



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

SEDE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Estudio del grafeno sobre las propiedades mecánicas del hormigón

Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: PhD Johanna Castaño Agudelo

Alumno: Walter Díaz Herrera

Concepción, Diciembre 2018

© (Walter Jhonson Díaz Herrera)

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

HOJA DE CALIFICACIÓN

En Concepción, el _____ los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Walter Jhonson Díaz Herrera de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para Optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesor PhD Johanna Castaño Agudelo

Profesor MSc Patricio Uarac

Este trabajo está dedicado a mi madre y a mi hermana pequeña.

“Soy de las que piensa que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es solo un técnico: es también un niño colocado ante fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas”.

-Marie Curie.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a la persona más importante de mi existencia, que a pesar de lo difícil que ha sido este camino, jamás dejó de creer en mí; a la persona incondicional que tengo, a quien más me ama en este corto bypass llamado vida, mi madre; Jaqueline Herrera. También agradecer a mi hermana Bárbara Gutiérrez, mi guagua, quien con su amor y dulzura siempre fue un oasis en los momentos más difíciles. Son las personas más importantes de mi universo. Y obviamente a mi tío Benjamín Gutiérrez, mi segundo padre; que, a pesar de no tener obligación moral en ayudarme, siempre ha estado conmigo para apoyarme cuando lo necesito.

En segundo lugar, agradecer a mi padre, Fernando Díaz, el cual indirectamente me dio fuerzas para ser lo que siempre he querido lograr.

En cuarto lugar, a mi hermano que elegí en vida, Javier Verdugo.

En quinto lugar, a mi tía Patricia Díaz, y a mi primo Claudio Soto; por su incondicional apoyo.

En sexto lugar, agradecer a todos mis amigos, por su apoyo invaluable, por su compañía, por las risas, por los momentos recordados y los no recordados. A Nicolás Bañados, Carlos Islas, Omar Morales, Nicolás “Caesita” Puentes, Valentina Valdés, Jorge Fernández y Ángel Sandoval.

En séptimo lugar, agradecer a mi profesora guía Johanna Castaño, la cual siempre tuvo un tiempo para mí en los momentos cuando me sentía confundido. Profesora, sin usted, esto no hubiera sido posible.

Finalmente agradecer a todas las personas que se cruzaron a lo largo de mi vida, incluso a quienes quizás no tuvieron una incidencia positiva en esta, ya que, metafóricamente hablando, ellos fueron el combustible que echó a andar este motor. Motor compuesto por los anteriormente mencionados, el cual me trajo hoy hasta aquí, al punto de decir que soy Ingeniero Civil.

RESUMEN

El hormigón ha sido uno de los elementos de construcción más habituales a lo largo de la historia. Según indicios, se cree que el hormigón se comenzó a utilizar en los antiguos pueblos del mar Mediterráneo, precisamente en la antigua Macedonia y Minoa en Grecia, en el año 500 antes de Cristo. Sin embargo, este hormigón no se asemeja al de la actualidad, ya que estos pueblos utilizaban como principal materia prima cemento natural. A diferencia de las civilizaciones antiguas mencionadas, fueron los romanos quienes construyeron con un hormigón similar al actual, puesto que utilizaron puzolana como principal compuesto, material extraído de los volcanes al sur de Italia; que al mezclarse con agua y cal daba como resultado un hormigón más resistente.

Con el paso de los años, las civilizaciones modernas comenzaron a innovar en el hormigón, modificando principalmente el cemento; lo cual abrió paso a los utilizados actualmente, como lo son, por ejemplo, el cemento portland, siderúrgico y las mezclas de los existentes, como lo son el cemento portland siderúrgico, portland puzolánico, entre otros. Lo cual le da características específicas al hormigón.

Este trabajo de investigación tiene por finalidad identificar un cambio en las propiedades mecánicas del hormigón al aditivar éste con grafeno.

Para determinar la influencia del grafeno en el hormigón, se confeccionaron mezclas de prueba de graduación G17, las cuales se constituyeron de, un hormigón patrón sin aditivación, y dos mezclas aditivadas con grafeno en dosis de 4 y 21 gramos. Las resistencias del hormigón aditivado se comparó con la del hormigón patrón.

Los resultados muestran que al agregar grafeno en la mezcla de hormigón existe una importante variación en la resistencia a la compresión, observándose una pérdida de capacidad del 9% en la aditivación de 4 gramos; mientras que en la aditivación de 21 gramos aumenta dicha resistencia en un 7%.

ABSTRACT

Concrete has been one of the most used materials for construction through history. It has commonly been assumed that the use of concrete began in the ancient Macedonia and Minoa in Greece (500 BC), near the Mediterranean Sea. However, this specific concrete doesn't resemble the one used at the present time, since this ancient civilizations used cement as their raw materials. On the contrary, the Romans used for building a concrete that resembles the one used nowadays, due to the fact that pozzolan was their their main compound, which was extracted volcanos, located in southern Italy. Mixing water and cal resulted in a reinforced concrete.

Over the years, modern civilizations began to innovate their concretes, mainly modifying the cement, which opened a path to the ones used today such as: portland cement, iron and steel industry and the different mixtures applied today like portland iron and steel cement and portland pozzolanic cement among others. This gives specific features to the concrete.

This research work aims to identify a change in the mechanical properties of concrete with graphene.

To determine the influence of graphene in the concrete, the investigation needed a test mixture of graduation G17, this mixture consisted of, concrete base without additives, and two mixtures with graphene in doses of 4 and 21 grams. The resistance of the concrete with graphene was then compare with the concrete base without additives.

The results show that when graphene is added to the mixture of concrete it produces a significant variation to the resistance of compression, showing a loss in the capacity of 9% in the additive of 4 grams; meanwhile the additivities of 21 grams increase the resistance in a 7%.

ÍNDICE

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación y Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Alcances.....	3
1.4 Metodología.....	4
1.4.1 Metodología para hormigón convencional.....	4
1.4.2 Metodología para hormigón con grafeno como aditivo.....	6
1.4.3 Metodología de análisis.....	9
CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO	10
2.1 Generalidades del hormigón.....	10
2.1.1 Constituyentes del hormigón.....	11
2.2 Generalidades del grafeno.....	23
2.2.1 Fabricación de grafeno.....	25
2.3 Máquina para ensayo de compresión.....	29
2.4 Cálculo del volumen de probetas cilíndricas.....	30
2.5 Cálculo de la densidad de probetas cilíndricas.....	31
CAPITULO 3 RESULTADOS	32
3.1 Generalidades de la experimentación.....	32

Índice	
3.2 Procedimiento.....	32
3.2.1 Dimensión y peso de probetas.....	32
3.2.2 Carga y rotura de probetas.....	34
3.3 Resultado de los ensayos.....	34
CAPITULO 4 Conclusión y discusión	41
Bibliografía	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Dosificación para hormigón convencional.....	4
Tabla 1.2: Cantidades porcentuales y orden de vertimiento de los materiales en la betonera	5
Tabla 1.3: Dosificación del hormigón con 4 gramos de grafeno como aditivo.....	6
Tabla 1.4: Dosificación del hormigón con 21 gramos de grafeno como aditivo.....	7
Tabla 1.5: Cantidades porcentuales y orden de vertimiento de los materiales en la betonera	8
Tabla 2.1: Clasificación del cemento de acuerdo con el contenido de materias primas	14
Tabla 2.2: Cambio de nomenclatura en relación de óxido de calcio vs arcilla....	15
Tabla 2.3: Leyes de caliza según contenido de CaCO_3	16
Tabla 2.4: Resumen de lo óxidos principales de las materias primas.....	17
Tabla 2.5: Propiedades aportadas al cemento por componentes principales de clínquer	19
Tabla 2.6: Requisitos químicos básicos del agua de amasado.....	23
Tabla 3.1: Diámetro, altura, masa y densidad aparente de cada probeta analizada.....	33
Tabla 3.2: Densidades aparentes promedio para cada tipo de hormigón analizado.....	33
Tabla 3.3: Resultados carga máxima y resistencia máxima de las probetas ensayadas	35

Índice

Tabla 3.4: Promedio carga máxima y resistencia máxima según tipo de curado y total37

Tabla 3.5: Análisis ponderado de la resistencia máxima y carga máxima de los hormigones con grafeno en relación con el hormigón convencional.....38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Vertimiento de los componentes del hormigón en la betonera.....	5
Figura 1.2: Vertimiento de los componentes del hormigón con grafeno como aditivo en la betonera	8
Figura 2.1: Molino triturador de clínquer.....	20
Figura 2.2: Producción y consumo mundial de cemento, y PBI del mundo (2006-2018P)	21
Figura 2.3: Estructura molecular del grafeno.....	24
Figura 2.4: Esquema general de un sistema de CVD.....	26
Figura 2.5: Crecimiento del grafeno sobre láminas de cobre	27
Figura 2.6: Esquema del proceso de transferencia de una lámina de grafeno...	28
Figura 2.7: Máquina de compresión de hormigón 3000 kN motorizada, <i>evolution servo-plus</i>	30
Figura 2.8: Representación de un cilindro con sus lados.....	31
Figura 3.1: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.04% de grafeno curadas en nylon.....	35
Figura 3.2: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.25% de grafeno curadas en nylon.....	36
Figura 3.3: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.04% de grafeno curadas en agua con cal	36
Figura 3.4: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.25% de grafeno curadas en agua con cal.....	37

Índice

Figura 3.5: Variación porcentual promedio de la carga máxima del hormigón con diferentes dosis de grafeno respecto al hormigón convencional.....39

Figura 3.6: Variación porcentual promedio de la carga máxima del hormigón con diferentes dosis de grafeno respecto al hormigón convencional.....40

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación y Motivación

La investigación y la innovación son materias poco exploradas en la Ingeniería Civil, esto debido principalmente al posible aumento en el costo económico que puede significar y/o por los métodos constructivos complejos que se podrían implementar.

Es por esta razón que las diversas normativas y exigencias vigentes no han cambiado de manera significativa con el paso del tiempo y se suelen imitar las técnicas ya conocidas una y otra vez.

Sin embargo, la ciencia en estos últimos años ha descubierto y caracterizado nuevos materiales, los cuales podrían aumentar la eficiencia y la calidad de los elementos estructurales, aumentando sus capacidades mecánicas; lo cual presenta una oportunidad para la investigación en estas posibles nuevas tecnologías.

Entre los materiales caracterizados recientemente se encuentra el grafeno, material que ha presentado características interesantes al ser sometido a ciertas condiciones en diversos estudios, principalmente en la Universidad Tecnológica de Sídney, Australia.

En consecuencia, este nanomaterial y sus características han llamado profundamente la atención del alumno, el cual estudiará e investigará el comportamiento del grafeno en el hormigón convencional.

Sin ir más lejos, se ha señalado que los nanocompuestos de grafeno mejoran de forma importante propiedades de otros materiales, como la conductividad eléctrica, propiedades mecánicas, estabilidad térmica y retardo al fuego, Martínez, Salavagione (2011).

Para esta memoria de título se experimentará con las exigencias de la normativa chilena la NCh 170.Of.2016, INN (2016).

1.2 Objetivos

Objetivos Generales

Evaluar el efecto de la incorporación del grafeno en el comportamiento mecánico de probetas de hormigón convencional y probetas de hormigón aditivado con grafeno.

Objetivos Específicos

- Implementar una metodología para la elaboración de mezcla de hormigón con grafeno como aditivo.

- Identificar la composición óptima de las mezclas de hormigón con grafeno como aditivo.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas.

1.3 Alcances

En esta memoria de título se contemplará la utilización de nuevas tecnologías emergentes para la optimización del hormigón estructural, añadiendo grafeno como principal aditivo a la mezcla.

Se plantea el uso de nanomateriales en aplicaciones civiles constructivas para lo cual se desarrollan materiales compuestos con base a grafeno y se caracterizan mecánicamente.

Se utilizará como guía y exigencia estudios previos realizados y la norma chilena NCh 170.Of.2016, INN (2016), referentes a la preparación de probetas de hormigón.

Sin embargo, habrá diferencias entre ésta y los estudios previos realizados y analizados, las cuales se encontrarán principalmente, en las normativas existentes en los respectivos países, en las máquinas y herramientas de los laboratorios utilizados para la preparación y experimentación de las muestras; y en el material base que se utilizará como aditivo.

1.4 Metodología

Para el soporte de esta investigación se comienza por indagar estudios previos desarrollados, necesario para verificar la compatibilidad y la forma óptima de añadir grafeno a la mezcla de hormigón, además de especificar los datos para las cantidades de aditivo a utilizar, que para efectos de este trabajo es grafeno.

Específicamente en este estudio se presentan dos metodologías, en las cuales se detalla el cómo se preparará la mezcla de hormigón convencional y cómo se preparan las mezclas de hormigón con diferentes dosis de grafeno como aditivo.

1.4.1 Metodología para hormigón convencional

Para la mezcla de hormigón convencional se utilizarán las dosificaciones para un hormigón G17, que se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Dosificación para hormigón convencional

Dosificación de Hormigón	Unidad	Cantidad
Cemento	kg	8.4
Grava	L	20
Arena	L	16
Agua	L	3.3

Fuente: Elaboración propia

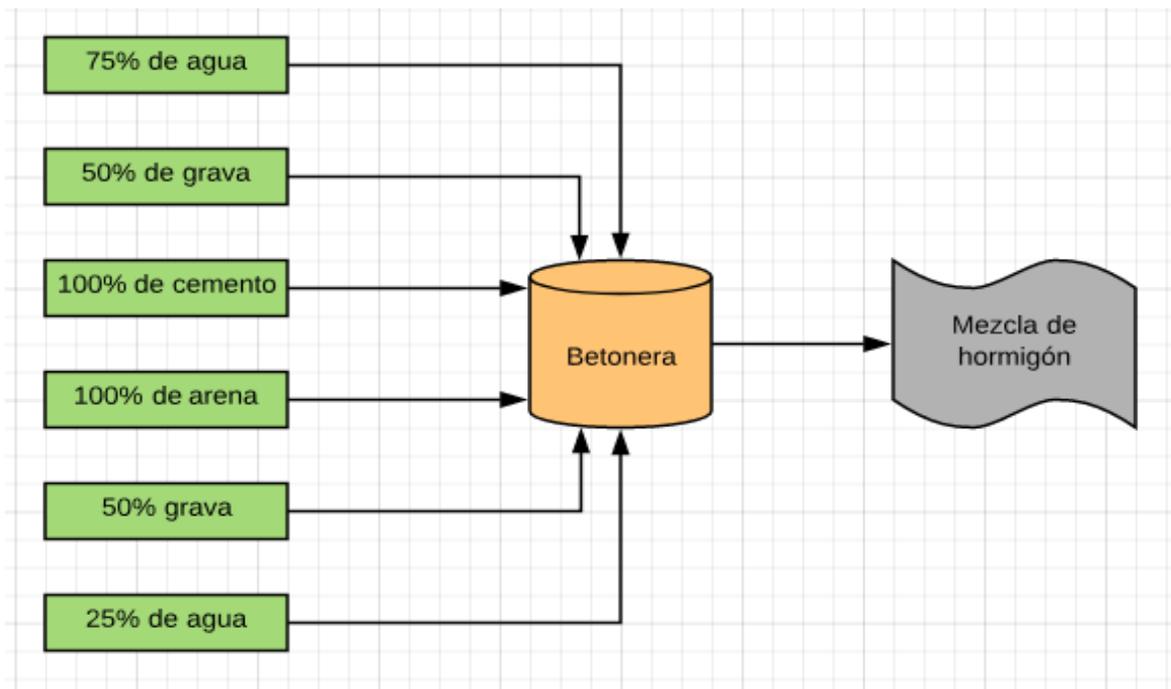
Luego de conocer las dosificaciones, se procede a verter los materiales dentro de la betonera, lo cual se especifica en la Tabla 1.2 y Figura 1.1.

Tabla 1.2: Cantidades porcentuales los materiales en la betonera

Método de Vertimiento Betonera	% Vertido
Agua	75
Grava	50
Arena	100
Cemento	100
Grava	50
Agua	25

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.1: Vertimiento de los componentes del hormigón en la betonera



Fuente: Elaboración propia

El mezclado en la betonera luego de ser vertidos todos los materiales, será de 7 minutos.

1.4.2 Metodología para hormigón con grafeno como aditivo

Para la mezcla de hormigón con grafeno se utilizan dos dosificaciones diferentes de grafeno. Tal como muestran las Tablas 1.3. y 1.4. Luego de conocer cada una de las dosificaciones, se procede a verter los materiales dentro de la betonera para sus mezclas respectivas, lo cual se basa en el procedimiento mostrado en la Tabla 1.2 y Figura 1.1; pero con una importante variación.

Tabla 1.3: Dosificación del hormigón con 4 gramos de grafeno como aditivo.

Dosificación de Hormigón	Unidad	Cantidad
Cemento	kg	8.4
Grava	L	20
Arena	L	16
Agua	L	3.3
Grafeno	g	4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.4: Dosificación del hormigón con 21 gramos de grafeno como aditivo.

Dosificación de Hormigón	Unidad	Cantidad
Cemento	kg	8.4
Grava	L	20
Arena	L	16
Agua	L	3.3
Grafeno	g	21

Fuente: Elaboración propia

Previo a la elaboración del hormigón, el grafeno se disuelve en 250 ml de agua, esto con el fin de obtener un mezclado óptimo en la betonera. Para ambas dosis de hormigón el orden de vertimiento es el mismo, como se muestra en la Tabla 1.4 y Figura 1.2.

El vertimiento del grafeno disuelto en agua es durante 30 segundos.

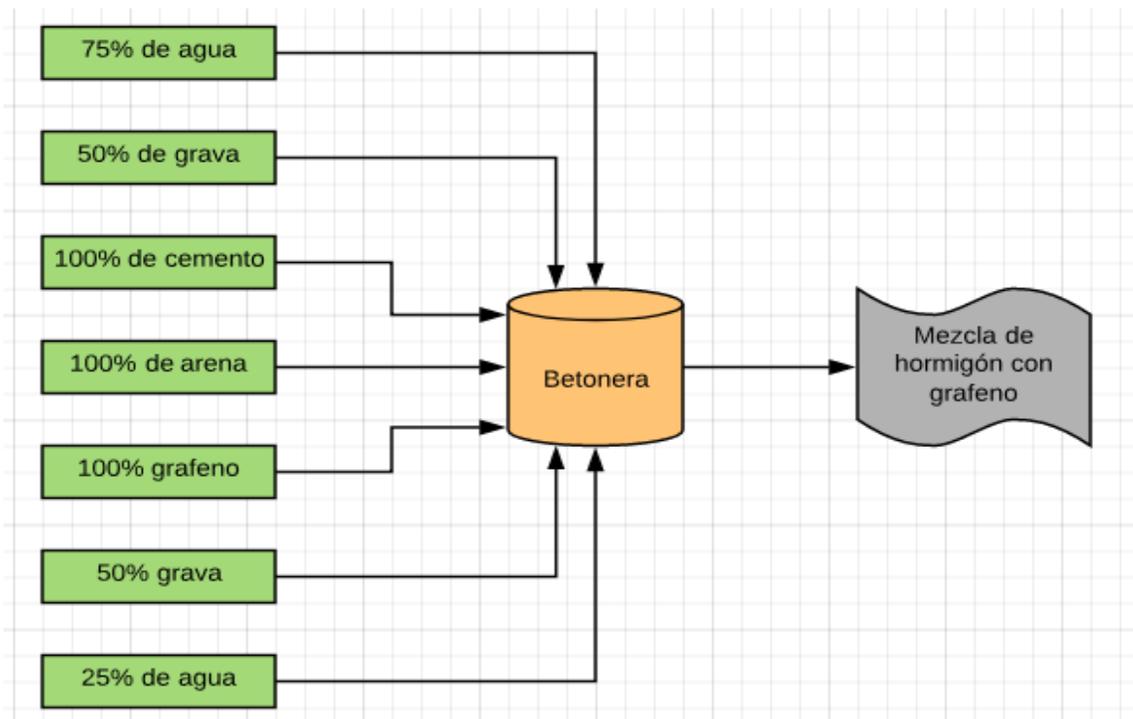
El mezclado en la betonera luego de ser vertidos todos los materiales es de 10 minutos. Esto con el fin de mezclar bien las partículas de grafeno en el hormigón.

Tabla 1.5: Cantidades porcentuales de vertimiento en la betonera

Método de Vertimiento Betonera	% vertido
Agua	75
Grava	50
Arena	100
Cemento	100
Grafeno	100
Grava	50
Agua	25

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.2: Vertimiento de los componentes del hormigón con grafeno en la betonera



Fuente: Elaboración propia

1.4.3 Metodología de análisis

Luego de implementar esta metodología de mezclado, se efectúa el trabajo en laboratorio, el cual se lleva a cabo durante 2 semanas.

Para esto se utilizan 4 moldes de probetas cilíndricas, en las cuales se vierten las mezclas de hormigón, donde el plazo para desmoldar es de 48 horas, con el fin de prevenir ruptura en la superficie del hormigón. Finalmente, el curado de las probetas tiene un plazo de 28 días, para finalmente ser analizar las muestras a esfuerzos de compresión. Las probetas cilíndricas están normalizadas en la norma chilena NCh 170.Of.2016, INN (2016).

En conclusión, para esta metodología se fabrican 12 muestras totales, las cuales consisten en 4 probetas de hormigón convencional, 4 probetas de hormigón con grafeno como aditivo en una dosis de 0.04% de la masa del cemento utilizado; y 4 probetas de hormigón con grafeno como aditivo en dosis de 0.25% de la masa del cemento utilizado.

Para todas las muestras se utiliza el mismo método de curado, el cual consiste en 2 probetas curadas en estado de saturación (agua con cal) y 2 probetas curadas envueltas en nylon.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del hormigón

El hormigón, también llamado concreto, es la mezcla de cemento, arena, grava o gravilla y de ser necesario, aditivos que caracterizan de manera conocida a esta aleación. A la mezcla se le añade agua con el propósito de hacer una pasta moldeable con propiedades adherentes, que con el paso de horas fragua y se endurece.

La utilización de este material es habitual en obras de construcción, tales como edificios, puentes, presas, recubrimiento de riveras, puertos, etc. Incluso se utiliza en obras cuyas estructuras principales están hechas de acero o madera, ya que es imprescindible que los cimientos sean contruidos de hormigón.

La principal característica estructural que posee el hormigón es la resistencia a los esfuerzos de compresión, sin embargo, carece de propiedades estructurales favorables frente a esfuerzos de tracción, flexión, corte, etc. Por esta razón es habitual asociar el concreto con otros materiales, como por ejemplo con acero; los cuales al trabajar en conjunto amplían la respuesta a las diversas sollicitaciones de carga que tendrá el elemento estructural, destacando principalmente la mejora en la resistencia a la flexo-tracción. Al añadir acero al hormigón, este pasa a ser llamado hormigón armado o concreto reforzado. Las principales características físicas del hormigón son:

- Densidad: 2350 kg/m^3 , aproximadamente.

- Resistencia a la compresión: desde 5 MPa a 60 MPa para hormigón convencional, ya que existen hormigones de alta resistencia que alcanzan los 200 MPa.
- Resistencia a la tracción: desde 3 MPa hasta 6 MPa para hormigón convencional, ya que existen hormigones de alta resistencia que alcanzan hasta 20 MPa aproximadamente.
- Tiempo de fraguado: 2 horas aproximadamente, dependiendo del medio en el cual se aplique.
- Tiempo para alcanzar resistencia especificada: 28 días.

2.1.1 Constituyentes del hormigón

Cemento

El cemento es un material aglomerante, el cual se encuentra deshidratado y en polvo, que al entrar en contacto con agua reacciona químicamente y se transforma en una pasta capaz de fraguar tanto en estado de saturación o en contacto con el medio ambiente.

Este material se obtiene de la mezcla de diversos materiales, como el sulfato de calcio dihidratado, óxido de calcio (CaO, o comúnmente conocido como cal), y en casos excepcionales de escoria de hornos de fundición.

La oferta de cemento dispone un abanico de posibilidades, las cuales, si bien utilizan los mismos materiales como base, son las diferentes dosificaciones quienes caracterizan de diversas formas a este aglomerante, proporcionando una amplia variedad de cementos, las cuales buscan satisfacer las diferentes necesidades y requerimientos de la mezcla de hormigón.

Tipos de Cemento

Existen diferentes tipos de cementos disponibles en el mercado, siendo el más común en nuestro país el llamado *cemento grado corriente*, lo cual no condiciona la utilización de otros. Para la elaboración de distintas opciones se han desarrollado diferentes mecanismos, con el fin de otorgar una característica específica, como por ejemplo menor calor de hidratación, resistencia de medios agresivos, mayor resistencia en los primeros días de curado, etc.

A continuación, se hará una descripción de los cementos más utilizados en la construcción.

Cemento Portland

Es el resultado de una molienda conjunta entre sulfato de calcio dihidratado, o mejor conocido como yeso ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$), y clínquer, producto que se constituye por silicatos cálcicos, el cual es el resultado de someter a altas temperaturas la mezcla entre óxidos de calcio, aluminio, hierro y silicio, INN (1968).

El nombre de este cemento proviene de su color, el cual es similar a una roca característica de la isla de Portland en Inglaterra; patentándose en la ciudad de Leeds, por Joseph Aspdin, en el año 1824.

Cemento Siderúrgico

Elaborado a base de sulfato de calcio dihidratado, clínquer y escoria granulada de alto horno, ésta última es un subproducto de la industria de refinamiento del hierro, resultante del abrupto cambio de temperatura que sufre la masa no metálica contenido en un alto horno.

Cemento Puzolánico

Al igual que el cemento Portland, éste se constituye por sulfato de calcio dihidratado y clínquer, pero a diferencia del anterior señalado, se le añade puzolana, material que no posee propiedades aglomerantes; pero al estar molido en partículas muy pequeñas, al estar en presencia de agua, desarrolla esta propiedad.

Estos materiales puzolánicos son utilizados desde la época del imperio romano, donde se mezclaba con cal.

Entre muchos otros cementos que existen en la industria, existen combinaciones de lo señalados anteriormente, los cuales nacen de mezclar las dosificaciones de cada materia prima, con el fin de otorgarle propiedades específicas al material.

Tabla 2.1: Clasificación del cemento de acuerdo con el contenido de materias primas

Clasificación de los cementos nacionales			
Denominación Cemento	Proporción de los componentes		
	Clínquer + yeso	Puzolana	Escoria alto horno
Portland	100%	-	-
Portland puzolánico	≥70%	<30%	-
Portland siderúrgico	≥70%	-	<30%
Puzolánico	50% - 70%	30% - 50%	-
Siderúrgico	25% - 70%	-	30% - 75%

Fuente: Elaboración propia

Fabricación del cemento

Las etapas de fabricación del cemento se dividen en tres fases:

- Obtención de materias primas.
- Fabricación de clínquer.
- Molienda de clínquer.
- Almacenamiento y transporte.

Obtención de materias primas

El óxido de calcio es uno de los componentes base en la industria cementera, el cual se obtiene en yacimientos de leyes variadas a partir de depósitos calcáreos abundantes en carbonato de calcio (CaCO_3). Por otra parte, se utilizan arcillas

para el refinamiento, aunque si bien en cantidades menores, éstos materiales (cal y arcilla), trabajan de muy buena manera, ya que son materiales sumamente estables bajo condiciones atmosféricas, a lo cual se suma que son materiales tremendamente abundantes en la superficie terrestre. Las dosificaciones de ambos materiales se especifican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Cambio de nomenclatura en relación de óxido de calcio vs arcilla.

Nombre	% de CaCO₃
Caliza Pura	95
Caliza Margosa	85 a 95
Marga Caliza	30 a 75
Marga Arcillosa	15 a 30
Arcillosa Margosa	5 a 15
Arcillosa	5

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento de las materias primas es el mismo antes de ser mezclados para la elaboración de clínquer, sin embargo, esto no garantiza un estado estándar del material antes de ser ingresado a la planta cementera, lo cual condiciona el proceso de acondicionamiento de los materiales en las siguientes etapas.

- Separación de los elementos que por su tamaño pueden dificultar el correcto funcionamiento de los equipos mediante harneado y cribado.
- Del material separado, se reduce su tamaño mediante chancadoras hasta obtener un tamaño apropiado para pasar por el molino.
- Prehomogenización, con el fin de obtener una mezcla granular homogénea

- Secado.
- Concentración de carbonato, esto cuando las materias calcáreas son bajo contenido de carbonatos.
- De acuerdo con la composición física y/o química, se selecciona las calizas de muy alta ley hasta muy baja ley, según Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Leyes de caliza según contenido de CaCO₃

Categoría	Composición % CaCO ₃
Muy alta pureza	> 98.5%
Alta pureza	97 % - 98.5%
Medianamente pura	93.5% - 97%
Baja pureza	85% - 93.5%
Muy baja pureza	<85%

Fuente: Elaboración propia

Fabricación de clínquer

Las materias primas principales para la fabricación de clínquer son calcio y silicio, mientras que, en proporciones menores, aluminio y hierro. Todos estos materiales deben ser mezclados en proporciones adecuadas.

Para la obtención de calcio, se utiliza carbonato de calcio, cuya fórmula química es CaCO₃, la cual, al ser descompuesta a altas temperaturas, da como resultado CaO (cal) y CO₂ (anhídrido carbónico). Éste último es un gas que se deposita en la atmósfera.



El silicio, el aluminio y el fierro, se puede obtener de arcillas u otro material que los contengan, tales como en las escorias de altos hornos. También puede ocurrir que en el material calcáreo se depositen estos componentes como impurezas, en tales cantidades, que no es necesario utilizar ni arcillas u otros materiales que presenten estos elementos.

En muchos casos no es suficiente mezclar dos componentes, y es necesario corregir los porcentajes. Esto se hace utilizando otros materiales que contienen el óxido deseado. Como por ejemplo si se necesita silicio, se puede utilizar una arena silícica.

Tabla 2.4: Resumen de los óxidos principales de las materias primas

Calcáreos (caliza)	
CaO	Óxido de calcio (cal)
Arcillas/escorias de alto horno	
SiO ₂	Óxido de silicio (sílice)
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio (alúmina)
Fe ₂ O ₃	Óxido de fierro
Otros (correctores de dosificación)	
SiO ₂	Óxido de silicio
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio
Fe ₂ O ₃	Óxido de fierro

Cemento Bio Bio (2018)

Para la formación del clínquer, la mezcla homogenizada de materiales debe ser sometida a una temperatura de fusión entre los 1400 °C a 1500 °C, donde parte del material se funde, mientras que la otra parte permanece en estado sólido; lo cual da origen a reacciones químicas que forman los compuestos mineralógicos de clínquer.

Para la calcinación de los materiales se utilizan hornos rotatorios, en los cuales al calentar transforman el material mediante tres fases:

- Secado y pérdida de agua.
- Deshidratación o pérdida de agua combinada.
- Disociación del carbonato de calcio (CaCO_3) en óxido de calcio (CaO) y anhídrido carbónico.

Es sumamente importante que el clínquer resultante se enfríe de forma inmediata al sacarse del horno. Esto para evitar la descomposición del silicato tricálcico ($3\text{CaO} + \text{SiO}_2$) en silicato bicálcico ($2\text{CaO} + \text{SiO}_2$) y cal libre (CaO).

Como se mencionó anteriormente, el clínquer está compuesto principalmente por óxidos. Estos al ser combinados forman los siguientes compuestos:

- Silicato tricálcico, cuyo símbolo es $3\text{CaO} + \text{SiO}_2$ y se abrevia como C_3S .
- Silicato bicálcico, cuyo símbolo es $2\text{CaO} + \text{SiO}_2$ y se abrevia como C_2S .
- Aluminato dicálcico, símbolo $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ y se abrevia C_3A .
- Ferroaluminato tetracálcico, su símbolo es $4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ y se abrevia C_4AF .

Cada uno de estos componentes aporta una característica al cemento, como también al comportamiento del hormigón fresco y endurecido, como muestra la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Propiedades aportadas al cemento por componentes principales de clínquer.

Compuesto	Fraguado	Desarrollo de Resistencia	Contribución a la Resistencia	Calor de Hidratación	Estabilidad Química
C ₃ S	Rápido	Rápido	Alta (a poca edad)	Alto	Buena
C ₂ S	Lento	Lento	Alta (a baja edad)	Regular	Muy buena
C ₃ A	Muy Rápido	Muy Rápido	Baja	Muy alto	Mala
C ₃ AF	Lento	Lento	Muy Baja	Bajo	Buena

Fuente: Elaboración propia

Molienda de clínquer

La siguiente etapa en la fabricación de cemento consiste en pulverizar los componentes del clínquer a una dimensión inferior a 100 micrones.

La molienda se realiza en molinos de bola, los cuales se componen de tubos de acero divididos en dos o tres cámaras, donde se colocan bolas de acero que aproximadamente un tercio del volumen total del tubo. Al girar el molino, las bolas chocan entre sí y con las paredes de las cámaras, atrapando el material, lo cual en consecuencia pulveriza los componentes.

Figura 2.1: Molino triturador de clínquer



Cementos Bio Bio (2013)

Almacenamiento y transporte

Para el correcto almacenamiento del cemento, éste se deposita en silos de hormigón especialmente habilitados, los cuales cuentan con un sistema que mueve el material almacenado con el fin de evitar segregación por decantación de granos gruesos o la aglomeración de estos.

El cemento es envasado en sacos de 25 kg, y el despacho a granel en maxi sacos de 1 a 2 toneladas o en camiones graneleros.

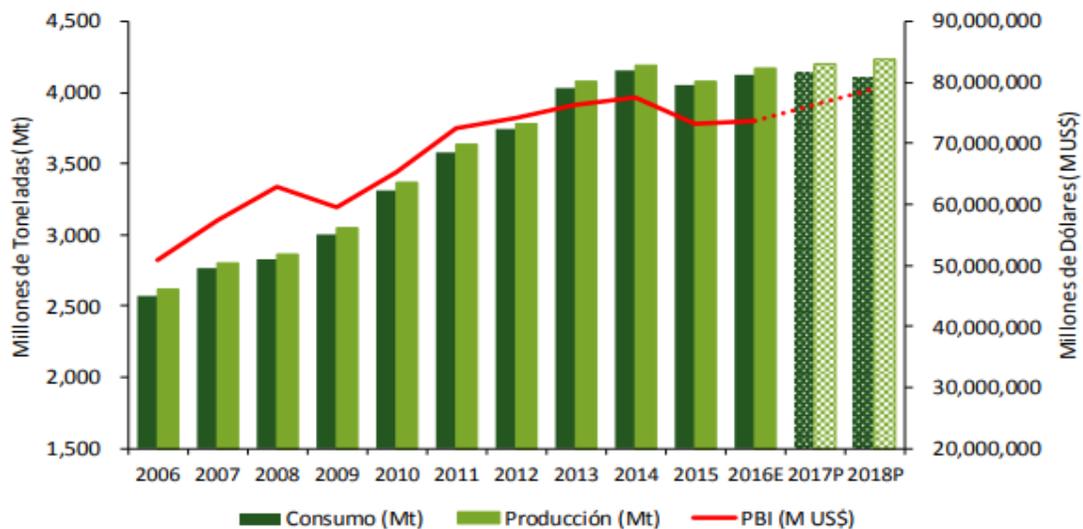
Producción y Consumo mundial de cemento

El consumo mundial de cemento alcanzó las 4.13Mt en el año 2016, lo que se traduce en un avance de 1.8% con respecto al año 2015; el cual tuvo una disminución del 2.4% respecto al año 2014.

China como máximo consumidor de cemento en el mundo, alcanzó una demanda de 2.39Mt en el año 2016, logrando un 58% del consumo mundial. Dicha participación alcanzó su punto más alto en el año 2014 con 59.4%.

Dejando al margen a China, la demanda de cemento alcanzó las 1.74Mt en el año 2016, creciendo un 1% con respecto a su año anterior. La producción y el consumo de cemento desde el año 2006 hasta el 2015, con estimaciones desde 2016 a 2018, se muestran en la Figura 2.2.

Figura 2.2. Producción y consumo mundial de cemento, y PBI del mundo (2006-2018P)



International Cement Review (2018)

Áridos pétreos

Los áridos son materiales pétreos compuestos por particular duras, de forma y tamaño estables, lo cuales se extraen de yacimientos naturales mediante

procesos mecánicos. Éstos se clasifican por el tamaño de sus partículas en dos grupos, los áridos finos (arenas) y áridos gruesos. La norma chilena NCh163.Of.2013 subdivide a este último grupo en gravillas y gravas; esto de acuerdo con el tamaño de sus partículas. En dicha norma *Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales*, se establecen las exigencias que debe cumplir el árido para asegurar la correcta utilización de estos para las demandas o exigencias que tendrá el hormigón ya fabricado.

Los áridos deben estar libres de impurezas ya que esto puede afectar de manera significativa la durabilidad y resistencia del hormigón, INN (2013).

Agua de amasado

Agua de amasado es el nombre que se le denomina al agua empleada para realizar la mezcla de áridos y cemento, la cual produce una reacción química que transforma la mezcla en un material plástico, moldeable y dócil, lo cual presenta variaciones por los diferentes diseños de dosificación.

El agua empleada debe cumplir requisitos mínimos, los cuales están presentes en la norma chilena, INN (2013). Algunas de estas exigencias son:

- El agua debe estar completamente libre de azúcares como glucosa, sacarosa o similares.
- Se puede utilizar agua potable extraída de la red de distribución, siempre que no se contamine previo a su uso.
- El valor del pH, contenido de sólidos en suspensión, disueltos y materia orgánica debe cumplir con los parámetros indicados en la Tabla 2.6

Tabla 2.6: Requisitos químicos básicos del agua de amasado

Parámetro	Unidad	Valores Límites
pH	-	6 a 9.2
Sólidos en suspensión	mg/l	≤2000
Sólidos disueltos	mg/l	≤15000
Materia orgánica (como O ₂ consumido)	mg/l	≤5

INN (2012)

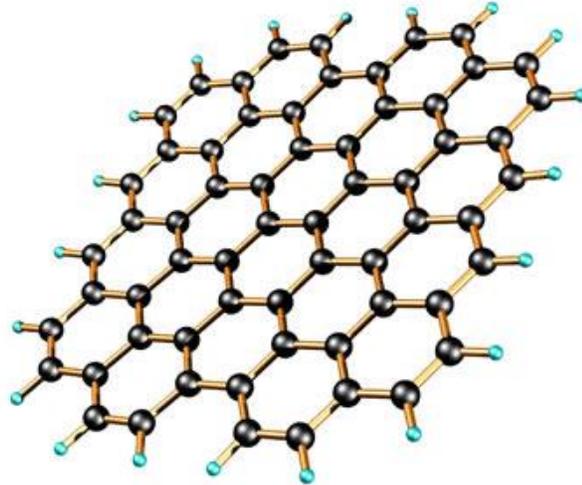
Aditivos

Los aditivos son productos complementarios que se adhieren a la mezcla de hormigón con el fin de modificar y mejorar determinadas características. Por ejemplo, existen aditivos que modifican las cualidades de específicas del hormigón, como reductores de agua, aceleradores de fraguado, etc.

2.2 Generalidades del grafeno

El grafeno es un material nanométrico bidimensional, el cual se constituye de una sola lámina de átomos de carbono, los cuales son fuertemente unidos por enlaces que presentan hibridación sp² y distribuidos en una superficie uniforme y ondulada, con una forma similar a la de un panal de abejas, ya que su configuración atómica es hexagonal. Forma que se muestra en la Figura 2.1.

Figura 2.3: Estructura molecular del grafeno



Fuente: Elaboración propia

Este nanomaterial es uno de los derivados alotrópicos que tiene el carbono, como también lo son el grafito y el diamante.

Es el material más resistente que se conoce en la naturaleza y su dureza supera a la del diamante. Cabe señalar que el espesor de este nanomaterial oscila entre 1 y 10 átomos de carbono, lo cual lo hace un material sumamente fino y al cual se logra percibir dos de sus dimensiones. Es por esta razón que se considera un material bidimensional.

Otras propiedades importantes del grafeno son:

- Alta conductividad eléctrica.
- Ligereza

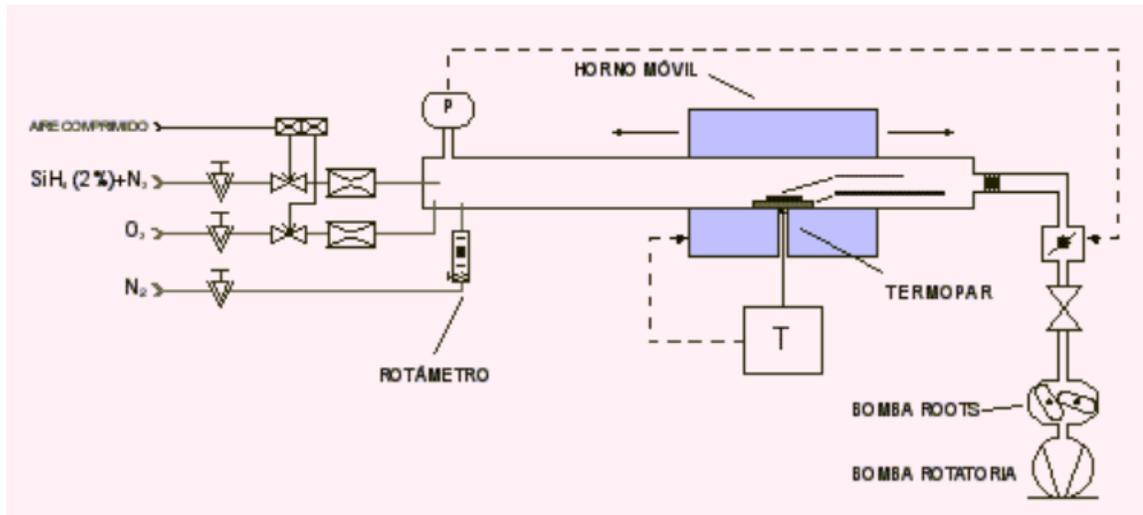
- Permeabilidad: Permite el paso de agua, pero no el paso de elementos pequeños como el helio.
- Elasticidad: Se puede estirar y volver a la normalidad un 10% de su tamaño habitual. Los otros materiales soportan alrededor de un 3%.
- Módulo de Young: 0.5 TPa.

2.2.1 Fabricación de grafeno

Para la obtención de grafeno se utiliza el método de la cinta adhesiva o de exfoliación mecánica, que consiste en aplicar una cinta adhesiva doblada en los dos extremos de la pieza de grafito, para luego ser separada. Al repetir este proceso varias veces se obtiene una única capa de grafeno. Todo esto a escala nanométrica. Estas láminas son estables en condiciones ambientales con una alta calidad. Sin embargo, esta técnica tiene múltiples limitaciones, ya que no se pueden controlar las dimensiones de las láminas de carbono, lo cual presenta un gran problema para la producción a gran escala. Es por esta razón que se han hecho diversas investigaciones para optimizar la fabricación del grafeno. El método de síntesis de mayor interés y mejores resultados hasta la fecha es el denominado Deposición Química de Vapor (*CVD*). Este método se basa en la capacidad que tiene el grafeno para crecer en níquel, paladio, rutenio, iridio y cobre. Este método requiere de un horno de tubo capaz de elevar a altas temperaturas, una cámara de vacío de cuarzo, un sistema de control de presión y vacío, para ajustar las condiciones del crecimiento, así también medidas de control para los flujos máxicos para proporcionar carbono y gases reactivos con el caudal que se necesite. Como se muestra en la Figura 2.2.

Fundamentalmente se utiliza cobre y níquel como catalizadores de la reacción.

Figura 2.4: Esquema general de un sistema de CVD



Muñoz, Gómez-Aleixandre (2013)

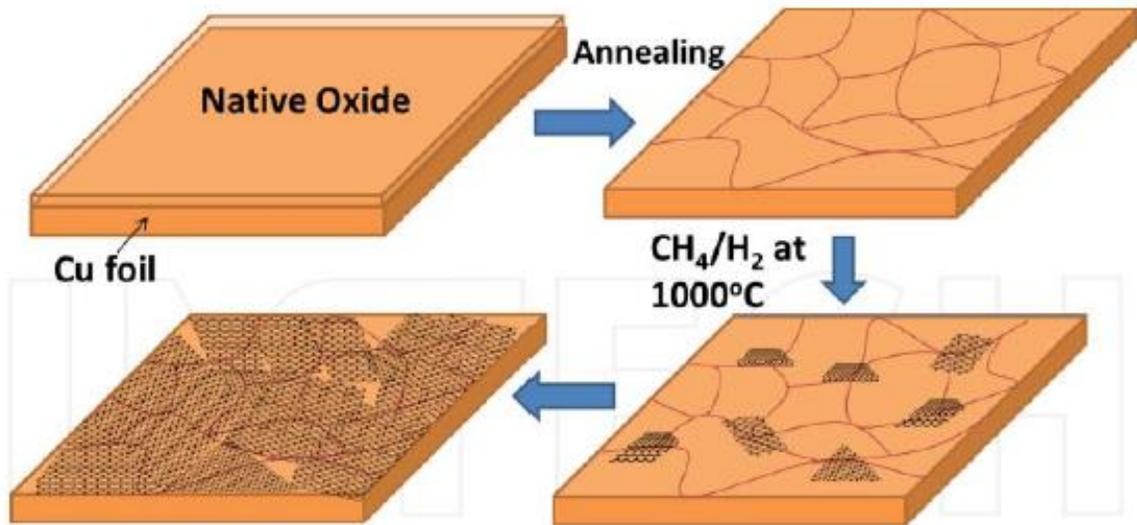
Método deposición química de vapor

Utilización de cobre

Se parte con una lámina de Cu (Cobre) natural que contenga óxido, la cual se somete a un proceso de recocido (*annealing*), que consiste en elevar a una alta temperatura la lámina en un ambiente con H₂ (dihidrógeno). Con este primer proceso se busca eliminar el óxido que se encontraba de manera natural en la lámina; además permite que aparezcan los primeros granos de cobre. A continuación, se adiciona metano a una leve velocidad de flujo, durante treinta minutos, la cual actuará como fuente de carbono. Con este segundo proceso aparece el crecimiento al azar de grafeno. Al mantener el ambiente CH₄/H₂,

continuará el crecimiento de grafeno, hasta finalmente cubrir toda la superficie de la lámina. Éste proceso se representa en la Figura 2.3.

Figura 2.5: Crecimiento del grafeno sobre láminas de cobre.



Catalán (2013)

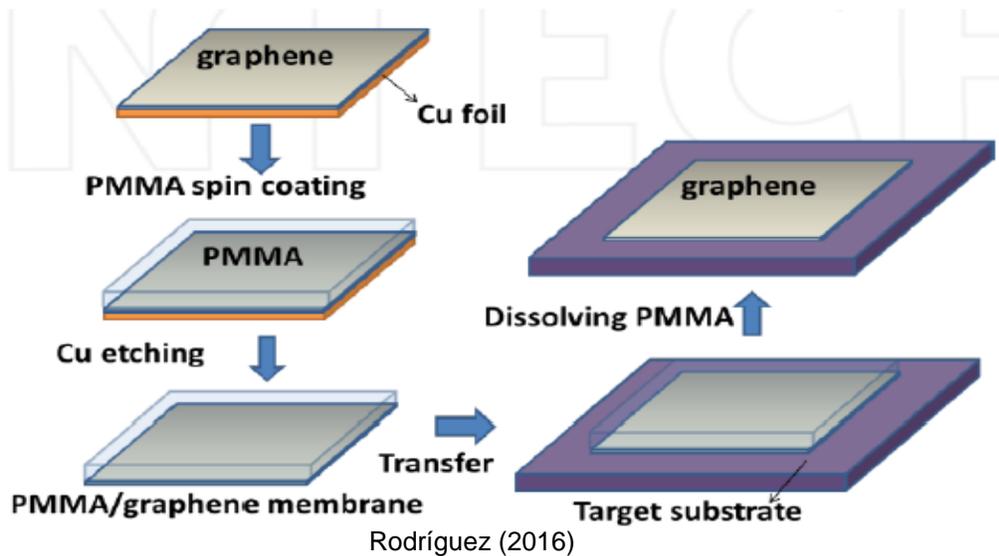
Utilización de níquel

La ventaja que presenta el níquel como catalizador es poder trabajar a una presión inferior a la utilizada con el método CVD, incluso se puede trabajar a presión atmosférica. Mediante un proceso litográfico estándar se puede modelar el crecimiento del grafeno sobre el níquel, después de un proceso de transferencia. De manera complementaria se puede moldear la lámina de níquel para conseguir que el grafeno crezca con la posición adecuada. De forma dependiente de si utilizamos metano diluido o concentrado, podemos obtener una única capa de grafeno o multicapas, respectivamente. El grafeno que crece sobre el níquel es menos robusto que el que crece sobre cobre.

Mecanismo de transferencia

La lámina de grafeno es recubierta por otra lámina polimérica como polimetilmetacrilato (PMMA) o polidimetilsiloxano (PDMS), de tal manera que aporte un apoyo a la hora de efectuar la transferencia. Luego, se elimina la lámina de cobre mediante un proceso de *etching* (grabado), utilizando una solución de cloruro férrico (FeCl_3). A continuación, el cobre se disolverá completamente, donde se traslada la membrana de grafeno unida a la PMMA o PDMS a una sustancia aislante. Finalmente, la lámina de PMMA o PDMS es disuelta, dejando a la membrana de grafeno sobre el material aislante. La Figura 2.4 muestra este proceso.

Figura 2.6: Esquema del proceso de transferencia de una lámina de grafeno



2.3 Máquina para ensayo de compresión

Máquina de compresión de hormigón de 3000 kN motorizada *evolution servo-plus*, de alta estabilidad, para ensayar automáticamente probetas cúbicas y cilíndricas.

Las especificaciones técnicas de esta máquina son:

- Máxima luz vertical 336 mm.
- Planchas de compresión de. 287 x 60 mm.
- Precisión de calibración: Grado 1.0.
- Max. recorrido del ariete 60 mm aprox.
- Dispositivo hidráulico para detener la carrera del pistón en su excursión máxima, para evitar bombear el pistón fuera del cilindro.
- Alimentación: 230 V 1 ph 50 Hz 750 W.
- Dimensiones: 750x450x1500 mm.
- Peso: 1200 a 1250 kg.

Figura 2.7: Máquina *evolution*
servo-plus



Jet Materials (2018)

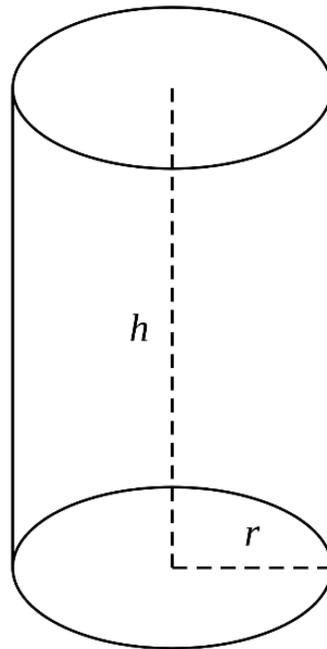
2.4 Cálculo del volumen de probetas cilíndricas

Para el cálculo del volumen de las probetas cilíndricas se utiliza la siguiente formula:

$$V = \pi r^2 h \quad (1)$$

- V: volumen de la probeta cilíndrica en cm^3 .
- π : Constante Pi.
- r: Radio de la probeta cilíndrica en cm.
- h: Altura de la probeta cilíndrica en cm^2 .

Figura 2.8: Representación de un cilindro



Fuente: Elaboración propia

2.5 Cálculo de la densidad de probetas cilíndricas

Para el cálculo de la densidad aparente de las probetas cilíndricas se utiliza la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{P}{V} \quad (2)$$

- ρ : Densidad aparente de la probeta cilíndrica en g/cm^3 .
- P: Peso de la probeta cilíndrica en g.
- V: Volumen de la probeta cilíndrica en cm^3 .

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1 Generalidades de la experimentación

Tras transcurrir 28 días de curado desde la fecha en la cual se elaboraron cada una de las probetas, éstas son ensayadas a compresión bajo las exigencias de la norma chilena NCh 1037.Of1977; INN (1977); la cual establece el método para efectuar el análisis.

3.2 Procedimiento

3.2.1 Dimensión y peso de probetas

Luego de retirar las probetas del medio de curado empleado, se trasladan las muestras al lugar donde se encuentra la prensa, donde previo al ensayo las probetas son pesadas y medidas, estas magnitudes se muestran en la Tabla 3.1.

Al conocer las densidades aparentes de cada una de las probetas, se calcula el promedio de cada tipo de muestra de hormigón, como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1: Diámetro, altura, masa y densidad aparente de cada probeta analizada

Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (g)	Densidad Aparente (g/cm³)
Probeta Patrón 1	15.1	30.0	12867.0	2.411
Probeta Patrón 2	15.1	30.5	12842.3	2.351
Probeta Patrón 3	15.1	30.0	13014.6	2.423
Probeta Patrón 4	15.1	31.5	13014.6	2.307
Probeta 1 Grafeno 0.04%	15.0	30.0	12761.0	2.407
Probeta 2 Grafeno 0.04%	15.0	30.0	12865.1	2.427
Probeta 3 Grafeno 0.04%	15.1	30.0	12866.0	2.395
Probeta 4 Grafeno 0.04%	15.0	31.0	12864.1	2.348
Probeta 1 Grafeno 0.25%	15.0	31.0	12863.7	2.348
Probeta 2 Grafeno 0.25%	14.9	30.0	12697.7	2.427
Probeta 3 Grafeno 0.25%	15.0	30.0	12775.6	2.410
Probeta 4 Grafeno 0.25%	15.0	30.0	12854.4	2.425

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Densidades aparentes promedio para cada tipo de hormigón analizado

Muestra	Densidad Aparente Promedio (g/cm³)
Probeta Patrón	2.373
Probeta Grafeno 0.04%	2.394
Probeta Grafeno 0.25%	2.403

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Carga y rotura de probetas

Los ensayos a compresión se realizaron según las exigencias detalladas en el párrafo 5.3.5, de la norma NCh1037.Of1977, INN (1977)

- La rotura de la probeta debe alcanzarse en un tiempo no inferior a 100 s.
- La velocidad de carga no debe superar los 3.5 kgf/cm²/s.

3.3 Resultados de los ensayos

Los resultados de carga máxima y resistencia máxima para cada probeta son los que se mostrarán en la Tabla 3.3:

Posterior al resultado individual de cada probeta, se hace un análisis global de cada muestra. Esto con el fin de comparar los resultados del hormigón patrón versus los resultados del hormigón con distintas dosis de grafeno. Además, para esta comparativa se consideró el tipo de curado que tuvieron las probetas, es decir, se compara la carga máxima y resistencia máxima de las muestras según fueron curadas en nylon o agua saturada con cal. Esta comparación se muestra en las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

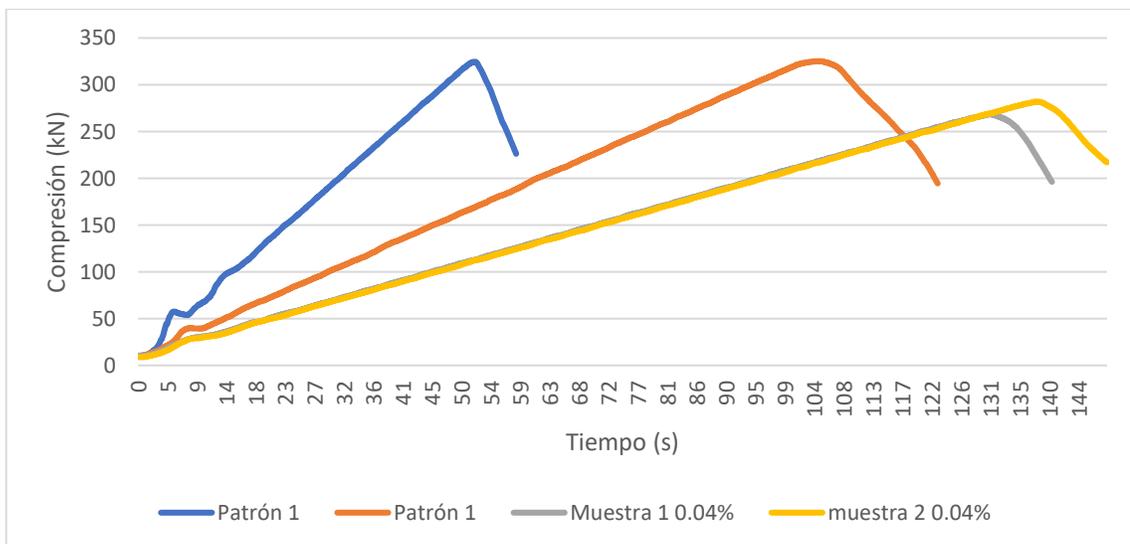
Luego de la comparación se procedió con el cálculo del promedio de carga máxima y resistencia máxima que tuvo cada tipo de muestra según su curado y total, como se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3: Resultados carga máxima y resistencia máxima de las probetas ensayadas

Muestra	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)
Probeta Patrón 1	324.549	18.244
Probeta Patrón 2	325.134	18.156
Probeta Patrón 3	271.432	15.157
Probeta Patrón 4	324.842	18.382
Probeta 1 Grafeno 0.04%	268.509	15.195
Probeta 2 Grafeno 0.04%	281.880	15.951
Probeta 3 Grafeno 0.04%	263.103	14.889
Probeta 4 Grafeno 0.04%	314.028	17.770
Probeta 1 Grafeno 0.25%	348.222	19.705
Probeta 2 Grafeno 0.25%	327.910	18.556
Probeta 3 Grafeno 0.25%	324.842	18.382
Probeta 4 Grafeno 0.25%	317.316	17.956

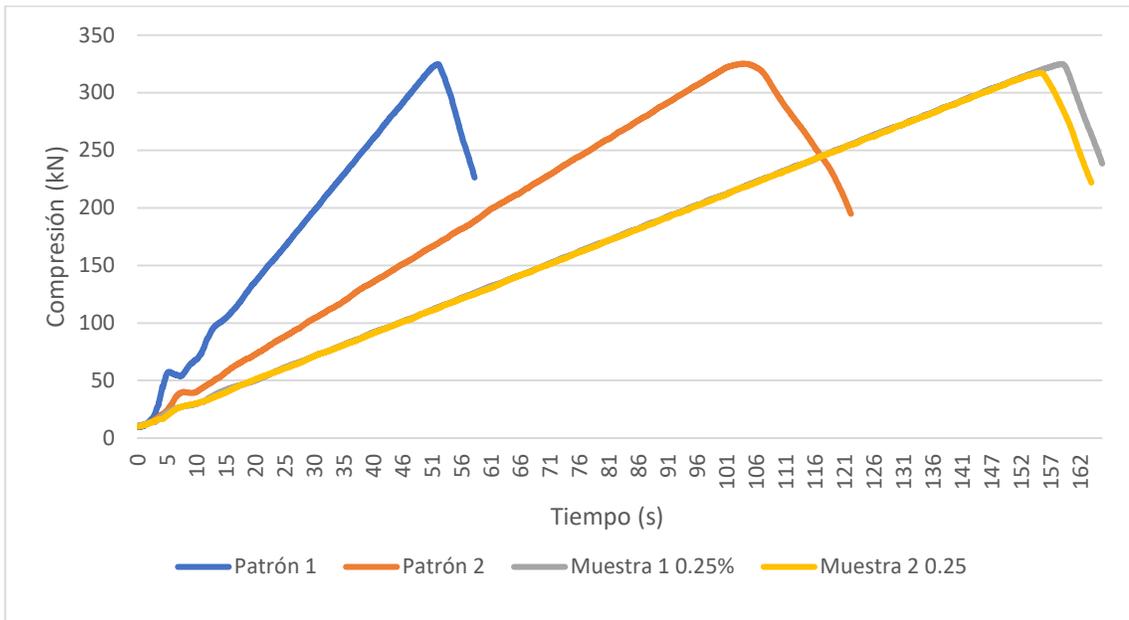
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.04% de grafeno curadas en nylon



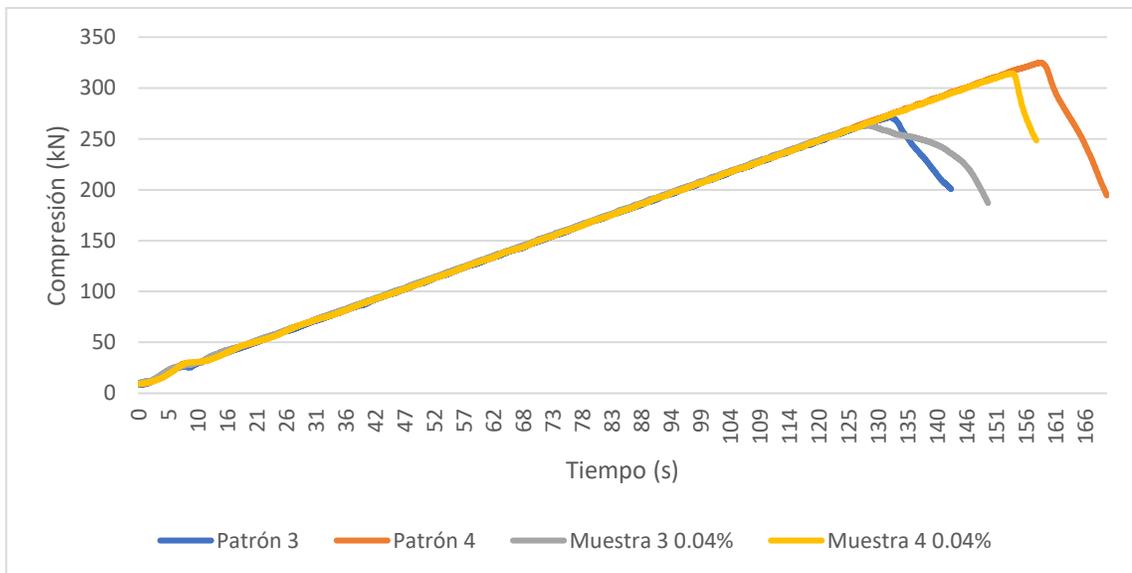
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.25% de grafeno curadas en nylon



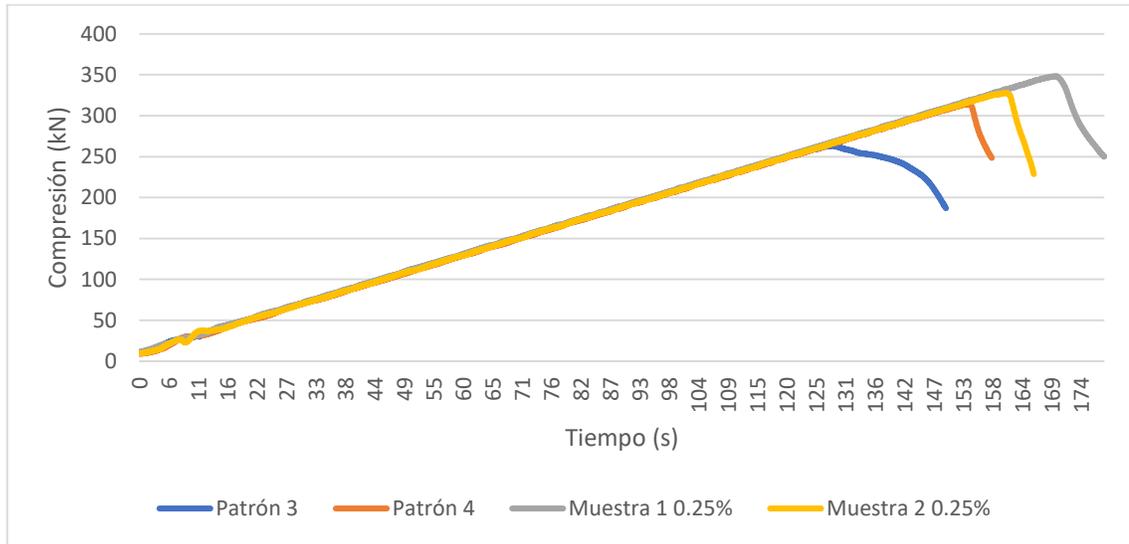
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3: Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.04% de grafeno curadas en agua con cal



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4. Comparación hormigón patrón vs hormigón con 0.25% de grafeno curadas en agua con cal



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Promedio carga máxima y resistencia máxima según tipo de curado y total.

Tipo de Hormigón	Promedio Carga Máxima (kN)	Promedio Resistencia Máxima (MPa)
Patrón Nylon	324.842	18.200
Patrón Saturado	297.907	16.770
Patrón Total	311.489	17.485
Grafeno 0.04% Nylon	275.195	15.573
Grafeno 0.04% Saturado	288.566	16.330
Grafeno 0.04% Total	281.880	15.951
Grafeno 0.25% Nylon	321.079	18.169
Grafeno 0.25% Saturado	338.066	19.131
Grafeno 0.25% Total	329.573	18.650

Fuente: Elaboración propia

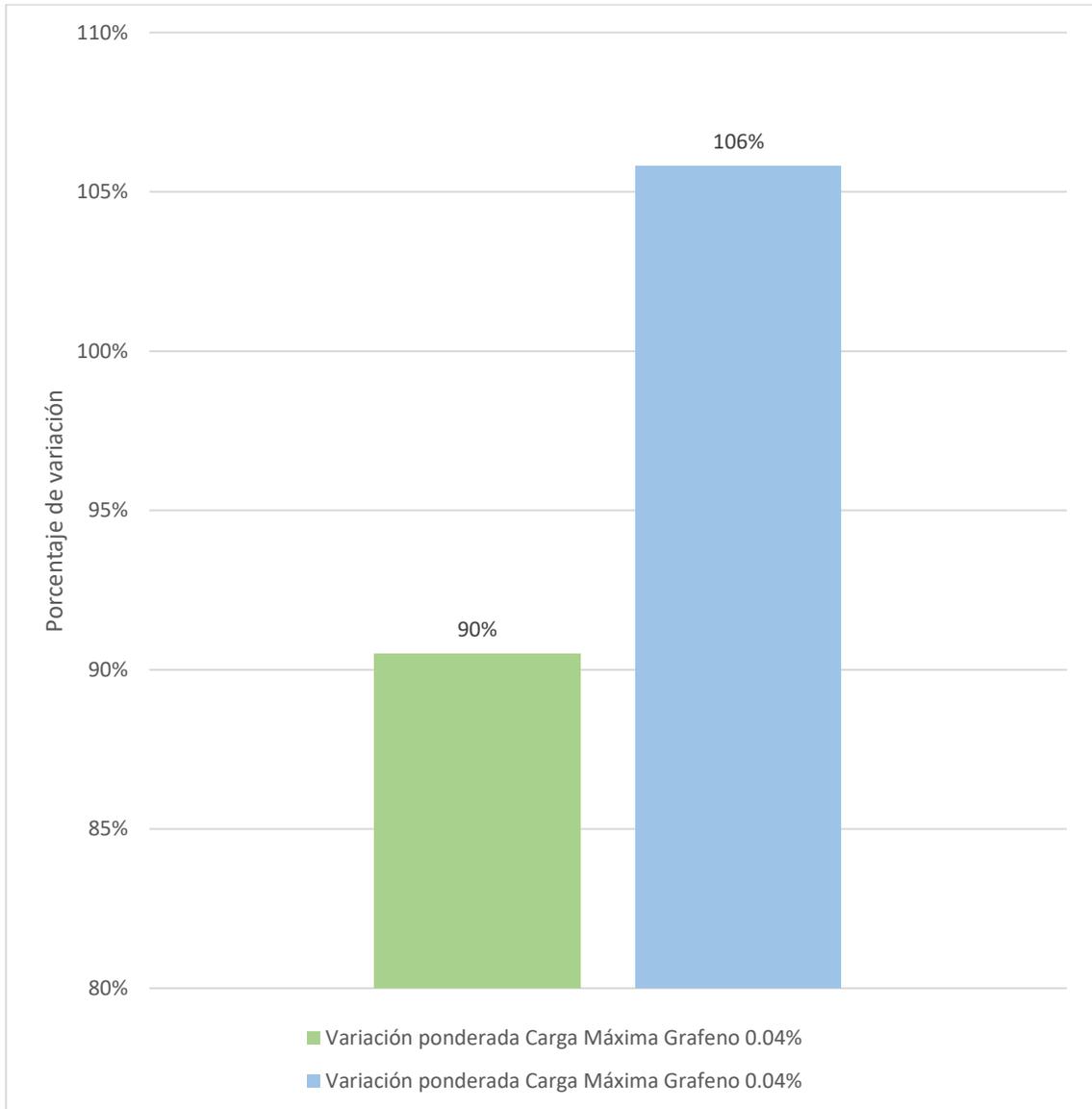
Posterior al análisis según el tipo de curado, se realizó un análisis ponderado de la resistencia máxima y carga máxima de los hormigones con grafeno en diferentes dosis, usando como punto comparativo las muestras de hormigón convencional. Este análisis se presenta en la Tabla 3.5 y Gráficos 3.1 y 3.2.

Tabla 3.5: Análisis ponderado de la resistencia máxima y carga máxima de los hormigones con grafeno en relación con el hormigón convencional

Tipo de Hormigón	Variación Carga Máxima	Variación Resistencia Máxima
Patrón Nylon	-	-
Patrón Saturado	-	-
Patrón Total	-	-
Grafeno 0.04% Nylon	85%	86%
Grafeno 0.04% Saturado	97%	97%
Grafeno 0.04% Total	90%	91%
Grafeno 0.25% Nylon	99%	100%
Grafeno 0.25% Saturado	113%	114%
Grafeno 0.25% Total	106%	107%

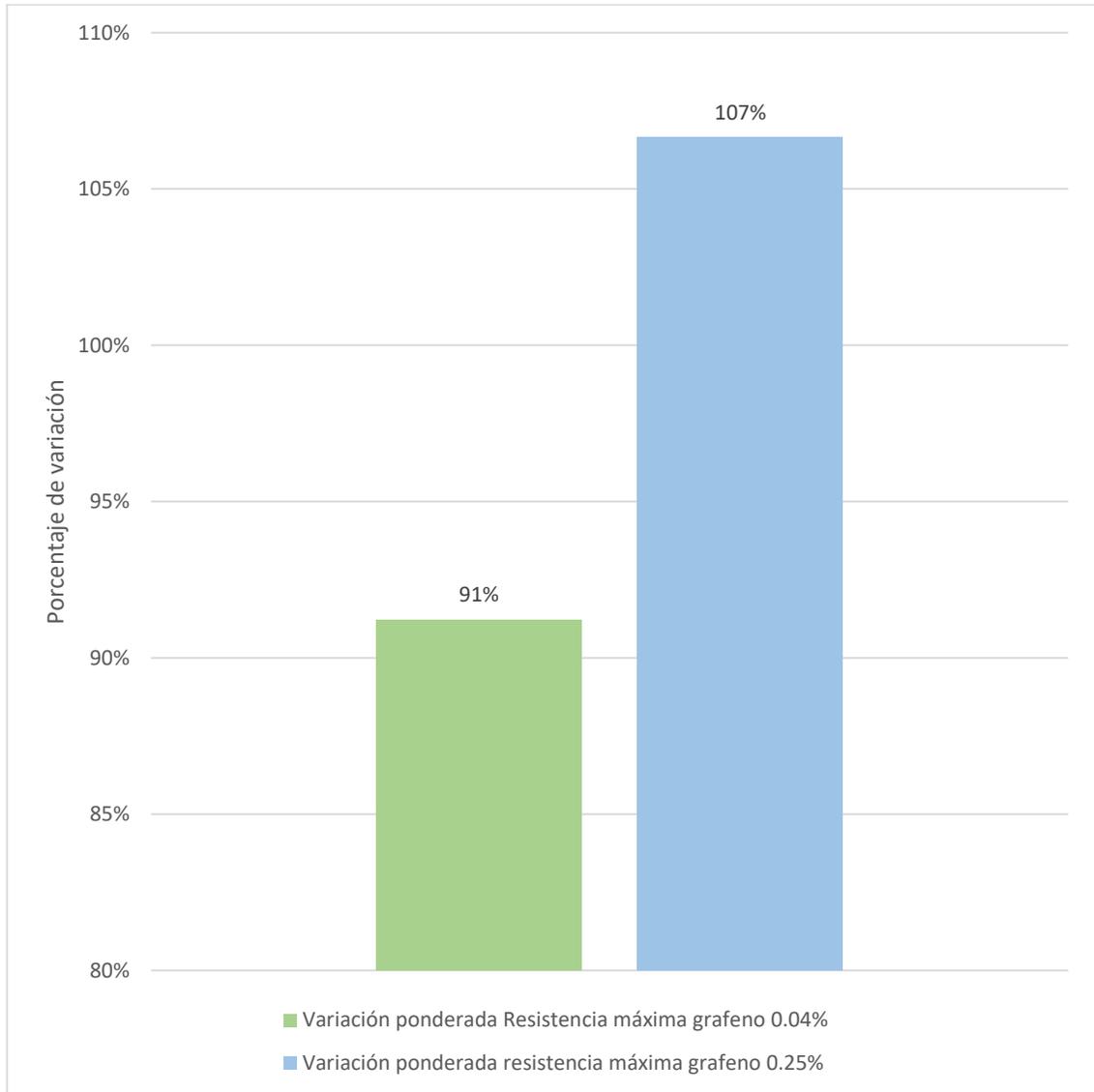
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Variación porcentual promedio de la carga máxima del hormigón con diferentes dosis de grafeno respecto al hormigón convencional



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Variación porcentual promedio de la carga máxima del hormigón con diferentes dosis de grafeno respecto al hormigón convencional



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

La metodología desarrollada en esta investigación se adaptó a los recursos que el investigador tuvo a su alcance, pero se estima que con una máquina mezcladora de alta velocidad puede ser optimizada la aleación del grafeno con el hormigón, ya que se sospecha que la variación en los valores de resistencia máxima en algunas probetas con las mismas dosis de grafeno se debe entre otras cosas, a pequeñas concentraciones o aglomeraciones a nivel molecular del aditivo, es decir, que el grafeno no logra distribuirse de manera homogénea en los espacios que hay entre las partículas de hormigón; lo cual provocaría variaciones en los valores máximos de resistencia de las probetas del mismo tipo.

Según los resultados obtenidos, se precisa una diferencia en las características mecánicas del hormigón convencional y el hormigón aditivado con grafeno.

En las muestras de hormigón con 0.04% de la masa de cemento agregado como grafeno se aprecia una disminución en la resistencia máxima a la compresión de las probetas, que en promedio alcanza un 91% de la resistencia máxima del hormigón convencional, es decir, el hormigón pierde un 9% de capacidad a la compresión con esta dosis de grafeno como aditivo.

Por otra parte, con las muestras de hormigón con 0.25% de la masa de cemento agregado como grafeno se ve un aumento en la resistencia máxima a la compresión de las probetas, que en promedio alcanza un 107% de la resistencia máxima del hormigón convencional, es decir, el hormigón adquiere en promedio un 7% más de resistencia a la compresión con esta dosis de grafeno como aditivo.

Por lo tanto, se puede aseverar que, para las dosis utilizadas en esta memoria de título, la dosis de 0.25% de la masa de cemento como grafeno es la composición óptima.

Se puede concluir que las diferentes características observadas en esta investigación no solo están sujetas a la concentración de grafeno utilizada, sino también a la posible agregación a nivel molecular del aditivo, ya que también se observó una diferencia importante en las probetas que fueron curadas en nylon respecto a las sumergidas en agua con cal (saturadas).

Se pudo observar que las probetas aditivadas con grafeno son más estables mecánicamente en el tiempo que aquellas probetas de hormigón convencional. En las muestras de hormigón convencional se aprecia que las curadas en nylon presentaron mayor resistencia máxima a la compresión que las muestras sumergidas en agua con cal, con una diferencia de 26.96 MPa. Resultado esperado, ya que es común ver que las probetas húmedas pierdan un poco de resistencia a la hora de ser ensayadas.

Sin embargo, las muestras de hormigón con 0.04% de la masa de cemento como grafeno presentaron un aumento en la resistencia al ser curadas en agua con cal. Esto se puede deber a que el ambiente saturado ayuda a mejorar la cohesión de las partículas de hormigón con grafeno, pues los valores obtenidos en el curado con nylon fueron un 86% de la resistencia máxima del hormigón convencional curado en el mismo ambiente, mientras que las probetas curadas en un ambiente saturado alcanzaron un 97% de la resistencia máxima del hormigón convencional curado de la misma manera, es decir, si bien la resistencia máxima del hormigón con 0.04% de la masa de cemento como grafeno sigue siendo menor que las probetas de hormigón convencional, las que fueron curadas en ambiente saturado se aproximan más a los valores del hormigón patrón.

A su vez, las muestras de hormigón con 0.25% de la masa de cemento como grafeno presentaron un comportamiento similar, a las otras probetas de hormigón con grafeno como aditivo, pues se observó que las muestras curadas en nylon presentaron aproximadamente la misma resistencia máxima a la compresión que las probetas de hormigón convencional curadas en el mismo ambiente, pero este comportamiento no fue el mismo en las probetas curadas en un ambiente saturado, ya que las probetas con 0.25% de la masa de cemento como grafeno presentaron un importante aumento en la resistencia máxima a la compresión en comparación a las muestras de hormigón convencional curadas de la misma manera, dando como resultado un 114% de la resistencia de las muestras patrón, es decir, aumentó un 14% la resistencia máxima de estas muestras; lo cual reafirma la teoría de que el ambiente saturado ayuda a mejorar la cohesión de las partículas de hormigón con grafeno.

Finalmente, comparando esta investigación con las investigaciones previas realizadas con óxido de grafeno, podemos deducir que la variación de los resultados obtenidos se puede deber, entre los otros factores señalados en este análisis; a la compatibilidad y estabilidad que tiene el grafeno con el hormigón, pues se estima que este nanomaterial pueda presentar cierta incompatibilidad con el hormigón, mientras que su derivado ha presentado buenos resultados en las investigaciones previas consideradas en este estudio.

Se propone seguir estudiando el tema incluyendo la modificación de grafeno a óxido de grafeno y evaluar adicionales propiedades como químicas y morfológicas.

Bibliografía

- ASTM / C40M-11 Standard Test for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete.
- Catalán. C. 2013. "Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grade H15, H20 y H30". Universidad Austral de Chile.
- Choisy, A. 1999. "El arte de construir en Roma". Instituto Juan de Herrera, España.
- Cement and Concrete Composites. 2018. "Dispersion of graphene oxide agglomerates in cement paste its effects on electrical resistivity and flexural strength". Shenzhen University. China.
- Cement and Concrete Composites. 2018. "Microstructure development and mechanism of hardened cement paste incorporating graphene oxide during carbonation". Shenzhen University, China. Missouri University of Science and Technology, USA.
- Cement and Concrete Composites. 2018. "Understanding the behaviour of graphene oxide in portland cement paste". University College London, Reino Unido.
- Cementos Bio Bio. 2012. "Cementos, fabricación y clasificación".
- Construction and Building Material. 2018. "A holistic review of cement composites reinforced with graphene oxide". Zhejiang University, China. Jiangsu University of Science and Technology, China University of Nottingham, China

- Construction and Building Material. 2018. "Investigation on dispersion of graphene oxide in cement composite using different surfactant treatments. Manash University, Australia. University of Technology of Sidney, Australia. Swinburne University of Technology. Australia.
- FICEM. 2013. "Informe estadístico". Federación Interamericana del Cemento.
- Oyervides. E. 2011. "Grafeno: el material más fuerte del mundo". Universidad Autónoma de Coahuila.
- Harrison. D. 1993. "Industrial Minerals Laboratory Manual Limestone". British Geological Survey. Reino Unido.
- ICR. 2016. "Global cement Consumption Forecast". International Cement Review.
- Journal of Cleaner Production. 2018. "Performance enhancement and environmental impact of cement composites containing graphene oxide with recycled fine aggregates". Shenzhen University, China.
- Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2018. "Synergistic effect of graphene-oxide-doping and microwave curing on mechanical strength cement". Michigan Technology University. USA.
- Manual de carreteras, volumen N°8. 2018. "Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control". Ministerios de obras públicas de Chile.
- Muñoz. R. Gómez-Aleixandre. C. 2013. "Chemical Vapor Deposition". Wiley-VCH.

- NCh170.Of.2016. 2016. "Hormigón – Requisitos generales". Instituto nacional de Normalización, INN Chile.

- NCh1037.Of.1977. 1977. "Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas". Instituto nacional de Normalización, INN Chile.

- NCh1498.Of.2012. 2012. "Hormigón y mortero – Agua de amasado – Clasificación y requisitos". Instituto nacional de Normalización, INN Chile.

- Rodríguez. A. 2016. "Grafeno: síntesis, propiedades y aplicaciones biomédicas". Universidad Complutense de Madrid, España