN 9681858603.

15. HERNÁNDEZ, C. y QUIROZ, D. M. *Grafeno: estado del arte* [online]. Laboratorio Nacional de Nanotecnología, 2015. Available from:
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/178>
16. KOSMATKA, S. H. *et al. Diseño y control de mezclas de Concreto*. Primera Ed. Illionis - Estados Unidos: Portland Cement Association, 2004. ISBN 0893122335.
17. KUMAR, Ch. V. and PATTAMMATTEL, A. Discovery of graphene and beyond. In: ELSEVIER (ed.), *Introduction to Graphene* [online]. Connecticut, United States: John Fedor, 2017. p. 1–15. ISBN 9780128131824. Available from:
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813182-4.00001-5>
18. KUMAR, Ch. V. and PATTAMMATTEL, A. Synthetic routes to graphene preparation from the perspectives of possible biological applications. In: ELSEVIER (ed.), *Introduction to Graphene* [online]. Connecticut, United States: John Fedor, 2017. p. 17–44. ISBN 9780128131824. Available from:
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813182-4.00002-7>
19. LIU, Jintao, *et al.* Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets. *Construction and Building Materials* [online]. 2019. Vol. 199, p. 1–11.
DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.006. Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.006>
20. MORALES-SOTO, N. and ZAVALA, C. Terremotos en el Litoral Central del Perú: ¿Podría ser Lima el escenario de un futuro desastre? *Revista peruana de medicina experimental y salud pública* [online]. 2008. Vol. 25, no. 2, p. 217–224. Available from:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342008000200011
21. OTTAZZI, G. *Material de Apoyo para la enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado* [online]. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2004. Available from:
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/1055>
22. PASQUEL, E. *Temas de Tecnología del Concreto en el Perú*. Segunda Ed. Lima, Perú: Colegio de Ingenieros del Perú - Consejo Nacional, 1999.
23. PATIÑO, A. R. *et al. Didáctica para elaborar el Proyecto de Tesis*. 2021. Soluciones Gráficas S.A.C. Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-01804. 152 pp. ISBN: 978-612-48221-6-2
24. PATON, K. R. *et al.* Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature Materials* [online]. 2014. Vol. 13, no. 6, p. 624–630. DOI 10.1038/nmat3944. Available from:
<https://doi.org/10.1038/nmat3944>
25. *Perfil de mercado del grafito* [online]. México, 2018. Available from:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419272/Perfil_Grafito_2018_T_.pdf
26. PUCA, M., *et al.* Síntesis de nanocompuestos poliméricos con grafeno y su caracterización mecánica. *Revista de la sociedad Química del Perú* [online]. 2017. Vol. 83, no. 4, p. 65–77. Available from:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2017000100007
27. RAMOS, G. *Efecto de la química superficial del óxido de grafeno en el desarrollo de aplicaciones* [online]. Universidad de Alicante, 2017. Available from:
<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/71402>
28. RIOLA, J. M. *Propiedades y Aplicaciones del grafeno*. España: Secretaría General Técnica, 2019. ISBN 9788497818681.
29. RIVVA, E. *Diseño de Mezclas*. Lima, Perú: Hozlo SCRL., 1992.
30. RIVVA, E. *Naturaleza y Materiales del Concreto* [online]. Primera Ed. Lima, Perú: Capítulo Peruano ACI, 2000. Available from: www.ucacue.edu.ec

31. ROBERT, J. and D'ERCOLE, R. El sismo del 15 de agosto de 2007 en la Margen Izquierda del Río Rímac (Lima). *Bulletin de l'Institut français d'études andines* [online]. 2009. Vol. 38, no. 3, p. 515–526. DOI 10.4000/bifea.2310. Available from: <http://journals.openedition.org/bifea/2310>
32. SHAMSAEI, E. et al. Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2018. Vol. 183, p. 642–660. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.201. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.201>
33. SOLÍS, P. *Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafeno* [online]. Universidad de Oviedo, 2011. Available from: <http://hdl.handle.net/10261/34323>
34. TAVERA, H. Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú. *Instituto Geofísico del Perú* [online]. 2014. P. 43. Available from: repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/777/peligrosismos-Perú.pdf?sequence=1&isAllowed=y
35. WYPYCH, G. Production of Graphene and Its Derivatives. In: ELSEVIER (ed.), *Graphene*. First Edit. Toronto-Canadá: ChemTec, 2019. p. 9–84. ISBN 978-1-927885-51-2.
36. WYPYCH, G. Unique Nature of Graphene. Research Results. In: ELSEVIER (ed.), *Graphene*. First Edit. Toronto-Canadá: ChemTec, 2019. p. 91–153. ISBN 978-1-927885-51-2.
37. XU, Zh. Fundamental properties of graphene. In: ELSEVIER (ed.), *Graphene: Fabrication, Characterizations, Properties and Applications* [online]. Beijing, China: Glyn Jones, 2017. p. 73–102. ISBN 9780128126516. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812651-6.00004-5>
38. ZHEN, Zh. and ZHU, H. Structure and properties of graphene. In: ELSEVIER (ed.), *Graphene: Fabrication, Characterizations, Properties and Applications* [online]. Beijing, China: Glyn Jones, 2017. p. 1–12. ISBN 9780128126516. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812651-6.00001-X>

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia

TÍTULO: INFLUENCIA DEL GRAFENO OBTENIDO POR EXFOLIACIÓN EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO, LIMA - 2021

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	DIMENSIONES	INDICADOR	METODOLOGÍA
GENERAL:	GENERAL:	GENERAL:	VARIABLE INDEPENDIENTE: GRAFENO		>Enfoque: Cuantitativo >Método General: Científico Método Específico: Hipotético - deductivo >Tipo: Aplicada, Tecnológica >Nivel: Explicativo >Diseño: Experimental Puro Muestra de análisis: Grupos SC, GC-1, GC-2, GC-3 y GC-4 para resistencia a compresión y flexión.
¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021?	Determinar la influencia de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021.	El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia del concreto, Lima - 2021.	Exfoliación en fase Líquida	Concentración de grafeno/agua (g/l)	
ESPECÍFICOS:	ESPECÍFICOS:	ESPECÍFICAS:	VARIABLE DEPENDIENTE: RESISTENCIA DEL CONCRETO		TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
1. ¿Cuál es el efecto de la concentración óptima de grafeno como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021? 2. ¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021? 3. ¿Cómo influye el grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021?	1. Determinar el efecto de la concentración óptima de grafeno como adición en la resistencia del concreto, Lima - 2021.	1. La concentración óptima de grafeno como adición afecta en la resistencia del concreto, Lima - 2021.	Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	>Técnica directa: Observación estructurada >Técnica indirecta: Datos secundarios >Instrumentos: Ficha de registro de observación
	2. Determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021.	2. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la compresión del concreto, Lima - 2021.			ESTADÍSTICA
	3. Determinar la influencia del grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021.	3. El grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida como adición influye en la resistencia a la flexión del concreto, Lima - 2021.			> Análisis descriptivo > Análisis inferencial: Prueba paramétrica T-student de muestras relacionadas. >Sig. $\alpha = 5\%$ >Conclusión: Se rechaza la Hipótesis nula H_0
					MUESTRA
					La muestra es probabilística del tipo estratificada
				Módulo de Rotura (Kg/cm ²)	

Anexo B: Validación de Instrumentos



Ficha de Validación por Criterio de Experto

Estimado(a), Reciba un cordial saludo, para informarle que requerimos realizar una VALIDACIÓN POR JUICIO DE EXPERTO de las técnicas e instrumentos utilizados en la Tesis "INFLUENCIA DEL GRAFENO OBTENIDO POR EXFOLIACIÓN EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO, LIMA - 2021", con el autor el Bachiller Jose Omar Cotrina Salvatierra, identificado con el DNI: 71782560. Por tal motivo, recurrimos a usted para solicitar dicha Validación.

1. Datos Generales

- 1.1. Apellidos y nombres del Experto: QUINTANA CACEDA MARIA ESTHER
- 1.2. Grado académico / mención : DOCTOR
- 1.3. N° DNI / Teléfono y/o celular : 07643673 / 949116510
- 1.4. Cargo e institución donde labora: DOCENTE INVESTIGADOR

2. Aspectos de la Evaluación

Indicadores	Criterios	Deficiente	Aceptable	Bueno
		1	3	5
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado y comprensible.			X
2. Objetividad	El instrumento está organizado y expresado en comportamientos observables.		X	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.			X
4. Organización	Presentación ordenada.			X
5. Sufficiencia	Comprende aspectos de las variables en cantidad y calidad suficiente.			X
6. Pertinencia	Permite conseguir datos de acuerdo a los objetivos planteados.		X	
7. Consistencia	Pretende conseguir datos basado en teorías o modelos teóricos.			X
8. Coherencia	Entre variables, dimensiones, indicadores e ítems.			X
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.			X
10. Aplicación	Los datos permiten un tratamiento estadístico pertinente.		X	
Conteo total de marcas		A	B	C

$$\text{Coeficiente de validez} = \frac{1 \times A + 3 \times B + 5 \times C}{50} = \frac{7C+3B}{50} = 0.88$$

3. Opinión de aplicabilidad

Intervalo	Categoría	
[0,20 – 0,40]	No válido, reformular	☐
<0,41 – 0,60]	No válido, modificar	☐
<0,61 – 0,80]	Válido, mejorar	☐
<0,81 – 1,00]	Válido, aplicar	☒

4. Observaciones y/o Recomendaciones

.....

.....

Firma del Experto
DNI. N°07643673....

Ficha de Validación por Criterio de Experto

Estimado(a), Reciba un cordial saludo, para informarle que requerimos realizar una VALIDACIÓN POR JUICIO DE EXPERTO de las técnicas e instrumentos utilizados en la Tesis "INFLUENCIA DEL GRAFENO OBTENIDO POR EXFOLIACIÓN EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO, LIMA - 2021", con el autor el Bachiller Jose Omar Cotrina Salvatierra, identificado con el DNI: 71782560. Por tal motivo, recurrimos a usted para solicitar dicha Validación.

1. Datos Generales

- 1.1. Apellidos y nombres del Experto:Hidalgo Quispe, Omar Augusto.....
- 1.2. Grado académico / mención :Maestro.....
- 1.3. N° DNI/ Teléfono y/o celular :10530220.....
- 1.4. Cargo e institución donde labora:Docente, Universidad Continental.....

2. Aspectos de la Evaluación

Indicadores	Criterios	Deficiente	Aceptable	Bueno
		1	3	5
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado y comprensible.		X	
2. Objetividad	El instrumento está organizado y expresado en comportamientos observables.		X	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.			X
4. Organización	Presentación ordenada.			X
5. Suficiencia	Comprende aspectos de las variables en cantidad y calidad suficiente.			X
6. Pertinencia	Permite conseguir datos de acuerdo a los objetivos planteados.			X
7. Consistencia	Pretende conseguir datos basado en teorías o modelos teóricos.			X
8. Coherencia	Entre variables, dimensiones, indicadores e ítems.			X
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.			X
10. Aplicación	Los datos permiten un tratamiento estadístico pertinente.			X
Conteo total de marcas		A	B	C
		0	2	8

Coefficiente de validez $= \frac{1 \times A + 3 \times B + 5 \times C}{50} = \frac{0.92}{50}$

3. Opinión de aplicabilidad

Intervalo	Categoría	
[0,20 – 0,40]	No válido, reformular	☐
<0,41 – 0,60]	No válido, modificar	☐
<0,61 – 0,80]	Válido, mejorar	☐
<0,81 – 1,00]	Válido, aplicar	☒

4. Observaciones y/o Recomendaciones

.....

.....

Firma del Experto
DNI. N° 10530220.....

Ficha de Validación por Criterio de Experto

Estimado(a), Reciba un cordial saludo, para informarle que requerimos realizar una VALIDACIÓN POR JUICIO DE EXPERTO de las técnicas e instrumentos utilizados en la Tesis "INFLUENCIA DEL GRAFENO OBTENIDO POR EXFOLIACIÓN EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO, LIMA - 2021", con el autor el Bachiller Jose Omar Cotrina Salvatierra, identificado con el DNI: 71782560. Por tal motivo, recurrimos a usted para solicitar dicha Validación.

1. Datos Generales

- 1.1. Apellidos y nombres del Experto: REQUIS CARBAJAL LUIS VILLAR
- 1.2. Grado académico / mención : MAESTRO EN CIENCIAS INGENIERIA CIVIL
- 1.3. N° DNI/ Teléfono y/o celular : 04067813
- 1.4. Cargo e institución donde labora: DIRECTOR DE INGENIERIA CIVIL - UNDAC

2. Aspectos de la Evaluación

Indicadores	Criterios	Deficiente	Aceptable	Bueno
		1	3	5
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado y comprensible.			X
2. Objetividad	El instrumento está organizado y expresado en comportamientos observables.			X
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.			X
4. Organización	Presentación ordenada.			X
5. Suficiencia	Comprende aspectos de las variables en cantidad y calidad suficiente.			X
6. Pertinencia	Permite conseguir datos de acuerdo a los objetivos planteados.			X
7. Consistencia	Pretende conseguir datos basado en teorías o modelos teóricos.			X
8. Coherencia	Entre variables, dimensiones, indicadores e ítems.			X
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación.			X
10. Aplicación	Los datos permiten un tratamiento estadístico pertinente.			X
Cuento total de marcas		A	B	C

Coeficiente de validez $= \frac{1 \times A + 3 \times B + 5 \times C}{50} = \frac{1}{50}$

3. Opinión de aplicabilidad

Intervalo	Categoría	
[0,20 – 0,40]	No válido, reformular	☐
<0,41 – 0,60]	No válido, modificar	☐
<0,61 – 0,80]	Válido, mejorar	☒
<0,81 – 1,00]	Válido, aplicar	☐

4. Observaciones y/o Recomendaciones

.....

.....

Firma del Experto
DNI. N° 04067813..... CIP 76748

Firmado digitalmente por:
REQUIS CARBAJAL Luis
Villar FAU 20154805048 soft
Motivo: Soy el autor del documento



Anexo C: Especificaciones del grafito de Sigma Aldrich

SIGMA-ALDRICH®

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

Email USA: techserv@sial.com

Outside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
Graphite – powder, <20 µm, synthetic

Product Number: 282863
CAS Number: 7782-42-5
MDL: MFCD00144065
Formula: C
Formula Weight: 12.01 g/mol

C

TEST

Specification

Appearance (Color)
Appearance (Form)
Size

Dark Grey to Black
Powder
≤ 20.0 micron

Specification: PRD.0.ZQ5.10000028597

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

Product Name:

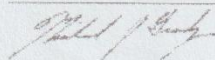
Certificate of Analysis

Graphite - powder, <20 µm, synthetic

Product Number: 282863
Batch Number: SHBM0282
Brand: ALDRICH
CAS Number: 7782-42-5
MDL Number: MFCD00144065
Formula: C
Formula Weight: 12.01 g/mol
Quality Release Date: 17 MAR 2020

C

Test	Specification	Result
Appearance (Color)	Dark Grey to Black	Dark Grey
Appearance (Form)	Powder	Powder
Size	< 20.0 micron	13.2 micron



Michael Grady, Manager
Quality Control
Milwaukee, WI US

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

Version Number: 1

Page 1 of 1



Química Service S.r.l.

PQ. SAN FERNANDO 141 - LA PERLA - PROV. CONST. DEL CALLAO - CALLAO
420-3832 • 420-2339 • FAX: 420-3660

e-mail: informes@quimicaservice.com • Web: www.quimicaservice.com

REACTIVOS QUÍMICOS • MATERIAL DE VIDRIO • MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO
MANTENIMIENTO • REPARACIÓN • SERVICIOS AFINES

R.U.C. N° 20100421195

GUIA DE REMISION REMITENTE

002 - N° 0042157

Fecha de Emisión: 04/08/2021

002-0042157

Señor (es): COTRINA SALVATIERRA JOSE OMAR

R.U.C.:

Factura N°: BPV1-101

Q/C N°: JCS-001

Dirección de Llegada: PSJ. LOS TULIPANES 285 JUNIN-HUANCAYO-EL TAMBO

Dirección de Partida: PQ. San Fernando 141 La Perla - Callao

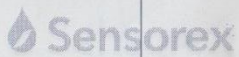
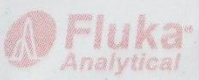
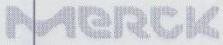
TRANSPORTISTA: CESAR JUNIOR MORALES OLAYA 45063441

- 1.- VENTA
- 2.- VENTA SUJETA A CONFIRMACION
- 3.- CONSIGNACION
- 4.- DEVOLUCION
- 5.- TRASLADO ENTRE BIENES PARA TRANSFORMACION
- 6.- RECOJO DE BIENES TRANSFORMADOS
- 7.- OTROS

MOTIVO

1

Fecha de Traslado: 4 DE AGOSTO DEL 2021

ITEM	CÓDIGO	DESCRIPCION	CANT.	P. UNITARIO	P. TOTAL
01	2282863-1000	GRAFITO X 1KG (SIGMA) (C.S: 11101507) LOTE: SHB0282	8.00		
					

UNIDAD DE TRANSPORTE Y CONDUCTOR

Costo Mínimo de Traslado:

Tipo y N° de Comp. De Pago:

Marca y N° Placa:

Const. de Inscríp. N°:

Lic. de Conducir N°:

"UNA VEZ ACEPTADA LA MERCADERIA
NO SE ACEPTAN CAMBIOS NI DEVOLUCIONES"

p. QUÍMICA SERVICE S.R.L.

RECIBI CONFORME

DESTINATARIO

G.S. INTEGRAL S.A. R.U.C. 20029791005 T. 337 6047 SERIE 002 DEL 41807 AL 43000 AUT. SUJAT. 14483276025 F.T. 09-01-2021

Anexo D: Precio y Certificado de Análisis del Alcohol polivinílico

22/9/21 14:23

INDIQSA
INDUSTRIAL INSUMOS QUÍMICOS S.A.

Boleta de Venta Electrónica - Impresión

www.indiqsa.com
E-mail: indiqsa@gmail.com | Tel.: (01) 474-1089 - Fax: (01) 472-9750 | Cel.: 998-865-425

INDIQSA
INDUSTRIAL INSUMOS QUÍMICOS S.A.
CAL. BENITO PARDO FIGUEROA 147 URB. BALCONCILLO
LA VICTORIA - LIMA - LIMA

BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA
RUC: 20112272365
EB01-1492

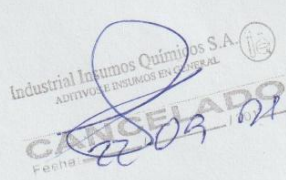
Fecha de Vencimiento :
Fecha de Emisión : **22/09/2021**
Señor(es) : **JOSE OMAR COTRINA**
DNI : **71782560**
Tipo de Moneda : **SOLES**
Observación :

Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario(*)	Descuento(*)	Importe de Venta(**)	ICBPER
2.00	KILOGRAMO	ALCOHOL POLIVINILICO	34.7458	0.00	82.000088	0.00
1.00	UNIDAD	BOLSA PLASTICA INDIQSA	0.000001	0.00	0.30000118	0.30
Otros Cargos :						S/0.00
Otros Tributos :						S/0.00
ICBPER :						S/ 0.30
Importe Total :						S/82.30

SON: OCHENTA Y DOS Y 30/100 SOLES

(*) Sin impuestos.	Op. Gravada :	S/ 69.49
(**) Incluye impuestos, de ser Op. Gravada.	Op. Exonerada :	S/ 0.00
	Op. Inafecta :	S/ 0.00
	ISC :	S/ 0.00
	IGV :	S/ 12.51
	ICBPER :	S/ 0.30
	Otros Cargos :	S/ 0.00
	Otros Tributos :	S/ 0.00
	Monto de Redondeo :	S/ 0.00
	Importe Total :	S/ 82.30

Esta es una representación impresa de la Boleta de Venta Electrónica, generada en el Sistema de la SUNAT. El Emisor Electrónico puede verificarla utilizando su clave SOL, el Adquirente o Usuario puede consultar su validez en SUNAT Virtual: www.sunat.gob.pe, en Opciones sin Clave SOL/ Consulta de Validez del CPE.



AVISO: EL USO DE ESTOS INSUMOS SON POR CUENTA Y RIESGO DEL USUARIO
EMPRESA DESIGNADA COMO BUEN CONTRIBUYENTE SEGÚN RES. N° 0230650123151/SUNAT 01/08/2015 (NO AFECTO A RETENCIÓN DEL IGV)

<https://www1.sunat.gob.pe/ol-ti-itemisionboletera/emitir.do?action=imprimirComprobante&preventCache=1632338614002>



INDIQSA
INDUSTRIAL INSUMOS QUÍMICOS S.A.

ADITIVOS E INSUMOS PARA LABORATORIOS
E INDUSTRIAS EN GENERAL
REPRESENTACIONES Y SERVICIOS

Calle Benito Pardo Figueroa N° 147, Urb. Balconcillo, La Victoria, Lima, Perú
E-mail: indiqsa@gmail.com - chubraqui@ec-red.com | Tel: (01) 474-1089 - Fax: (01) 472-9750

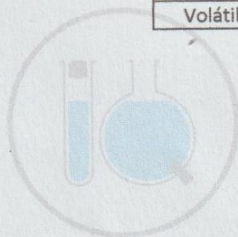
CERTIFICADO DE ANÁLISIS

Certificamos que los datos a continuación remitimos corresponden a los datos recibidos de nuestro proveedor

ALCOHOL POLIVINILICO

PRODUCTO : ALCOHOL POLIVINILICO
LOTE : P0420X2171
PRODUCCIÓN : OCT.21.2020
VENCIMIENTO : ---
PROCEDENCIA : USA

PARÁMETRO	ESPECIFICACIONES	RESULTADO
Cenizas [Na ₂ O] (%)	0.50 máx.	0.43
Grado de hidrolisis (%)	87.00 - 89.00	88.65
Metanol (%)	0.90 máx.	0.58
pH [sol.4%]	4.50 - 6.50	5.30
VOC	1.00 máx.	0.63
Viscosidad Brookfield [sol.4%] (cps)	45.00 - 55.00	50.60
Volátiles [1h/105° C] (%)	5.00 máx.	3.92



INDIQSA

Anexo E: Características del cemento tipo I



Ficha Técnica

CEMENTO SOL

Descripción:

- Es un Cemento Pórtland Tipo I, obtenido de la molienda conjunta de Clinker y yeso.

Beneficios:

- El acelerado desarrollo de resistencias iniciales permite un menor tiempo en el desencofrado.
- Excelente desarrollo de resistencias en Shotcrete.
- Excelente desarrollo en resistencias a la compresión.
- Buena trabajabilidad.

Usos:

- Construcciones en general y de gran envergadura cuando no se requieren características especiales o no especifique otro tipo de cemento.
- Fabricación de concretos de mediana y alta resistencia a la compresión.
- Preparación de concretos para cimientos, sobrecimientos, zapatas, vigas, columnas y techado.
- Producción de prefabricados de concreto.
- Fabricación de bloques, tubos para acueducto y alcantarillado, terrazos y adoquines.
- Fabricación de morteros para el desarrollo de ladrillos, tarrajeos, enchapes de mayólicas y otros materiales.

Características Técnicas:

- Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP-334.009 y la Norma Técnica Americana ASTM C-150.

Formato de Distribución:

- Bolsas de 42.5 Kg: 04 pliegos (03 de papel + 01 film plástico).
- Granel: A despacharse en camiones bombonas y Big Bags.



Recomendaciones

Dosificación:

- Se debe dosificar según la resistencia deseada.
- Respetar la relación agua/cemento (a/c) a fin de obtener un buen desarrollo de resistencias, trabajabilidad y performance del cemento.
- Realizar el curado con agua a fin de lograr un buen desarrollo de resistencia y acabado final.

Manipulación:

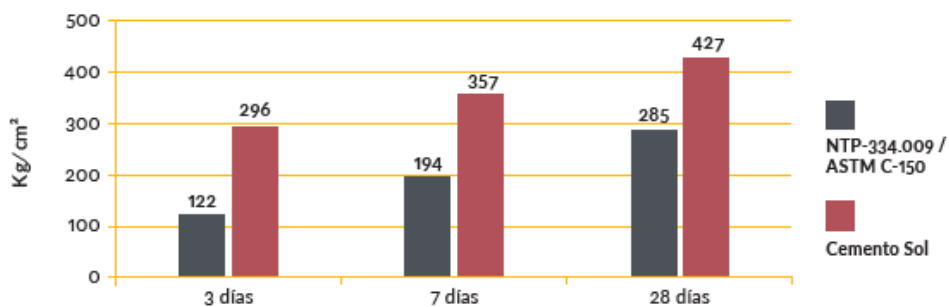
- Se debe manipular el cemento en ambientes ventilados.
- Se recomienda utilizar equipos de protección personal.
- Se debe evitar el contacto del cemento con la piel, los ojos y su inhalación.

Almacenamiento:

- Almacenar las bolsas bajo techo, separadas de paredes y pisos. Protegerlas de las corrientes de aire húmedo.
- No apilar más de 10 bolsas para evitar su compactación.
- En caso de un almacenamiento prolongado, se recomienda cubrir los sacos con un cobertor de polietileno y en dos pallet de altura.

Requisitos mecánicos

Comparación resistencias NTP-334.009 / ASTM C-150 vs. Cemento Sol



Propiedades físicas y químicas

Parámetro	Unidad	Cemento Sol	Requisitos NTP-334.009 / ASTM C-150
Contenido de aire	%	6.62	Máximo 12
Expansión autoclave	%	0.08	Máximo 0.80
Superficie específica	m²/kg	336	Mínimo 260
Densidad	g/ml	3.12	No especifica
Resistencia a la Compresión			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm²	296	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm²	357	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm²	427	Mínimo 285*
Tiempo de Fraguado			
Fraguado Vicat inicial	min	127	Mínimo 45
Fraguado Vicat final	min	305	Máximo 375
Composición Química			
MgO	%	2.93	Máximo 6.0
SO ₃	%	3.00	Máximo 3.5
Pérdida al fuego	%	2.2	Máximo 3.5
Residuo insoluble	%	0.7	Máximo 1.5
Fases Mineralógicas			
C2S	%	11.9	No especifica
C3S	%	54.2	No especifica
C3A	%	10.1	No especifica
C4AF	%	9.7	No especifica

*Requisito opcional

Anexo F: Resultados de laboratorio



Cel.: 916 333 983 / 986 575 242

Fijo: 01 656 6232

informes@jcgeotecniasac.com

Asociación Villa Gloria Mz D Lt 2

Carabayllo - Lima

www.jcgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO	Código Revisión Aprobado	FOR-LTC-AG-001 1 AM-JC
-------------------------------------	--	--------------------------------	------------------------------

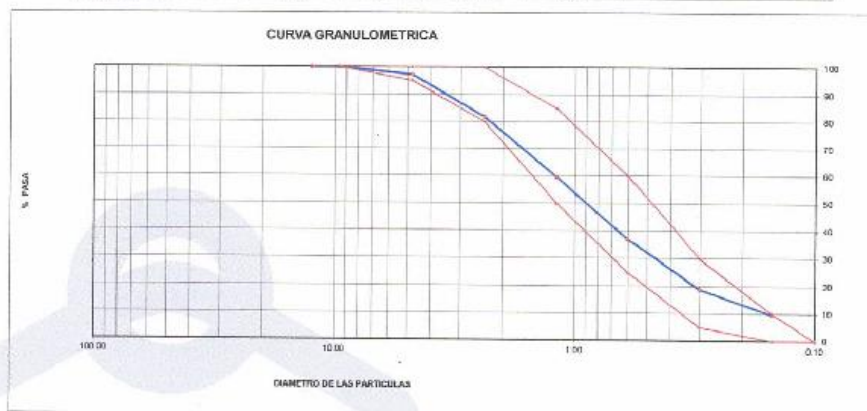
LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO ASTM C136

REFERENCIA	Datos de referencia
SOLICITANTES	Jose Cotrina Salvalleira
TESIS	INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA

Fecha de ensayo: 28/08/2021

MATERIAL	Agregado fino	CANTERA: TRAPICHE
PESO INICIAL HUMEDO (g)	552.0	% W = 1.3
PESO INICIAL SECO (g)	544.8	MF = 2.56

MALLAS	ABERTURA (mm)	MATERIAL RETENIDO		% ACUMULADOS		ESPECIFICACIONES ASTM C 33
		(g)	(%)	Retenido	Pasa	
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	100
Nº4	4.75	14.6	2.7	2.7	97.3	85 - 100
Nº8	2.36	84.6	15.5	16.2	81.8	80 - 100
Nº18	1.18	121.0	22.2	40.4	58.6	50 - 85
Nº30	0.60	123.9	22.7	63.1	36.9	25 - 60
Nº50	0.30	98.1	18.0	81.1	18.9	05 - 30
Nº100	0.15	50.6	9.3	90.4	9.6	0 - 10
FONDO		51.7	9.5	86.6	0.10	



OBSERVACIONES:

* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 JEFE DE LABORATORIO	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Ingeniero de Suelos y Pavimentos	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO	Código	FOR-LTC-AG-002
		Revisión	1
		Aprobado	AM-JC

LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO
ASTM C136

REFERENCIA	Datos de referencia		
SOLICITANTE	Jose Catrina Salvalerra		
TESIS	INFLUENCIA DEL ORAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO		
	EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021		
UBICACIÓN	DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA		
		Fecha de ensayo: 28/08/2021	
MATERIAL	AGREGADO GRUESO	CANTERA: TRAHICHE	
PESO INICIAL HUMEDO (g)	1,384.00	% W =	0.6
PESO INICIAL SECO (g)	1,376.00	MF =	5.58

MALLAS	ABERTURA (mm)	MATERIAL RETENIDO		% ACUMULADOS		ESPECIFICACIONES HUSO #67
		(g)	(%)	Retenido	Pasa	
2"	50.00	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	37.50	0.0	0.0	0.0	100.0	
1"	24.50	0.0	0.0	0.0	100.0	100
3/4"	19.05	132.1	9.6	9.6	90.4	90-100
1/2"	12.50	423.0	30.7	40.3	59.7	
3/8"	9.53	237.3	17.2	57.6	42.4	20-65
Nº 4	4.75	493.1	35.8	93.4	6.6	0-19
Nº 8	2.38	64.2	4.7	98.1	1.9	0-6
Nº 16	1.18	15.9	1.2	99.2	0.8	
FONDO		16.4	0.8	100.0	0.0	



OBSERVACIONES:

- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
- * Según la NORMA ASTM C33, en la tabla de requisitos granulométricos del agregado grueso con el porcentaje que pasa por los tamices normalizados se puede apreciar que la granulometría está dentro del Huso #467

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP Nº 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO PESO UNITARIO (F, G o Glb)	Código	FOR-LTC-AG-018
		Revisión	1
		Aprobado	AM-JC

LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO
 ASTM C29

REFERENCIA	: Datos de referencia
SOLICITANTE	: Jose Cotrina Salvatierra
TESIS	: INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	: DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
Fecha de ensayo: 28/08/2021	

MATERIAL : AGREGADO GRUESO

CANTERA: TRAPICHE

MUESTRA N°	M - 1	M - 2	M - 3
------------	-------	-------	-------

1	Peso de la Muestra + Molde	g	20311	20304	20315
2	Peso del Molde	g	6181	6181	6181
3	Peso de la Muestra (1 - 2)	g	14130	14123	14134
4	Volumen del Molde	cc	9134	9134	9134
5	Peso Unitario Suelto de la Muestra	g/cc	1.547	1.546	1.547

PROMEDIO PESO UNITARIO SUELTO	g/cc	1.547
-------------------------------	------	-------

MUESTRA N°	M - 1	M - 2	M - 3
------------	-------	-------	-------

1	Peso de la Muestra + Molde	g	21264	21261	21269
2	Peso del Molde	g	6181	6181	6181
3	Peso de la Muestra (1 - 2)	g	15083	15080	15087
4	Volumen del Molde	cc	9134	9134	9134
5	Peso Unitario Compactado de la Muestra	g/cc	1.651	1.651	1.652

PROMEDIO PESO UNITARIO COMPACTADO	g/cc	1.651
-----------------------------------	------	-------

OBSERVACIONES:

* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO PESO UNITARIO	Código	FOR-LAB-AG-015
		Revisión	1
		Aprobado	AM-JC

LABORATORIO DE ENSAYOS EN AGREGADOS
ASTM C29

REFERENCIA	: Datos de referencia
SOLICITANTE	: Jose Cotrina Salvatierra
TESIS	: INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	: DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
Fecha de ensayo: 28/08/2021	

MATERIAL : AGREGADO FINO

CANTERA : TRAPICHE

MUESTRA Nº		M - 1	M - 2	M - 3	
1	Peso de la Muestra + Molde	g	6910	6914	6906
2	Peso del Molde	g	2448	2446	2446
3	Peso de la Muestra (1 - 2)	g	4464	4468	4460
4	Volumen del Molde	cc	2627	2627	2627
5	Peso Unitario Suelto de la Muestra	g/cc	1.579	1.500	1.577

PROMEDIO PESO UNITARIO SUELTO	g/cc	1.579
-------------------------------	------	-------

MUESTRA Nº		M - 1	M - 2	M - 3	
1	Peso de la Muestra + Molde	g	7622	7627	7617
2	Peso del Molde	g	2446	2448	2446
3	Peso de la Muestra (1 - 2)	g	5176	5181	5171
4	Volumen del Molde	cc	2627	2627	2627
5	Peso Unitario Compactado de la Muestra	g/cc	1.831	1.832	1.829

PROMEDIO PESO UNITARIO COMPACTADO	g/cc	1.831
-----------------------------------	------	-------

OBSERVACIONES:

* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
		
ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS	Código	FOR-LAB-MS-009
		Revisión	1
		Aprobado	AM-JC

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS
 ASTM C127

REFERENCIA	: Datos de referencia
SOLICITANTE	: Jose Colina Salvatierra
TESIS	: INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACION	: DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
<i>Fecha de ensayo: 28/08/2021</i>	

MATERIAL : AGREGADO GRUESO

CANTERA : TRAPICHE

MUESTRA N°			M - 1	M - 2	PROMEDIO
1	Peso de la Muestra Sumergida Conestilla	A	g	1269.0	1269.0
2	Peso muestra Sat. Sup. Seca	B	g	2014	2014.0
3	Peso muestra Seca	C	g	1998	1998.0
4	Peso específico Sat. Sup. Seca = B/B-A		g/cc	2.70	2.70
5	Peso específico de masa = C/B-A		g/cc	2.68	2.68
6	Peso específico aparente = C/C-A		g/cc	2.74	2.74
7	Absorción de agua = ((B - C)/C)*100		%	0.80	0.80

OBSERVACIONES:

* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 Jefe de Laboratorio	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL / CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Ingeniero de Suelos y Pavimentos	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN	Código	FOR-LAB-AG-013
		Revisión	1
		Aprobado	AM-JC

LABORATORIO DE ENSAYOS EN AGREGADOS
ASTM C128

REFERENCIA	Datos de referencia
SOLICITANTE	Jose Cotrina Salvatierra
TESIS	INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA

Fecha de ensayo: 28/08/2021

MATERIAL : AGREGADO FINO CANTERA : TRAPICHE

MUESTRA N°		M - 1	M - 2	PROMEDIO	
1	Peso de la Arena S.S.S. + Peso Balon + Peso de Agua	g	758	758	758.0
2	Peso de la Arena S.S.S. + Peso Balon	g	256.11	256.11	256.1
3	Peso del Agua (W = 1 - 2)	g	461.80	461.89	461.8
4	Peso de la Arena Seca al Horno + Peso del Balon	g/cc	294.77	294.45	294.61
5	Peso del Balon N° 2	g/cc	196.11	196.11	196.11
6	Peso de la Arena Seca al Horno (A = 4 - 5)	g/cc	98.061	98.34	98.50
7	Volumen del Balon (V = 500)	cc	504.0	504.0	504.0

RESULTADOS

PESO ESPECÍFICO DE LA MASA (P.E.M. = $A/(V-W)$)	g/cc	2.78	2.78	2.78
PESO ESPEC. DE MASA S.S.S. (P.E.M. S.S.S. = $500/(V-W)$)	g/cc	2.80	2.80	2.80
PESO ESPECÍFICO APARENTE (P.E.A. = $A/(V-W) - (500-A)$)	g/cc	2.87	2.87	2.87
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%) $[(500-A)/A \times 100]$	%	1.4	1.4	1.4

OBSERVACIONES:

* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 Jefe de Laboratorio	 ABEL MARCELO BARQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Ingeniero de Suelos y Pavimentos	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO



JC GEOTECNIA LABORATORIO SAC
SUELOS-CONCRETO-ASFALTO

Cel.: 916 333 983 / 986 575 242

Fijo: 01 656 6232

informes@jcgeotecniasac.com

Asociación Villa Gloria Mz D Lt 2
Carabayllo - Lima

www.jcgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-001			
		Revisión	1			
		Aprobado	AM-JC			
		Fecha	1/06/2016			
LABORATORIO DE ENSAYOS EN AGREGADOS Y CONCRETO ACI 211						
REFERENCIA : Datos del Laboratorio SOLICITANTE : Jose Cotrina Salvatierra TESIS : INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021 UBICACIÓN : DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA						
Fecha de ensayo: 04/10/2021						
f'c 210 kg/cm ²						
MATERIAL	PESO ESPECÍFICO g/cc	MODULO FINEZA	HUM. NATURAL %	ABSORCIÓN %	P. UNITARIO S. Kg/m ³	P. UNITARIO C. Kg/m ³
CEMENTO SOL TIPO I	3.12					
AGREGADO FINO - CANTERA TRAPICHE	2.75	2.90	1.3	1.4	1579.0	1631.0
AGREGADO GRUESO - CANTERA TRAPICHE	2.59		0.6	0.8	1547.0	1601.0
A) VALORES DE DISEÑO						
1	ASENTAMIENTO			5	pas	
2	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL			3/4	pas	
3	RELACION AGUA CEMENTO			0.84		
4	AGUA			212.33		
5	TOTAL DE AIRE ATRAPADO %			2.0		
6	VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO			0.37		
B) ANÁLISIS DE DISEÑO						
FACTOR CEMENTO		336		Kg/m ³	7.9	Bts/m ²
Volumen absoluto del cemento				0.1079	m ³ /m ³	
Volumen absoluto del Agua				0.2123	m ³ /m ³	
Volumen absoluto del Aire				0.0200	m ³ /m ³	
VOLUMEN ABSOLUTOS DE AGREGADOS						0.340
Volumen absoluto del Agregado fino				0.2877	m ³ /m ³	
Volumen absoluto del Agregado grueso				0.3721	m ³ /m ³	
SUMATORIA DE VOLUMENES ABSOLUTOS						1.000
C) CANTIDAD DE MATERIALES m³ POR EN PESO SECO						
CEMENTO				336	Kg/m ³	
AGUA				212	Lts/m ³	
AGREGADO FINO				794	Kg/m ³	
AGREGADO GRUESO				997	Kg/m ³	
PESO DE MEZCLA				2349	Kg/m ³	
D) CORRECCIÓN POR HUMEDAD						
AGREGADO FINO HUMEDO				804.5	Kg/m ³	
AGREGADO GRUESO HUMEDO				1003.2	Kg/m ³	
E) CONTRIBUCIÓN DE AGUA DE LOS AGREGADOS						
AGREGADO FINO				0.180	Lts/m ³	
AGREGADO GRUESO				0.200	Lts/m ³	
AGUA DE MEZCLA CORREGIDA						215.1
F) CANTIDAD DE MATERIALES m³ POR EN PESO HUMEDO						
CEMENTO				336	Kg/m ³	
AGUA				215	Lts/m ³	
AGREGADO FINO				804	Kg/m ³	
AGREGADO GRUESO				1003	Kg/m ³	
PESO DE MEZCLA				2359	Kg/m ³	
G) CANTIDAD DE MATERIALES 10.00 kg						
CEMENTO				10.00	Kg	
AGUA				9.39	Lts	
AGREGADO FINO				23.91	Kg	
AGREGADO GRUESO				29.81	Kg	
PORPORCIÓN EN PESO p3 (húmedo)						
C	1.0					
A.F	2.39					
A.G	2.98					
H2o	0.6					
PORPORCIÓN EN m3						
C	1.0					
A.F	2.81					
A.G	3.47					
H2o	2.0					
Elaborado por:		Revisado por:		Aprobado por:		
ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221450 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.		ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221450 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.		CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.		
Jefe de Laboratorio		Ingeniero de Suelos y Pavimentos		Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO		

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	AM-JC
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
 ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	Datos de laboratorio
SOLICITANTE	Jose Cotrina Salvatierra
PROYECTO	INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
Fecha de emisión: 23/10/2021	

IDENTIFICACIÓN DE ESPECIMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F'c Diseño kg/cm ²	% F'c
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	23/10/2021	3	13470	78.5	171.5	210.0	81.7
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	23/10/2021	3	13560	78.5	172.7	210.0	82.2
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	23/10/2021	3	13790	78.5	175.6	210.0	83.6
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	23/10/2021	3	13530	78.5	172.3	210.0	82.0
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	23/10/2021	3	14230	78.5	181.2	215.0	84.3
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	23/10/2021	3	13810	78.5	175.8	216.0	81.4
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	23/10/2021	3	14580	78.5	185.6	218.0	85.2
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	23/10/2021	3	14240	78.5	181.3	219.0	82.8
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	23/10/2021	3	13770	78.5	175.3	220.0	79.7
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	23/10/2021	3	14510	78.5	184.7	222.0	83.2
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	23/10/2021	3	13890	78.5	176.9	223.0	79.3
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	23/10/2021	3	13880	78.5	176.7	224.0	78.9
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	23/10/2021	3	15030	78.5	191.4	226.0	84.7
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	23/10/2021	3	14830	78.5	188.8	227.0	83.2
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	23/10/2021	3	14190	78.5	180.7	228.0	79.2

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb. división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material retentante
- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 Jefe de Laboratorio	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	AM-JC
		Fecha	18/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
 ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	: Datos de laboratorio
SOLICITANTE	: Jose Cotrina Salvatierra
PROYECTO	: INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	: DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
Fecha de emisión: 27/10/2021	

IDENTIFICACIÓN DE ESPECIMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F _c Diseño kg/cm ²	% F _c
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	27/10/2021	7	17060	78.5	217.2	210.0	103.4
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	27/10/2021	7	17420	78.5	221.8	210.0	105.6
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	27/10/2021	7	17850	78.5	227.3	210.0	108.2
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	27/10/2021	7	18480	78.5	235.3	210.0	112.0
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	27/10/2021	7	17780	78.5	226.4	215.0	105.3
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	27/10/2021	7	17920	78.5	228.2	215.0	105.6
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	27/10/2021	7	17360	78.5	221.0	218.0	101.4
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	27/10/2021	7	17120	78.5	218.0	219.0	99.5
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	27/10/2021	7	17970	78.5	228.8	220.0	104.0
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	27/10/2021	7	18240	78.5	232.2	222.0	104.6
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	27/10/2021	7	18340	78.5	233.5	223.0	104.7
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	27/10/2021	7	18040	78.5	229.7	224.0	102.5
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	27/10/2021	7	18270	78.5	232.6	226.0	102.9
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	27/10/2021	7	18500	78.5	235.5	227.0	103.8
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	27/10/2021	7	18630	78.5	237.2	228.0	104.0

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material retentante
- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 Jefe de Laboratorio	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP Nº 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Ingeniero de Suelos y Pavimentos	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C. Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	AM-JC
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	Datos de laboratorio
SOLICITANTE	Jose Catrina Salvatierra
PROYECTO	INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
Fecha de emisión: 03/11/2021	

IDENTIFICACIÓN DE ESPECÍMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F _c Diseño kg/cm ²	% F _c
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	3/11/2021	14	18790	78.5	239.2	210.0	113.9
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	3/11/2021	14	19120	78.5	243.4	210.0	115.9
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	3/11/2021	14	18890	78.5	240.5	210.0	114.5
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	3/11/2021	14	19180	78.5	244.2	210.0	116.3
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	3/11/2021	14	19440	78.5	247.5	215.0	115.1
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	3/11/2021	14	19420	78.5	247.3	216.0	114.5
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	3/11/2021	14	19980	78.5	254.4	218.0	116.7
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	3/11/2021	14	19050	78.5	242.6	219.0	110.8
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	3/11/2021	14	19730	78.5	251.2	220.0	114.2
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	3/11/2021	14	19760	78.5	251.6	222.0	113.3
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	3/11/2021	14	20620	78.5	262.5	223.0	117.7
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	3/11/2021	14	19840	78.5	252.6	224.0	112.8
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	3/11/2021	14	20790	78.5	264.7	226.0	117.1
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	3/11/2021	14	20380	78.5	259.5	227.0	114.3
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	3/11/2021	14	21060	78.5	268.1	228.0	117.6

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- No se observaron fallas atípicas en las roturas
- El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material retentante
- Prohíbese la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 Jefe de Laboratorio	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	AM-JC
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	: Datos de laboratorio
SOLICITANTE	: Jose Gotina Salvatierra
PROYECTO	: INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021
UBICACIÓN	: DISTRITO DE CARABAYLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA
Fecha de emisión: 17/11/2021	

IDENTIFICACIÓN DE ESPECÍMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F'c Diseño kg/cm ²	% F'c
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	17/11/2021	28	20710	78.5	263.7	210.0	125.6
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	17/11/2021	28	20960	78.5	266.9	210.0	127.1
Standard Concrete (SC)	20/10/2021	17/11/2021	28	20050	78.5	255.3	210.0	121.6
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	17/11/2021	28	21740	78.5	276.8	210.0	131.8
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	17/11/2021	28	20820	78.5	265.1	215.0	123.3
Graphene Concrete 1 (GC - 1)	20/10/2021	17/11/2021	28	21020	78.5	267.6	216.0	123.9
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	17/11/2021	28	21540	78.5	274.3	218.0	125.8
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	17/11/2021	28	21120	78.5	268.9	219.0	122.8
Graphene Concrete 2 (GC - 2)	20/10/2021	17/11/2021	28	21780	78.5	277.3	220.0	126.1
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	17/11/2021	28	21720	78.5	276.5	222.0	124.6
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	17/11/2021	28	21320	78.5	271.5	223.0	121.7
Graphene Concrete 3 (GC - 3)	20/10/2021	17/11/2021	28	21960	78.5	279.6	224.0	124.8
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	17/11/2021	28	21420	78.5	272.7	226.0	120.7
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	17/11/2021	28	22540	78.5	287.0	227.0	126.4
Graphene Concrete 4 (GC - 4)	20/10/2021	17/11/2021	28	21990	78.5	280.0	228.0	122.8

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material refrentante.
- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
 Jefe de Laboratorio	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	FORMATO	Código	AE-FO-124
	MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ROTURA DEL HORMIGÓN - CONCRETO	Versión	01
		Fecha	30-04-2021
		Página	1 de 1

TESIS : INFLUENCIA DEL GRAFENO EN FASE LÍQUIDA COMO ADICIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DE LIMA, 2021

SOLICITANTE : Jose Colina Salvatierra

UBICACIÓN DE PROYECTO : DISTRITO DE CARABAYLLO, PROVINCIA DE LIMA, DEPARTAMENTO DE LIMA

FECHA DE EMISIÓN: 17/11/2021

FECHA DE ENSAYO : 17/11/2021

Tipo de muestra : Concreto endurecido

Presentación : Especímenes prismáticos

F'c de diseño : 210 kg/cm²

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO ENDURECIDO ASTM C78

IDENTIFICACIÓN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD	UBICACIÓN DE FALLA	LUZ LIBRE	MÓDULO DE ROTURA
Standard Concrete	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	33 kg/cm ²
Standard Concrete	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	36 kg/cm ²
Standard Concrete	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	34 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC -1)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	37 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC -1)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	36 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC -1)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	38 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC -2)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	38 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC -2)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	36 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC -2)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	35 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC-3)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	36 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC-3)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	37 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC-3)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	38 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC-4)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	37 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC-4)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	40 kg/cm ²
Graphene Concrete (GC-4)	20/10/2021	17/11/2021	28 días	2	45.0	37 kg/cm ²

OBSERVACIONES:

- * Muestras Proporcionadas por el solicitante
- * Las muestras cumplen con las dimensiones dadas en la norma de ensayo.
- * Prohibida la reproducción total o parcial del presente documento sin la autorización escrita de JC GEOTECNIA LABORATORIO.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
	 ABEL MARCELO PASQUEL INGENIERO CIVIL - CIP N° 221456 JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.	 CONTROL DE CALIDAD JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad JC GEOTECNIA LABORATORIO

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

TC - 06274 - 2021

PROFORMA : 1503B

Fecha de emisión: 2021 - 05 - 03

Página : 1 de 2

SOLICITANTE : JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Dirección : Mza. D Lote. 02 A.V. Villa Gloria Lima-Lima-Carabaylo

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : PRESNA DE CONCRETO

Marca : HIWEIGH

Modelo : X8

N° de Serie : 752

Intervalo de Indicación : 0 kg a 30000 kg

División de Escala : 1 kg

Diámetro de Rosca : 1/4" NPT

Posición de Trabajo : Vertical

Procedencia : PERU

Identificación : No Indica

Fecha de Calibración : 2021 - 04 - 21

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Instalaciones de JC GEOTECNIA LABORATORIO S.A.C.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se efectuó por comparación indirecta utilizando el PIC-023 "Procedimiento para la Calibración de Prensas, celdas y anillos de carga".

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados de acuerdo al uso.

CONDICIONES AMBIENTALES

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	26,2 °C	26,6 °C
Humedad Relativa	56,3 %	58,4 %
Presión	1 005,0 hPa	1 005,0 hPa

Los resultados en el presente documento no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.



Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
CFP: 0316



Certificado : TC - 06274 - 2021
Página : 2 de 2

TRAZABILIDAD

Patrón de Referencia	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrón de Referencia del DM-INACAL	Manómetro de 0 bar a 700 bar Clase de Exactitud 0,05	LFP-C-043-2020

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Indicación del Instrumento a Calibrar (kg)	Indicación del Instrumento Patrón Ascenso (kg) Descenso (kg)		Error			Incertidumbre (kg)
			de Indicación Ascenso (kg) Descenso (kg)		de Histéresis (kg)	
	0	0	0	0		
1 000	995	988	5	12	7	27
5 440	5 434	5 426	6	14	8	27
10 040	10 023	10 015	17	25	8	27
15 050	15 034	15 026	16	24	8	27
20 100	20 085	20 076	15	24	9	27
30 100	30 086	30 078	14	22	8	27

Máximo Error Absoluto de Indicación:	25	kg
Máximo Error Absoluto de Histéresis:	9	kg

OBSERVACIONES

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

DECLARACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA U

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO



Jr. Condesa de Lemos N°117
San Miguel, Lima

(01) 262 9536
(51) 988 901 065

informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

Certificado



La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad - INACAL, en el marco de la Ley N° 30224, **OTORGA** el presente certificado de Renovación de la Acreditación a:

TEST & CONTROL S.A.C.

Laboratorio de Calibración

En su sede ubicada en: Calle Condessa de Lemos N° 117, Urb. San Miguelito, distrito de San Miguel, provincia de Lima y departamento de Lima

Con base en la norma

NTP-ISO/IEC 17025:2006 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Certificados de Calibración con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-act-OSP-21F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número de registro indicado líneas abajo.

Fecha de Renovación: 24 de marzo de 2019

Fecha de Vencimiento: 23 de marzo de 2023

ESTELA CONTRERAS JUGO
Directora, Dirección de Acreditación - INACAL

Cédula N° : 230-2019-INACAL/DA

Contrato N° : Adenda al Contrato de Acreditación N°004-16/INACAL-DA

Registro N° : IC-016

Fecha de emisión: 05 de junio de 2019

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación y cédula de notificación dado que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, reducciones, actualizaciones y suspensiones temporales. El alcance y vigencia debe confirmarse en la página web www.inacal.gob.pe/acreditacion/categorias/acreditados al momento de hacer uso del presente certificado.

La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral (OLLA) del Inter American Accreditation Co-operation (IAAC) e International Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-act-01P-02M Ver. 02

Anexo G: Evidencias fotográficas



Elaboración del concreto con grafeno



Temperatura del agua en la mezcla



Grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida obtenida.



Concentraciones de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida.



Adición de grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida en el concreto.



Grafeno obtenido por exfoliación en fase líquida y la decantación por gravedad.

Ensayo de resistencia a la compresión – Edad 3 días

Concreto estándar – SC (C_G 0.00 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 1 (C_G 0.10 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 2 (C_G 0.21 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 3 (C_G 0.35 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 4 (C_G 0.52 g/l)



Ensayo de resistencia a la compresión – Edad 7 días

Concreto estándar – SC (C_G 0.00 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 1 (C_G 0.10 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 2 (C_G 0.21 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 3 (C_G 0.35 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 4 (C_G 0.52 g/l)



Ensayo de resistencia a la compresión – Edad 14 días

Concreto estándar – SC (C_G 0.00 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 1 (C_G 0.10 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 2 (C_G 0.21 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 3 (C_G 0.35 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 4 (C_G 0.52 g/l)



Ensayo de resistencia a la compresión – Edad 28 días

Concreto estándar – SC (C_G 0.00 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 1 (C_G 0.10 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 2 (C_G 0.21 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 3 (C_G 0.35 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 4 (C_G 0.52 g/l)



Ensayo de resistencia a la flexión – Edad 28 días

Concreto estándar – SC (C_G 0.00 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 1 (C_G 0.10 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 2 (C_G 0.21 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 3 (C_G 0.35 g/l)



Concreto con grafeno, GC – 4 (C_G 0.52 g/l)



Anexo H: Cálculo y comprobación estadística

T-STUDENT PARA 3 DÍAS - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

GRUPO GC-1

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	17642,6667	3	448,48671	258,93393
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	17324,6667	3	209,95793	121,21927

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	3	,159	,898

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A COMPRESIÓN 3 DÍAS	318,0000	464,02478	267,90483	-834,70146	1470,70146	1,187	2	,357

GRUPO GC-2

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	180,7600	3	5,17696	2,98892
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	173,2467	3	2,09958	1,21219

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	3	-,988	,100

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A COMPRESIÓN 3 DÍAS	7,51333	7,25825	4,19055	-10,51717	25,54383	1,793	2	,215

GRUPO GC-3

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	179,4433	3	4,59610	2,65356
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	173,2467	3	2,09958	1,21219

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	3	-,725	,483

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	6,19667	6,28745	3,63006	-9,42223	21,81556	1,707	2	,230

GRUPO GC-4

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	186,9533	3	5,58890	3,22675
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	173,2467	3	2,09958	1,21219

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	3	-,999	,029

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DÍAS	13,70667	7,68695	4,43806	-5,38878	32,80211	3,088	2	,091

T-STUDENT PARA 7 DÍAS - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

GRUPO GC-1

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	229,9433	3	4,71511	2,72227
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	222,0933	3	5,03641	2,90777

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	3	-,722	,486

		Prueba de muestras emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Diferencias emparejadas							
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	7,85000	9,04951	5,22474	-14,63024	30,33024	1,502	2	,272

GRUPO GC-2

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	222,6033	3	5,57895	3,22101
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	222,0933	3	5,03641	2,90777

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	3	,732	,477

Prueba de muestras emparejadas							t	gl	Sig. (bilateral)
Diferencias emparejadas									
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	,51000	3,92080	2,26368	-9,22982	10,24982	,225	2	,843

GRUPO GC-3

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	231,8133	3	1,94541	1,12318
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	222,0933	3	5,03641	2,90777

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	3	-,693	,513

		Prueba de muestras emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Diferencias emparejadas							
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	9,7200 0	6,53629	3,77373	-6,51705	25,95705	2,576	2	,123

GRUPO GC-4**Estadísticas de muestras emparejadas**

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	235,1233	3	2,31962	1,33923
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	222,0933	3	5,03641	2,90777

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	3	,978	,134

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas				t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior Superior			
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS	13,0300 0	2,81005	1,62239	6,04944 20,01056	8,031	2	,015

T-STUDENT PARA 14 DÍAS - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**GRUPO GC-1****Estadísticas de muestras emparejadas**

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	246,3300	3	1,84057	1,06265
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	241,0633	3	2,15398	1,24360

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	3	,779	,431

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas				t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior Superior			
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	5,2666 7	1,35950	,78491	1,88949 8,64385	6,710	2	,021

GRUPO GC-2**Estadísticas de muestras emparejadas**

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	249,3833	3	6,12772	3,53784
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	241,0633	3	2,15398	1,24360

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	3	-,999	,023

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	8,32000	8,28062	4,78082	-12,25021	28,89021	1,740	2	,224

GRUPO GC-3

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	255,5800	3	6,04907	3,49243
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	241,0633	3	2,15398	1,24360

Correlaciones de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	3	,977	,137

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	14,51667	3,97125	2,29280	4,65153	24,38180	6,331	2	,024

GRUPO GC-4

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	264,1133	3	4,35576	2,51480
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	241,0633	3	2,15398	1,24360

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	3	-,762	,448

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			

Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 14 DÍAS	23,05000	6,15763	3,55511	7,75360	38,34640	6,484	2	,023
-------	---	----------	---------	---------	---------	----------	-------	---	------

T-STUDENT PARA 28 DÍAS - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

GRUPO GC-1

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	269,8400	3	6,15988	3,55641
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	261,9467	3	5,98844	3,45743

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	3	,047	,970

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	7,89333	8,38597	4,84164	-12,93856	28,72523	1,630	2	,245

GRUPO GC-2

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	273,4933	3	4,25216	2,45498
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	261,9467	3	5,98844	3,45743

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	3	-,916	,262

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	11,54667	10,03072	5,79124	-13,37103	36,46437	1,994	2	,184

GRUPO GC-3

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	275,8667	3	4,11775	2,37738
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	261,9467	3	5,98844	3,45743

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	3	-,921	,254

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	13,92000	9,91260	5,72304	-10,70426	38,54426	2,432	2	,136

GRUPO GC-4

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	279,9033	3	7,13040	4,11674
	SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	261,9467	3	5,98844	3,45743

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	3	,255	,836

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	17,95667	8,05588	4,65107	-2,05525	37,96859	3,861	2	,061

T-STUDENT PARA 28 DÍAS - RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

GRUPO GC-1

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	36,7533	3	,94744	,54700
	SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	34,0867	3	1,84868	1,06734

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	3	-,793	,417

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			

Par 1	GC-1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	2,666 67	2,66333	1,53768	-3,94941	9,28275	1,734	2	,225
-------	---	-------------	---------	---------	----------	---------	-------	---	------

GRUPO GC-2

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	36,3100	3	1,80033	1,03942
	SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	34,0867	3	1,84868	1,06734

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	3	-,308	,801

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	2,2233 3	2,95084	1,70367	-5,10695	9,55362	1,305	2	,322

GRUPO GC-3

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	37,9100	3	,62952	,36346
	SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	34,0867	3	1,84868	1,06734

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	3	,566	,617

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	3,823 33	1,58039	,91244	-,10257	7,74924	4,190	2	,053

GRUPO GC-4

Estadísticas de muestras emparejadas

		Media	N	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	37,8233	3	1,54455	,89175
	SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	34,0867	3	1,84868	1,06734

Efectos de muestras emparejadas

		N	Correlación	Sig.
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS & SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	3	,979	,131

Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilatera l)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	GC-4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS - SC RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 28 DÍAS	3,73667	,46188	,26667	2,58929	4,88404	14,012	2	,005