

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

Evaluación del efecto de compositas de nanotubos de carbono sobre la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland tipo I (PM).



Ricardo Antonio Posadas Villeda

Químico

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

Evaluación del efecto de compositas de nanotubos de carbono sobre la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland tipo I (PM).

Informe de tesis

Presentado por

Ricardo Antonio Posadas Villeda

Para optar al título de

Químico

Guatemala, octubre de 2018

Junta directiva

Dr. Rubén Daniel Velásquez Miranda	Decano
MA. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza	Secretaria
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo	Vocal I
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Byron Enrique Pérez Díaz	Vocal IV
Br. Pamela Carolina Ortega Jiménez	Vocal V

DEDICATORIA

A "YO SOY",

Por estar siempre a mi lado, aun en los momentos más oscuros que he atravesado en mi vida.

A María santísima,

por ser esa buena madre que me acompaña de la mano en el caminar día a día.

A mi madre, MSc.
Mirtala Hazel Villeda
Padilla,

por haberme dado a luz, por criarme con amor y por luchar hasta el final por que yo alcanzara esta meta.
Te amo madre bella.

A mi padre, Douglas
Ricardo Posadas Ortíz

por haber participado del regalo de la vida al traerme al mundo, por tu recuerdo intachable y tu calidad de hombre. Se que celebras junto a mí, estando en la vida eterna.

A mi hermano, Douglas
Gerardo Posadas
Villeda

por ser un gran compañero en el caminar de mi vida.
Te admiro y espero darte siempre el mejor ejemplo.

A mi novia, Faviola
Floricelda Navichoque
del Cid,

por su apoyo incondicional y todo el amor que me ha mostrado.

A mis amigos y familia

por ser luz en el caminar de esta vida.

A Don Bosco, y la orden
de los salesianos, el
movimiento Pandillas de
la Amistad, el movimiento
Encuentros de
Promoción Juvenil,

por forjarme como un hombre de valores y ayudarme a estar cerca del Padre.

A la Universidad de
San Carlos de
Guatemala,

mi Alma Mater, por darme el privilegio de estudiar en sus aulas. Me encuentro en deuda con vos.

AGRADECIMIENTOS

A Cementos Progreso,
S.A.

por la ayuda económica brindada para la realización de la presente investigación y la oportunidad de permitirme laborar dentro de su empresa.

A su Centro de
Investigación y
Desarrollo,

por prestarme sus instalaciones y equipos con tecnología de punta para realizar la presente investigación y permitirme formar parte de sus filas.

A mis asesores, MSc.
Luis Velásquez y MA.
Diana Pinagel,

por ser mentores para mi persona, por su profesionalismo ejemplar.

A mis revisores, MSc.
Mario Rodas y Lic.
Omar Velásquez,

por sus invaluable aportes dentro de la investigación.

A la Licda. Carmela
Barrientos,

por su apoyo incondicional durante todo el proceso de investigación.

Al Señor Cornelio
López,

por su ayuda invaluable durante la parte experimental de la investigación.

INDICE

1.	RESUMEN	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
3.	ANTECEDENTES	4
3.1.	Cemento portland	4
3.1.1.	Tipos de cemento portland	4
3.1.1.1.	Cemento tipo I	4
3.1.1.2.	Cemento tipo II	4
3.1.1.3.	Cemento tipo III	5
3.1.1.4.	Cemento tipo IV	5
3.1.1.5.	Cemento tipo V	5
3.1.1.6.	Cemento con aire incluido	6
3.1.1.7.	Cemento portland blanco	6
3.1.2.	Cementos hidráulicos adicionados (mezclados o compuestos)	6
3.1.2.1.	Cemento tipo IS	7
3.1.2.2.	Cemento tipo S	7
3.1.2.3.	Cemento tipo I (SM)	7
3.1.2.4.	Cemento tipo IP y tipo P	7
3.1.2.5.	Cemento tipo I (PM)	8
3.1.3.	Materias primas para la preparación del cemento	8
3.1.3.1.	Clinker	9
3.1.3.2.	Caliza	9
3.1.3.3.	Puzolanas	10
3.1.3.4.	Yeso	10
3.1.4.	Proceso de fabricación del cemento	12
3.1.4.1.	Preparación de las materias primas	12
3.1.4.2.	Clinkerización	12
3.1.4.3.	Molienda del cemento	13
3.1.5.	Propiedades físicas del cemento	13
3.1.5.1.	Tiempo de fraguado	13
3.1.5.2.	Consistencia normal	13
3.1.5.3.	Resistencias mecánicas	14
3.1.5.4.	Difracción de Rayos X (XRD) y la ley de Bragg	14
3.1.6.	Estudios relacionados con cemento portland tipo I en Guatemala	15
3.2.	Química o ciencias de materiales	16
3.2.1.	Compositas	16
3.2.1.1.	El refuerzo	17
3.2.1.2.	La matriz	17
3.2.2.	El carbono como fuente de estudio en compositas	17
3.2.3.	Nanotubos de carbono	17
3.2.4.	Síntesis de los CNTs	19
3.2.5.	Usos de los CNTs	19

4.	JUSTIFICACION	20
5.	OBJETIVOS	23
5.1.	OBJETIVO GENERAL	23
5.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	23
6.	HIPOTESIS	24
7.	MATERIALES Y METODO	25
7.1.	Universo y muestra	25
7.1.1.	Universo	25
7.1.2.	Muestra	25
7.2.	Materiales	25
7.2.1.	Equipo	25
7.2.2.	Reactivos y materias primas	25
7.2.3.	Cristalería	25
7.2.4.	Otros	25
7.3.	Métodos	26
7.3.1.	Validación de morteros de cemento portland tipo I (PM) de 1 pulgada	26
7.3.2.	Dispersión de nanotubos de carbono multicapa en agua	26
7.3.3.	Adición de nanotubos de carbono multicapa al cemento portland Tipo I (PM)	26
7.3.4.	Determinación del tiempo de fraguado del cemento portland tipo I (PM) con nanotubos de carbono multicapa usando la aguja de Vicat	26
7.3.5.	Determinación de la cantidad de agua para obtener la consistencia normal de la pasta de cemento portland tipo I (PM) con nanotubos de carbono multicapa	27
7.3.6.	Determinación del flujo en morteros de cemento portland tipo I (PM) con nanotubos de carbono multicapa	27
7.3.7.	Determinación de la resistencia a la compresión mecánica de área de morteros de cemento portland tipo I (PM) con nanotubos de carbono multicapa usando especímenes cúbicos de 25 mm (1 pulg) de lado	27
7.3.8.	Difracción de rayos X de MWCNTs	28
7.3.9.	Fluorescencia de rayos X de cemento portland tipo I (PM)	28
8.	RESULTADOS	29
9.	DISCUSIÓN	43
10.	CONCLUSIONES	47

11.	RECOMENDACIONES	48
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
13.	ANEXOS	52

1. RESUMEN

Se evaluó el efecto compositas de nanotubos de carbono sobre la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland tipo I (PM) en distintas proporciones (0.00%, 0.01%, 0.03%, 0.05% y 0.07%). Para poder realizar este experimento se evaluó la variación estadística para trabajar con cubos de $1''^3$ en vez de $8''^3$ obteniendo así coeficientes de variación no mayores a 7.5% para las resistencias mecánicas a 3, 7 y 28 días, con lo que a través de esta validación se permitió la realización de 8 ensayos a $1''^3$ con el material utilizado para un ensayo a $8''^3$. Posteriormente, para dispersar los MWCNTs (Nanotubos de carbono multicapa, por sus siglas en inglés), se utilizó polímeros etéreos policarboxílicos de cadenas de 30 carbonos en grado industrial (Glenium Ace 30). Por lo que también se realizó varios blancos (cemento tipo I (PM) con 0.20% de Glenium Ace 30). Posteriormente con las dispersiones realizadas se realizaron las compositas de 0.00%, 0.01%, 0.03%, 0.05% y 0.07% MWCNTs, Glenium Ace 30 0.20% y cemento tipo I (PM). Encontrando que al aumentar la proporción de MWCNTs disminuyó la resistencia, sin embargo, la proporción de 0.01% aumento la resistencia en 665.84 psi promedio para 3 días y 1121.58 psi promedio para 7 días con respecto al blanco (cemento tipo I (PM) y Glenium Ace 30), pero al fraguar a 28 días no aumentó la resistencia. Todas las funciones de días de fraguado vs resistencia obtenidas poseen una fuerte correlación logarítmica, siendo todas mayores en sus R^2 a 0.90. Se concluyó a través de calorimetría isotérmica que los MWCNTs realizaron un efecto de llenado o "filler effect" sobre la matriz cementante, aumentando así la cinética de reacción a edades tempranas (3 y 7 días) más no la termodinámica de la hidratación de cemento, por lo que al cabo del análisis de fraguado (28 días) se obtuvo la misma resistencia que el blanco de cemento utilizado.

2. INTRODUCCIÓN

El cemento portland es un tipo de cemento hidráulico, esto debido a que fragua y endurece al reaccionar las moléculas de aluminosilicatos de calcio con moléculas de agua. (Fernández Paris, 1980; Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004) Se conoce como pasta de cemento, al cemento con estructura rígida que se forma a partir de la reacción anteriormente descrita. El hecho de que la pasta de cemento adquiere una estructura rígida sugiere que en teoría adquiere una estructura estable, Sin embargo, su comportamiento mecánico no es constante. Esta inestabilidad queda en manifiesto a través de la irreversibilidad tensión-deformación y la retracción irreversible del cemento. (Fernández Paris, 1980) La mayor parte de los productos de la reacción anterior se encuentran cristalizados de manera imperfecta, lo que afecta claramente en las temperaturas y presiones de disociación de éstos, haciéndolas no constantes. Por otra parte, el agua agregada en exceso queda adherida a estos compuestos mediante fuerzas de adsorción y fuerzas capilares de las estructuras cristalinas. Estas moléculas de agua no pueden ser eliminadas totalmente a las condiciones ambientales normales, lo cual provoca que se disminuya la resistencia mecánica de la pasta de cemento. (Fernández Paris, 1980)

La resistencia mecánica de los cementos en Guatemala es evaluada a través de cuatro parámetros principales: el flujo de masa y la relación o razón agua/cemento, el análisis termogravimétrico y la resistencia a compresión hidráulica tras los días de fraguado, los cuales pueden variar yendo desde veinticuatro horas hasta los cincuenta y seis días. Los cementos se acompañan de agregados (arena, en su mayor porcentaje dióxido de silicio), los cuales forman junto a la pasta de cemento una interface cemento-agregados que posee intersticios con aire que son puntos de quiebre de la estructura cristalina correspondiente al cemento fraguado.

Los nanotubos de carbono son estructuras de carbono cilíndricas que se encuentran huecas por dentro. (Ferro, Tulliani, & Musso, 2011, p. 49) Es un material conocido por su aplicación en química de materiales provocando el aumento de la resistencia mecánica de algunos materiales en los que ha sido agregado, entre ellos materiales de construcción. Investigaciones con diversos tipos de cemento son realizadas hoy en día, esperando un buen desempeño de los nanotubos de carbono en los morteros de cemento Portland tipo I (PM).

3. ANTECEDENTES

3.1 Cemento portland

Los cementos portland son cementos hidráulicos que en su mayoría se encuentran compuestos de silicatos hidráulicos de calcio.(Kosmatka et al., 2004) A nivel molecular el cemento es una pasta de hidratos de silicato de calcio que se encuentran polimerizados en una matriz densamente reticulada. Su propiedad más importante es llamada hidraulicidad, la capacidad de establecerse y permanecer insoluble en agua.(MacLaren & White, 2003, p. 623)

El término “cemento portland” se hizo oficialmente reconocido hasta 1824 cuando José Aspidin registro el producto con una patente, el nombre de cemento portland se lo dio por su parecido a la rigidez y color con la roca de construcción de Portland.(MacLaren & White, 2003)

3.1.1. Tipos de cemento portland

Existen diversos tipos de cemento portland los cuales dependen de los requisitos físicos y químicos de este para aplicaciones específicas. La norma ASTM C 150 sobre especificaciones de norma para el cemento portland designa ocho tipos de cemento los cuales son descritos por Kosmatka, et al (2004):

3.1.1.1. Cemento tipo I

Cemento para uso general en la construcción, cemento apropiado donde no es necesario que este tenga propiedades especiales. Sus usos en concreto incluyen pavimentación, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tuberías, unidades de mampostería y producción de concreto prefabricado y precolado.

3.1.1.2. Cemento tipo II

Cemento que es utilizado donde sean necesarias precauciones por reacciones por presencia de sulfatos. Se utiliza en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o aguas subterráneas en donde las concentraciones de sulfatos son mayores de lo normal, pero no severas. Posee propiedades de moderada

resistencia a los sulfatos porque no contiene menos del 8% de aluminato tricálcico. En suelos húmedos o el agua los sulfatos poseen la capacidad de penetrar el concreto y reaccionar con el aluminato tricálcico hidratado provocando expansión, descascaramiento y agrietamiento.

Una baja relación agua/cemento y baja permeabilidad en la preparación de la pasta de cemento Portland tipo II ayuda a disminuir el efecto negativo de los sulfatos sobre la estructura rígida provocada por la hidratación del cemento.

3.1.1.3. Cemento tipo III

Este cemento ofrece resistencia a edades tempranas por lo general en menos de una semana de curado. Es química y físicamente similar al cemento tipo I exceptuando por el tamaño de partícula del cemento las cuales son más pequeñas. Es utilizado cuando se necesita remover con prontitud los encofrados o cimbras o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío su utilización permite una reducción en el tiempo de curado.

3.1.1.4. Cemento tipo IV

Se utiliza donde se debe minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación del cemento. Este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se puede utilizar este tipo de cemento en estructuras de concreto masivo como grandes presas por gravedad, donde el aumento de la temperatura deriva del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada.

3.1.1.5. Cemento tipo V

Se utiliza en concretos que poseen alta exposición a concentraciones de sulfato, principalmente donde el agua subterránea y el suelo poseen altas concentraciones de sulfatos. Esta resistencia a sulfatos se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico, el cual no excede al 5%. Es fundamental utilizar baja relación agua/cemento y baja permeabilidad para un buen desempeño de este cemento ante

su exposición a sulfatos. No es resistente a ácidos y a otras sustancias altamente corrosivas.

3.1.1.6. Cementos con aire Incluido

Existen tres cementos con aire incluido (Tipos IA, IIA Y IIIA). Su composición corresponde a los cementos tipo I, II y III respectivamente, a excepción de que, durante su producción se muelen pequeñas cantidades de material incorporador (inclusor) de aire con el Clinker. Estos cementos poseen una alta resistencia a congelamiento y deshielo. Poseen burbujas minúsculas de aire distribuidas homogéneamente en el volumen generado de concreto.

3.1.1.7. Cemento portland blanco

El cemento portland blanco se produce con las especificaciones del cemento Portland tipo I o tipo III. Se fabrica con materias primas seleccionadas que contienen cantidades insignificantes de óxido de hierro y magnesio, pues estas son las que le dan un color gris, controlando así de tal manera que el producto final sea de color blanco. Este cemento se utiliza con finalidades arquitectónicas en muro estructurales, concreto prefabricado y concreto reforzado con fibras de vidrio, paneles de fachada, superficies de pavimento, estuco, pinturas en cemento, mortero para ladrillos y concreto decorativo.

Kosmatka, et al (2004) también enumera los tipos de cementos portland adicionados con algún otro tipo de material, los cuales son utilizados para disminuir los costos del cemento como producto final, los cuales son presentados a continuación.

3.1.2. Cementos hidráulicos adicionados (mezclados o compuestos)

Según Kosmatka et al., (2004) menciona que los cementos adicionados son producidos por molienda uniforme y conjunto o a través de la mezcla de dos o más materiales finos. Los materiales más utilizados son: cemento portland, escoria granulada de alto horno, ceniza volante, humo de silice, arcilla calcinada, otras puzolanas, cal hidratada. Este tipo de cementos deben ser fabricados bajo la norma

ASTM C 595, sobre especificación para cementos hidráulicos adicionados o ASTM C 1157, sobre especificación de desempeño de cementos hidráulicos.

La norma ASTM C 595 establece 5 tipos principales de cementos adicionados, los cuales son definidos por Kosmatka et al., (2004) de la siguiente manera:

3.1.2.1. Cemento tipo IS

Es cemento portland de alto horno el cual, durante su producción, la escoria granulada de alto horno se muele juntamente con el Clinker de cemento portland o por separado para luego ser mezclada con el cemento. Posee del 25% al 70% de escoria de alto horno de la masa total de cemento.

3.1.2.2. Cemento tipo S

Cemento de escoria el cual es utilizado para la confección de concreto o con cal para el preparo de mortero, pero no se emplea separadamente en concreto estructural. El contenido mínimo de escoria es del 70% de la masa total de cemento.

3.1.2.3. Cemento tipo I (SM)

El cemento portland modificado con escoria se usa para construcciones de concreto en general. Posee no más del 25% de contenido de escoria de la masa total de cemento final.

3.1.2.4. Cemento tipo IP y tipo P

Estos son cementos portland puzolánicos. El cemento IP se lo puede usar para la construcción en general y el tipo P se usa en construcciones que no requieran altas resistencias iniciales. Poseen entre el 15% y 40% de puzolana del total de masa de cemento. Los ensayos de laboratorio indican que los concretos con cemento tipo IP es similar al cemento tipo I.

3.1.2.5. Cemento tipo I (PM)

Los cementos portland modificados con puzolana se usan en construcciones de concreto en general. Este cemento se fabrica con la combinación del cemento portland o el cemento portland de alto horno y una puzolana fina. Posee no más del 15% de puzolana de la masa del cemento final.

3.1.3. Materias primas para la preparación del cemento portland

El cemento portland posee principalmente dos tipos de componentes minerales: adiciones minerales activas e inactivas. Las primeras adiciones, o sea las activas, son aquellas que poseen la capacidad de hidratarse, formando así silicatos de calcio. Ejemplos de esto son las puzolanas, cenizas volantes y arcillas activadas. Las adiciones inactivas, por el contrario, no generan ningún tipo de hidratos y se adicionan al cemento en proporciones que varían entre el 5% y el 30% en peso. (Malhotra & Mehta, 1996, p. 228)

La fabricación comercial de cemento portland incorpora una amplia variedad de minerales, incluyendo: óxido de calcio, sílice, alúmina, óxido de hierro, óxido de magnesio, dióxido de titanio, y muchos otros. De ellos, tres son los más importantes para el producto de cemento final: óxido de calcio, sílice, y alúmina. (MacLaren & White, 2003, p. 624)

Durante la fabricación de cemento se utilizan materias primas como calizas y magras, de igual manera materiales con un alto porcentaje de silicio como lo son areniscas, arcillas y esquistos arcillosos. Estos materiales se agregan de manera en que se puedan formar cantidades determinadas de óxido de calcio, silicio, aluminio y hierro. Esta proporción dependerá claramente de la utilización del cemento. Todos estos materiales deben de ser triturados y posteriormente molidos hasta alcanzar una fineza muy cercana a la del cemento para luego ser sometidos al proceso de clinkerización. (MacLaren & White, 2003, p. 625)

3.1.3.1. Clinker

Las materias primas necesarias para la producción del cemento se mezclan en las proporciones requeridas y se calientan a altas temperaturas por lo general con rotación. Este calentamiento libera en un primer paso el H₂O y el CO₂, para luego provocar algunas reacciones entre los sólidos, incluyendo fusiones parciales de estos. El resultado del enfriamiento del proceso anterior es conocido como clinker. (MacLaren & White, 2003, p. 624)

Los polvos de cemento de alta calidad requieren la presencia de dos componentes principales, el silicato tricálcico, 'C3S', y silicato dicálcico, 'C2S', en las escorias. Estos materiales reaccionan vigorosamente con agua para producir la pasta de cemento formado en el producto final. De los dos, el silicato tricálcico es el material de Clinker más deseable, ya que hidrata y fija mucho más rápido que el silicato dicálcico (ver tabla N°1). (MacLaren & White, 2003, p. 624-625)

Chavarría (2004) realizó un estudio sobre el efecto del Clinker producido en condiciones reductoras en la calidad del cemento, en las variables de resistencias a la compresión hidráulica, tiempos de fraguado y expansión. Utilizó cemento producido en el laboratorio con proporciones distintas de Clinker reducido (0, 20, 40, 60 y 100%) manteniendo constante la adición de yeso. Como resultado del estudio se concluyó que el uso de Clinker reducido en cemento Portland tiene un efecto negativo en la resistencia a la compresión hidráulica, altera los tiempos de fraguado y causa expansión en el cemento cuando es elaborado con este en un 100%.

3.1.3.2. Caliza

Mineral que posee como componente principal carbonato de calcio, se utiliza como un aditivo inactivo en el cemento. Se adiciona directamente al Clinker durante su proceso de molienda en el molino de cemento. Posee un tamaño de partícula lo suficientemente pequeño como para mejorar la distribución granulométrica del cemento, lo cual permite una mejora en la resistencia mecánica temprana del cemento. (Malhotra & Mehta, 1996, p. 230)

3.1.3.3. Puzolanas

Las puzolanas engloban materiales de diferente naturaleza como rocas, suelos, sedimento o productos artificiales que presentan actividad puzolánica. (Malhotra & Mehta, 1996, p. 231)

Son compuestos minerales que se pueden dividir en dos tipos de puzolanas:

- i. De origen volcánico: Las cuales se forman a partir de las cenizas expulsadas por actividad volcánica.
- ii. De origen mineral sedimentario: Este tipo de minerales son ricos en sílice hidratada. Se debe a la acumulación de esqueletos y caparazones de radiolarios y diatomeas.

3.1.3.4. Yeso

El yeso se encuentra compuesto principalmente de sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sin embargo, también posee sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). El yeso es utilizado para dar un efecto retardante en el fraguado del cemento, sin este compuesto, el aluminato de calcio cristalizaría en un tiempo menor a los 10 minutos. Dependiendo de la proporción de yeso agregada en el cemento, el efecto retardante puede darse entre horas y días. (Theisen & Johansen, 1975, p.788)

Tabla N°1: Componentes principales del Clinker y porcentajes aproximados de sus componentes

Nombre del compuesto	Composición	Formula Empírica	Abreviatura	%≈
Óxido de calcio	CaO	CaO	“C”	Traza
Dióxido de silicio	SiO ₂	SiO ₂	“S”	Traza
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	“A”	Traza
Óxido de hierro (III)	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	“F”	Traza
Silicato dicálcico	2CaO•SiO ₂	Ca ₂ SiO ₄	“C ₂ S”	20
Silicato tricálcico	3CaO•SiO ₂	Ca ₃ SiO ₅	“C ₃ S”	55
Aluminato tricálcico	3CaO•Al ₂ O ₃	Ca ₂ Al ₂ O ₆	“C ₃ A”	10
Aluminoferrato tetracálcico	4CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	“C ₄ AF”	8
Gel de silicato de calcio hidratado	(CaO) _x •SiO ₂ •yH ₂ O donde x<1.5	Variable	“CSH”	5
Silicato de calcio (wollastonita)	CaO•SiO ₂	CaSiO ₃	“CS”	Traza
Silicato de calcio (Rankinita)	3CaO•2SiO ₂	Ca ₃ Si ₂ O ₇	“C ₃ S ₂ ”	Traza
Silicato de aluminio y calcio (Gehlenita)	2CaO•Al ₂ O ₃ •SiO ₂	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	“C ₂ AS”	Traza
Silicato de aluminio (Mullita)	3Al ₂ O ₃ •2SiO ₂	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	“A ₃ S ₂ ”	Traza
Silicato de aluminio y calcio (Anortita)	CaO•Al ₂ O ₃ •2SiO ₂	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	“CAS ₂ ”	Traza
Silicato de aluminio	2Al ₂ O ₃ •2SiO ₂	Al ₄ Si ₂ O ₁₀	“A ₂ S ₂ ”	Traza
Aluminato de calcio	CaO•Al ₂ O ₃	CaAl ₂ O ₄	“CA”	Traza
Dialuminato de calcio	CaO•2Al ₂ O ₃	CaAl ₄ O ₇	“CA ₂ ”	Traza
Heptaaluminato de dodecacalcio	12CaO•7Al ₂ O ₃	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	“C ₁₂ A ₇ ”	Traza
Hexaluminato de calcio	CaO•6Al ₂ O ₃	CaAl ₁₂ O ₁₉	“CA ₆ ”	Traza

Fuente: MacLaren, D. & White, M. (2003) Cement: Its Chemistry and Properties. Journal of Chemical Education. 80 (6), p. 624.

3.1.4. Proceso de fabricación del cemento

3.1.4.1. Preparación de las materias primas

Posterior a la obtención de la materia prima en cantera se debe preparar la materia prima para poder ser sometida a las altas temperaturas de la clinkerización o calcinación. Las fases más importantes son la trituración, molienda, secado y homogenización. La reducción del tamaño de partícula de las materias primas a polvo fino es necesaria para conseguir una mezcla homogénea para la formación Clinker.(Orihuela Espina, 2007, p.33) La reducción del tamaño de partícula se da en al menos dos pasos: la trituración y la molienda. La trituración es la reducción del tamaño de partícula de los materiales desde su tamaño original, como es obtenido en la cantera, hasta los 2 cm de diámetro. La molienda comprende la reducción del tamaño de partícula desde los 2 cm de diámetro hasta los 0.2 mm de diámetro, tamaño el cual se considera adecuado para realizar una prehomogenización para realizar la posterior clinkerización. (Orihuela Espina, 2007, pp. 34-35)

3.1.4.2. Clinkerización

El Clinker es un producto sólido que se obtiene llevando las materias primas a una temperatura de 1500°C. Durante este proceso ocurren reacciones químicas con materias tipo sólido-sólido y sólido-líquido en una atmósfera bastante oxidante dentro de un horno, esto con el fin de provocar una combustión exitosa. En un primer momento de la clinkerización el carbonato de calcio (CaCO_3) reacciona con óxido de aluminio (Al_2O_3) y sílice (SiO_2) para formar óxido de calcio (CaO) a través de la liberación de CO_2 a 700°C. Posteriormente al elevar la temperatura a 1000°C el óxido de calcio reacciona con el silicio para formar el silicato dicálcico (Ca_2SiO_4 o C_2S) con liberación de CO_2 , donde el medio de reacción es líquido, propiciado por los óxidos de aluminio y hierro. A 1250°C el C_2S reacciona con los óxidos de aluminio formando así el silicato tricálcico (Ca_3SiO_5 o C_3S), la síntesis de este compuesto concluye en una elevación de la temperatura hasta los 1500°C.(MacLaren & White, 2003, p. 625-626)

3.1.4.3. Molienda de cemento

Es el segundo proceso para la realización del cemento es la molienda. Durante este proceso se reducen las partículas de Clinker, yeso y aditivos a polvo fino, inferior a 100 micrones. La molienda se realiza en molinos de bolas, que consisten en tubos de acero divididos en dos o tres cámaras, dentro de las cuales se colocan bolas de acero que ocupan aproximadamente un tercio del volumen del tubo. El molino gira y arrastra las bolas de acero, éstas chocan entre sí y contra la pared del tubo atrapando al material, provocando de esta forma la trituración y pulverización. (Cementos Bio Bio S.A., 2013)

Algunos aditivos de molienda utilizados en la industria cementera son aminoacetatos, etilenglicol, propilenglicol, trietanolamina, entre otros. (Duda, 2003, p. 76)

3.1.5. Propiedades físicas del cemento

3.1.5.1. Tiempo de fraguado

Es el tiempo que transcurre entre el instante en que el cemento se mezcla con el agua para formar una pasta y el momento en que la pasta pierde su plasticidad. Se determina con un instrumento conocido como aparato de Vicat el cual consiste en una aguja de 1 mm² de superficie con un peso de 300 g, la cual se inserta en la pasta de cemento de consistencia normal dentro de un molde. Al momento en que la aguja se detiene a 4 mm de fondo, se le considera como tiempo inicial del fraguado. Cuando la aguja penetra solo 0,5 mm se considera como tiempo final del fraguado. (Cementos Bio Bio S.A., 2013, p. 21)

3.1.5.2. Consistencia Normal

Es la cantidad de agua expresada como porcentaje de peso del cemento y que le da al cemento una plasticidad determinada. Por lo general, la consistencia se determina con una sonda de Tetmejer.

La prueba consiste en un vástago pulido de 1 cm de diámetro que se hace penetrar en la pasta con un peso de 300 g. Se considera que cuando la sonda se detiene a 6 mm del fondo, la pasta de cemento posee una consistencia normal. (Cementos Bio Bio S.A., 2013, p. 21)

3.1.5.3. Resistencias Mecánicas

La resistencia mecánica es la capacidad que posee un material de evitar la deformación o rotura que puedan producirse en este debido a la aplicación o sometimiento de una fuerza sobre este. Existen por tanto diversos tipos de resistencias mecánicas: a la tensión, a la compresión, a la flexión, al corte y a la torsión (Salazar Trujillo, 2007, p. 12), siendo tres de estos los análisis de resistencia mecánica aplicados a cemento, según su orden de importancia: compresión, tracción (tensión) y flexión. (Vian Ortuño, 2006, p. 196)

Los cementos por lo general van adquiriendo resistencia progresiva con el tiempo, fenómeno que se conoce como curva de resistencia del cemento.

Los cementos deben de cumplir con los valores mínimos de resistencia de algunas normas predeterminadas. Por lo general los ensayos de resistencia mecánica de cemento se encuentran normalizados.

3.1.5.4. Difracción de Rayos X (XRD) y la ley de Bragg

La difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés) ha sido utilizada ampliamente para analizar la composición de suelos e identificar minerales, aleaciones, metales, materiales catalíticos, ferroeléctricos y luminiscentes entre otros. Este tipo de análisis se ha incorporado al estudio de materiales en el área de nanociencias, debido a que la información que arroja un difractograma ayuda a determinar la estructura cristalina y la composición de un material, e incluso, a partir de un difractograma se pueden calcular los tamaños de partícula. El difractograma está formado por reflexiones (picos) que corresponden a las distancias de dimensiones nanométricas entre familias de planos de átomos. (Aparicio & Carbajal, 2010)

La estructura de los cristales es estudiada a través de la difracción de fotones, neutrones y electrones. La difracción generada depende directamente de la estructura del cristal y de la longitud de onda que se utiliza. Para dar respuesta a la difracción de rayos X, W.L. Bragg dedujo una fórmula simple en la cual propone que las ondas incidentes se reflejan especularmente en los planos paralelos del cristal, haciendo así que cada plano refleje una fracción muy pequeña de la radiación. Con esto se deduce que el ángulo de incidencia de las ondas es igual al ángulo de

reflexión. Los haces difractados aparecen cuando las reflexiones procedentes de planos de átomos paralelos interfieren constructivamente. (Kittel, 2003, p.35)

La ecuación de la ley de Bragg está dada cómo:

$$2d \operatorname{sen} \theta = n\lambda$$

Donde " d " se refiere a la distancia de los planos paralelos de la red cristalina distantes entre sí del cristal estudiado. Por lo que la diferencia de trayectos de los rayos reflejados en los planos adyacentes corresponde a " $2d \operatorname{sen} \theta$ " donde " θ " es el ángulo de incidencia de los haces que generan difracción con respecto al plano. Las interferencias constructivas de la radiación de planos adyacentes se generan cuando la diferencia del trayecto es un número entero " n " de la longitud de onda " λ ". Esto puede darse únicamente para longitudes de onda $\lambda \leq 2d$.

3.1.6. Estudios relacionados con cemento portland tipo I en Guatemala

Molina (1989) realizó un estudio que tuvo como objetivo evaluar el desempeño de morteros preparados con cementos mezclados con escorias de horno para albañilería y revestimientos. Los resultados mostraron un buen desempeño de dichos cementos los cuales cumplieron con las normas ASTM aplicables al caso estudiado.

Barrios (1995) evaluó el efecto de la adición de caliza dolomítica en el contenido de SO₃ óptimo del Cemento Portland tipo I (PM).

Cano (2002) desarrolló un método para evaluar en el laboratorio la quemabilidad de la harina cruda en la producción de Clinker determinando así la ecuación que permite obtener la cantidad necesaria de combustible a utilizar en la producción de Clinker.

Godoy (2006) realizó un estudio teórico sobre el desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos, donde se caracteriza a los cementos que se realizan en el suelo guatemalteco.

Marroquin (2008) realizó un estudio sobre el efecto de un aditivo alcalino hidratado MO_x(OH)_n en la actividad hidráulica del cemento endurecido, por medio de la activación química del material puzolánico. Utilizó diferentes porcentajes de aditivo

(0.0, 0.5, 1.0 y 1.5%) en morteros endurecidos de cemento portland conteniendo un 35% de material puzolánico, determinando la reactividad hidráulica del cemento a 28 días de curado. Como resultado del estudio se concluyó que la actividad hidráulica del cemento aumenta como consecuencia del aditivo agregado, lo que implica que este aditivo activa químicamente la actividad hidráulica de las puzolanas naturales.

Cifuentes (2014) realizó un estudio que tuvo como objetivo determinar por medio de un análisis termogravimétrico el grado de deshidratación del yeso en la producción de cemento. Para ello se prepararon cinco cementos con distintas adiciones de sulfato de calcio dihidratado y sulfato de calcio hemihidratado en un molino de bolas experimental utilizando Clinker y yeso natural. Estos fueron analizados por termogravimetría, en donde se obtiene la deshidratación del sulfato de calcio dihidratado en dos etapas, de dihidrato a hemihidrato en un rango de temperatura entre 148°C- 175°C, y de hemihidrato a anhidro en el rango de temperatura de 194°C – 210°C. Como también se obtuvo la deshidratación del sulfato de calcio hemihidratado en el rango de temperatura de 197°C- 213°C hacia la forma anhidra.

3.2 Química o Ciencia de Materiales

Según Callister & Rethwisch, en 2007, afirmaron que la ciencia de materiales es la ciencia que investiga la relación que existe entre las estructuras y las propiedades de los materiales. El rol del investigador dedicado a la ciencia de materiales es desarrollar o sintetizar nuevos materiales que puedan ser potencialmente utilizados como productos innovadores usando materiales existentes conocidos como materiales compuestos.

3.2.1 Compositas

Una composita se encuentra definida como la combinación de dos o más materiales que juntos brindan mejores propiedades que siendo utilizados como componentes individuales en donde a diferencia de las aleaciones metálicas, cada material resguarda por separado sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. (Campbell, 2010, p. 1)

Según Campbell (2010) una composita se compone de dos fases principalmente:

3.2.1.1. El refuerzo

La fase del refuerzo es la que da fuerza y rigidez a la composita. En la mayoría de los casos el refuerzo es más duro, fuerte y rígido que la matriz en la cual se encuentra. Usualmente es una fibra o una partícula.

3.2.1.2. La matriz

La matriz es la fase continua de un material compuesto la cual puede ser un polímero, metal o cerámico. Los polímeros poseen baja fuerza y rigidez, los metales poseen fuerza y rigidez intermedia, pero poseen gran ductilidad, mientras los cerámicos poseen gran fuerza y rigidez, sin embargo, son quebradizos.

La matriz realiza funciones muy críticas como mantener las fibras o partículas en la orientación y espaciado adecuado, así como protegerlas de abrasión y el ambiente en que se encuentre la composita.

3.2.2 El carbono como fuente de estudio en compositas

El carbono en sus distintos tipos de alótropos es de interés hoy en día para la formación de compositas. En estructuras de tres dimensiones (3D) se conoce muy bien al diamante y al grafito, sin embargo, este elemento tan abundante en la tierra puede formar alótropos en dimensiones más pequeñas (Dos dimensiones, 2D, una dimensión, 1D o adimensional, 0D) los cuales son conocidos como nanomateriales de carbono. Ejemplo de estas dimensiones son, los nanotubos de carbono como 1D, los fullerenos como 0D y el grafeno como 2D en sus láminas singulares de grafito. (Kaushik & Majumder, 2014, p. 17)

3.2.3 Nanotubos de carbono

Descubiertos en los años 1950's por el físico estadounidense Roger Bacon, quien publicó su trabajo en el año 1960. Los nanotubos de carbono (CNTs por sus siglas en inglés con las cuales nos referiremos a ellos en el documento) son canales tubulares huecos formados ya sea por una sola pared de hoja de grafeno enrollado (SWCNTs por sus siglas en inglés correspondientes a "single walled".) o varias paredes de grafeno enrolladas (MWCNTs por sus siglas en inglés correspondientes a "multiple walled", siglas con las que nos referiremos a ellos en el documento) teniendo un rango de diámetros entre 0.4nm y 10nm para los SWCNTs y de 4nm a 100nm para los MWCNTs. (Ferro, Tulliani, & Musso, 2011, p. 49)

Los nanotubos de carbono son partículas insolubles por lo que se realizan dispersiones de este producto en agua con ayuda de surfactantes, su aplicación se ha dado desde concentraciones cercanas a 0% p/p hasta 0.1% p/p. (Rivas et al., 2007)

Los nanotubos de carbono poseen características y propiedades estructurales únicas. A pesar de ser tan pequeños poseen gran perfección estructural y excepcionales propiedades electrónicas, mecánicas, ópticas, térmicas y de transporte. Todo esto se debe a su estructura electrónica, pues cuando se unen los átomos de carbono para formar la hoja de grafeno, un orbital “s” y dos orbitales “p” se hibridizan para formar tres orbitales “sp²” a 120° cada uno sobre un mismo plano, por lo que al formar los enlaces “σ” el resultado es gran rigidez y fuerza en los CNTs. El orbital “p” restante, perpendicular al plano de los enlaces “σ” contribuye a las interacciones entre capas o paredes de los MWCNTs y forma enlaces “π” débiles, fuera del plano y deslocalizados. (Basu-Dutt, Minus, Jain, Nepal, & Kumar, 2012, p. 222)

Según Basu-Dutt et al (2012) dependiendo de cómo “se enrolla” la hoja de grafeno bidimensional para la formación de los CNTs existe la posibilidad de formar tres tipos de CNTs con distintas conformaciones espaciales: de silla, zigzag o quiral.

i. CNTs con estructura de Silla

Se forman cuando enlaces C–C en lados opuestos de cada hexágono son perpendiculares al eje del CNT teniendo un ángulo θ con respecto al eje de 30° para cada hexágono de la molécula.

ii. CNTs con estructura de Zigzag

Se forman cuando los dos enlaces C–C son paralelos al eje del CNT haciendo que el ángulo θ con respecto al eje sea de 0°.

iii. CNTs con estructura quiral

Se forman cuando los enlaces C–C no poseen un ángulo definido con respecto al eje del CNT, este ángulo θ puede ser entre 0° y 30°.

3.2.4 Síntesis de los CNTs

La primera síntesis de los CNTs fue reportada Iijima en 1991 por método de descarga por arco eléctrico. (Basu-Dutt et al., 2012; Iijima, 1991) Luego de unos años Endo et al., en 1993 descubrieron una síntesis por deposición química de vapor en la cual se encontraron MWCNTs, siendo esta la síntesis que aún se utiliza hoy en día para obtenerlos. (Basu-Dutt et al., 2012; Endo et al., 1993) Posteriormente Guo, Nikolaev, Thess, Colbert, & Smalley en 1995 reportaron la síntesis de CNTs por vaporización láser la cual permite sintetizar de manera más eficaz los SWCNTs. (Basu-Dutt et al., 2012; Guo et al., 1995)

3.2.5 Usos de los CNTs

A parte de su eficaz aplicación en distintas compositas estructurales para la construcción, es utilizado hoy en día en aplicaciones eléctricas fabricando a partir de CNTs electrodos de los capacitores electroquímicos de dispositivos eléctricos. También ha sido utilizado como sensor de gases en dispositivos microelectromecánicos. Por último, la aplicación más actual que se le ha dado es en pantallas de dispositivos eléctricos, obteniendo muy buenos resultados con pantallas de gran calidad y resistencia. (Basu-Dutt et al., 2012)

Se ha probado la eficacia de los nanotubos de carbono en compositas con cemento mejorando así la resistencia mecánica por compresión de área. (Rivas et al., 2007)

4. JUSTIFICACIÓN

Según el informe estadístico emitido en el 2013 por la Federación Interamericana de Cemento, el 67% de las familias que habitan el suelo guatemalteco no cuentan con un techo para vivir o habitan en viviendas de mala calidad, siendo así, el segundo país a nivel centroamericano con mayor porcentaje tan solo por detrás de Nicaragua y el cuarto a nivel iberoamericano tan solo por detrás de Nicaragua, Bolivia y Perú.

Según el Informe Nacional de Desarrollo Humano 2015/2016 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, el Banco Mundial en el 2003 afirmó que el 79% del total de viviendas en terrenos adquiridos mediante el Fondo de Tierras se encontraban en condiciones de pobreza, careciendo de infraestructura básica como agua potable, electricidad o una vivienda adecuada. Según las estadísticas emitidas por este mismo informe, en los últimos 15 años, el año 2015 y 2016 han sido los años en que se ha invertido menor cantidad de gasto público en millones de quetzales por parte del Estado guatemalteco en comunicaciones, infraestructura y vivienda.

Por otra parte, no menos importante, Guatemala es un país que posee amenazas sísmicas altas, debido a que se encuentra en la unión de tres placas tectónicas (la placa del Caribe, de Norteamérica y de Cocos). A pesar de esto la situación de la vivienda en Guatemala continúa siendo precaria y la gran mayoría de viviendas en el país se continúan construyendo de adobe. (Gramajo, 2015, p.33)

La química de materiales es la rama de la química que se enfoca en la mejora de materiales sólidos de gran interés para que puedan poseer propiedades eventualmente aplicables, siendo así la rama de la química utilizada para el presente estudio, donde se buscará realizar mejoras a resistencia mecánica de cemento portland tipo I (PM). Químicamente, se le conoce como pasta de cemento al producto con estructura rígida que se forma a partir de la reacción del cemento portland con agua. El hecho de que la pasta de cemento adquiere una estructura rígida permitiría pensar que adquiere una estructura estable, sin embargo, su comportamiento mecánico no es constante. Esta inestabilidad queda en manifiesto

a través de irreversibilidad tensión-deformación y la retracción irreversible. (Fernández Paris, 1980) Se conoce que físicamente la interfase de la pasta de cemento y los agregados, en el concreto, presentan fragilidad ante la resistencia mecánica debido a los intersticios que presentan. Por otra parte, el agua agregada en exceso queda adherida a estos compuestos mediante fuerzas de adsorción y fuerzas capilares de las estructuras cristalinas. Estas moléculas de agua no pueden ser eliminadas totalmente a las condiciones ambientales normales (Fernández Paris, 1980), lo cual provoca que se disminuya la resistencia mecánica del concreto realizado.

Por lo mencionado anteriormente, hoy en día se ha buscado un material de refuerzo para estas debilidades, a través de la química de materiales y química orgánica supramolecular con compuestos químicos que se adapten a las necesidades de la industria del cemento (Kosmatka et al., 2004), proponiendo así en la presente investigación un material compuesto de nanotubos de carbono con cemento portland tipo I (PM) para reforzar las interfaces de cemento y agregados del concreto.

Los nanotubos de carbono poseen excelentes propiedades mecánicas. Es un material que posee alta dureza, tenacidad, resistencia mecánica, flexibilidad y elasticidad. Éstos también son muy ligeros debido a la estructura que poseen, la cual provoca que estos ocupen una gran cantidad de volumen. Estas características permiten proponer que el aplicarlos como un aditivo en la pasta de cemento provocara una mejora en la resistencia mecánica de morteros de cemento (Rivas et al., 2007), haciendo que de igual manera el genera un cemento de mayor resistencia con menor cantidad de Clinker permitiría disminuir la emisión de CO₂.

Por otra parte, Cementos Progreso, S.A. es una empresa que abre sus puertas a las investigaciones químicas para trabajos finales de tesis, capacitando a los egresados para poder poseer mano de obra calificada, prestando el equipo necesario para realizar investigaciones y suministrando con los reactivos que estas necesiten.

Así mismo una de las líneas de investigación propuestas por el Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas de la Facultad de Ciencias Químicas y

Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala incluye la industria, siendo este una investigación innovadora que abre campo para futuros estudios.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General:

- Evaluar el efecto en la resistencia mecánica de compositas de nanotubos de carbono multicapa en proporciones 0.00%, 0.01%, 0.03% 0.05% y 0.07% en cemento tipo I (PM).

5.2 Objetivos Específicos:

- Validar un método de evaluación de resistencia mecánica a la compresión de área en morteros de cemento tipo I (PM) de 1"³ como alternativa al método de 8"³.

6. HIPOTESIS

- A. Existe una correlación positiva entre el porcentaje de composita de nanotubos de carbono multicapa utilizado como aditivo en cemento tipo I (PM) y la resistencia a la compresión de área de mortero del cemento portland realizado

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Universo y muestra:

7.1.1 Universo: cemento portland tipo I (PM)

7.1.2 Muestra: 1 saco de 30 Kg de cemento UGC.

7.2 Materiales:

7.2.1 Equipo

- a) Mesa de flujo de cemento
- b) Calibrador de medición de flujo o Vernier digital
- c) Aparato de Vicat
- d) Mezcladora Hobart N50
- e) Batidora Oster de 4 velocidades
- f) Cuarto húmedo
- g) Máquina de ensayo de resistencia de compresión de área
Toni Technik ToniZEM 1547
- h) Baño ultrasónico 2012 ultrasonic cleaning system
- i) Balanza semianalítica
- j) Difractómetro de rayos x PANalytical Empyrean

7.2.2 Reactivos y materias primas

- a) Cemento portland
- b) Arena estándar graduada de óxido de silicio
- c) Agua de mezclado
- d) Nanotubos de carbono multicapa Sigma-Aldrich
- e) MasterGlenium® ACE 30 como dispersante

7.2.3 Cristalería

- a) Vasos de precipitado de 250mL, 500mL, 1L y 2.5L
- b) Probetas de vidrio graduadas
- c) Varillas de agitación

7.2.4 Otros

- a) Paleta plástica
- b) Moldes para morteros de cemento de 8"³
- c) Moldes para morteros de cemento de 1"³

- d) Espátula
- e) Tazón para cemento
- f) Piletas de curado a 3 días, 7 días y 28 días

7.3 Métodos

7.3.1 Validación de morteros de cemento portland tipo I (PM) de 1 pulgada

Se realizó una validación estadística de cubos de 2"×2"×2" y 1"×1"×1" a partir de la norma Coguanor NTG 41003 h4 a través de la F de Fisher a 1, 3, 7 y 28 días de fraguado

7.3.2 Dispersión de Nanotubos de carbono multicapa en agua

Se realizaron pruebas de dispersión de proporciones de nanotubos de carbono, de 0.01%, 0.03%, 0.05% y 0.07% en peso con respecto a la masa de cemento a utilizar, en agua con 0.5 mL MasterGlenium® ACE 30

7.3.3 Adición del Nanotubos de carbono multicapa al cemento portland tipo I (PM)

Se realizará distintas compositas de cemento portland con nanotubos de carbono en cuanto a porcentaje de nanotubos de carbono siendo estos: 0.00%, 0.01%, 0.03%, 0.05%, 0.075%, 0.1% y 0.2%

7.3.4 Determinación del tiempo de fraguado, usando la aguja de Vicat, del cemento portland tipo I (PM) utilizado para la realización de mortero con nanotubos de carbono multicapa

La determinación del tiempo de fraguado se realizará a través de la norma técnica guatemalteca COGUANOR NTG 41003 h10 "Método de ensayo. Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico usando la aguja de Vicat" la cual es equivalente a la norma ASTM C191-08.

7.3.5 Determinación de la cantidad de agua para obtener la consistencia normal de la pasta de cemento portland tipo I (PM) utilizado para la realización de mortero con nanotubos de carbono multicapa

La determinación de la consistencia normal también puede realizarse a través de la aguja de Vicat, logrando determinar la cantidad de agua necesaria para obtener la pasta con la consistencia deseada. El ensayo se realizó según norma técnica guatemalteca COGUANOR NTG 41003 h1 “Método de ensayo. Determinación de la cantidad de agua para obtener la consistencia normal de la pasta de cemento hidráulico.” La cual es esencialmente equivalente a la norma ASTM C187-11E1.

7.3.6 Determinación del flujo en morteros de cemento portland tipo I (PM) utilizado para la realización de mortero con nanotubos de carbono multicapa

Se realizó el ensayo de la norma técnica guatemalteca COGUANOR NTG 41003 h13 “Método de ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico” la cual es esencialmente equivalente a la norma ASTM C1437-07.

7.3.7 Determinación de la resistencia a la compresión mecánica de área de mortero de cemento portland tipo I (PM) con nanotubos de carbono usando especímenes cúbicos de 25 mm (1 pulg) de lado.

Se realizó la norma técnica guatemalteca COGUANOR NTG 41003 h4 “Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado.” la cual es esencialmente equivalente a la norma ASTM C109/C109M-1,1b con la única variación de el volumen de los cubos utilizados.

7.3.8 Difracción de rayos X de MWCNTs

Se realizó mediante la técnica de difracción de rayos X utilizando un difractómetro PANalytical Empyrean. El barrido del goniómetro del equipo se ajustó entre los ángulos $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ y la duración de dicho barrido fue de 8 minutos. La identificación de las fases cristalinas se realizó utilizando el software HighScore Plus (Versión 4.5). El equipo posee una lámpara de cobre con la que realizó el análisis a una longitud de onda correspondiente a la $K\alpha$ de cobre correspondiente a 1.54060\AA

7.3.9 Fluorescencia de rayos X de cemento portland tipo I (PM)

Se realizó la fluorescencia de rayos X a través de un equipo Thermo Fisher Scientific ARL OPTIM'X de onda dispersiva con tubo de cobre al cemento portland tipo I (PM) utilizado para realizar la investigación, así como del cemento portland tipo I (PM) adicionado con nanotubos de carbono multicapa

7.3.10 . Calorimetría isotérmica de cemento portland tipo I (PM) y cemento Portland tipo I (PM) con MWCNTs

Se realizó una calorimetría isotérmica del cemento portland tipo I (PM) individualmente y otra del cemento portland tipo I (PM) acompañado de MWCNTs en la proporción con los mejores resultados en resistencia a la compresión mecánica de área, siendo esta la de 0.01%, en un calorímetro Calmetrix Ical-8000 siguiendo la norma ASTM C109/C109M-1,1b.

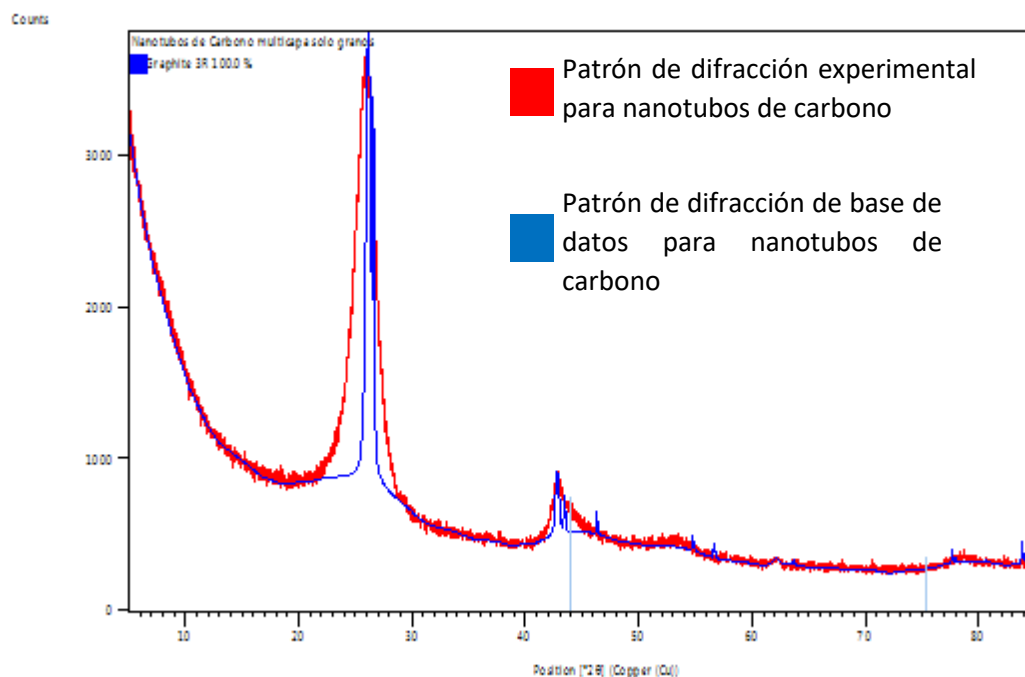
8. RESULTADOS

Tabla N°1: Composición química del cemento tipo I (PM) utilizado en el estudio

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Perdida al fuego	TOTAL	Residuo Insoluble
32.13	6.55	2.32	46.24	2.33	1.31	1.12	2.63	3.86	98.48	23.47

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Grafica N°1: Difractograma de rayos X de nanotubos de carbono multicapa (MWCNTs).



Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Tabla N°2: Picos registrados por el software de difracción de rayos X con los nanotubos de carbono multicapa MWCNTs

Pos. [°2θ]	Altura [cts]	Altura de pico medio [°2θ]	Espaciado-d [Å]	Intensidad Relativa [%]
26.1244	2017.00	0.5117	3.40827	100.00
26.5934	1723.11	0.1000	3.34922	85.43
42.7802	306.95	0.3582	2.11205	15.22
43.4383	228.09	0.1000	2.08157	11.31
46.3055	147.41	0.1000	1.95913	7.31
54.7955	109.80	0.1000	1.67396	5.44
56.6612	89.91	0.1000	1.62319	4.46
62.1027	29.92	0.6140	1.49339	1.48
63.6621	32.81	0.1000	1.46051	1.63
77.6850	87.58	0.1000	1.22819	4.34
80.7253	27.81	0.1000	1.18942	1.38
83.8377	139.39	0.1000	1.15301	6.91

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Tabla N°3: Resultados de parámetros estadísticos medidos para comprobar la variabilidad de metodología de resistencia a la compresión de área de morteros de cemento tipo I (PM) con cubos de 8"³ y 1"³ a los 3 días.

Cubos de 8"³	Parámetros estadísticos según N/mm²	
	Mediana	16.83
	Media	16.62
	Desviación	1.11
	Varianza	1.24
	Coeficiente de variación	6.71
	N	30
	Parámetros estadísticos según psi	
	Mediana	2440.98
	Media	2409.80
Cubos de 1"³	Parámetros estadísticos según N/mm²	
	Mediana	15.70
	Media	15.94
	Desviación	1.11
	Varianza	1.24
	Coeficiente de variación	6.97
	N	36
	Parámetros estadísticos según psi	
	Mediana	2277.09
	Media	2312.29

Fuente: Resultados experimentales obtenidos en el laboratorio químico, CETEC, CI+D, Cemento Progreso, planta La Pedrera zona 6 de la ciudad de Guatemala. (diciembre del año 2016)

Tabla N°4: Resultados de parámetros estadísticos medidos para comprobar la variabilidad de metodología de resistencia a la compresión de área de morteros de cemento tipo I (PM) con cubos de 8"³ y 1"³ a los 7 días.

		Parámetros estadísticos según N/mm2		
Cubos de 8"³	Mediana		22.18	
	Media		22.34	
	Desviación		1.09	
	Varianza		1.18	
	Coeficiente de variación		4.86	
	N		30	
			Parámetros estadísticos según psi	
	Mediana		3216.21	
	Media		3240.24	
	Desviación		157.62	
Varianza		24844.30		
Coeficiente de variación		4.86		
N		30		
		Parámetros estadísticos según N/mm2		
Cubos de 1"³	Mediana		18.73	
	Media		18.46	
	Desviación		1.36	
	Varianza		1.85	
	Coeficiente de variación		7.36	
	N		36	
			Parámetros estadísticos según psi	
	Mediana		2716.56	
	Media		2677.69	
	Desviación		197.13	
Varianza		38861.84		
Coeficiente de variación		7.36		
N		36		

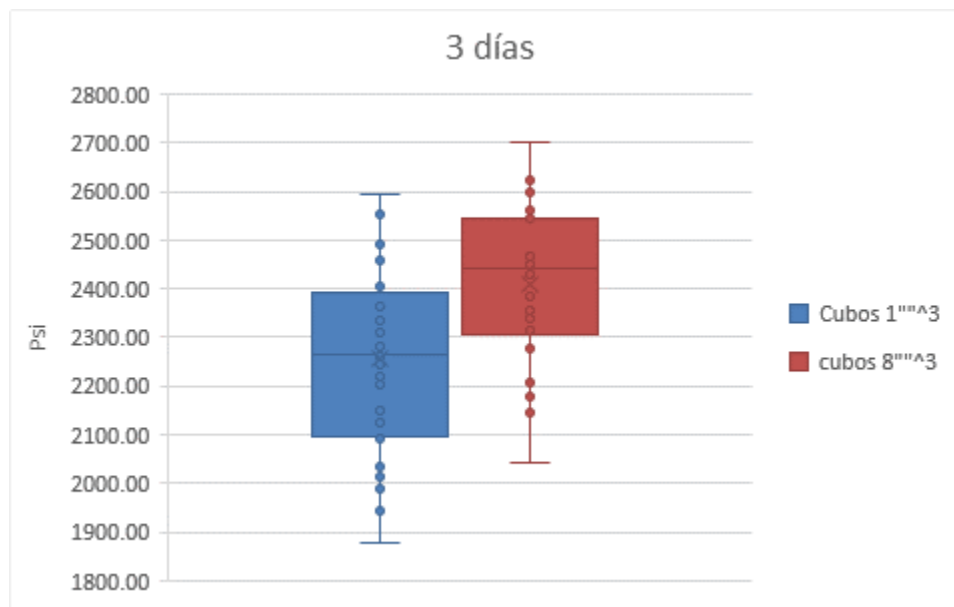
Fuente: Resultados experimentales obtenidos en el laboratorio químico, CETEC, CI+D, Cemento Progreso, planta La Pedrera zona 6 de la ciudad de Guatemala. (diciembre del año 2016)

Tabla N°5: Resultados de parámetros estadísticos medidos para comprobar la variabilidad de metodología de resistencia a la compresión de área de morteros de cemento tipo I (PM) con cubos de 8"³ y 1"³ a los 28 días.

		Parámetros estadísticos según N/mm2		
Cubos de 8"³	Mediana		31.73	
	Media		31.79	
	Desviación		1.95	
	Varianza		3.79	
	Coefficiente de variación		6.12	
	N		30	
			Parámetros estadísticos según psi	
	Mediana		4602.05	
	Media		4611.23	
	Desviación		282.32	
Varianza		79702.88		
Coefficiente de variación		6.12		
N		30		
Cubos de 1"³			Parámetros estadísticos según N/mm2	
	Mediana		30.86	
	Media		30.56	
	Desviación		1.77	
	Varianza		3.12	
	Coefficiente de variación		5.78	
	N		36	
			Parámetros estadísticos según psi	
	Mediana		4475.14	
	Media		4432.16	
Desviación		256.27		
Varianza		65674.73		
Coefficiente de variación		5.78		
N		36		

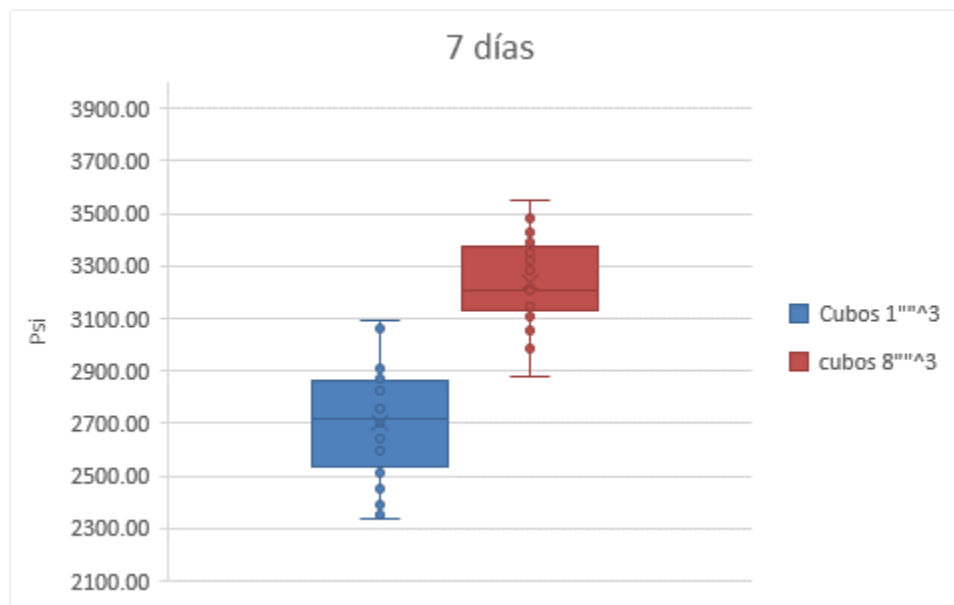
Fuente: Resultados experimentales obtenidos en el laboratorio químico, CETEC, CI+D, Cemento Progreso, planta La Pedrera zona 6 de la ciudad de Guatemala. (diciembre del año 2016)

Gráfica N°2: Diagrama de cajas y bigotes para las resistencias a la compresión de área de cubos de mortero de cemento tipo I (PM) de $1''^3$ y $8''^3$ a los 3 días.



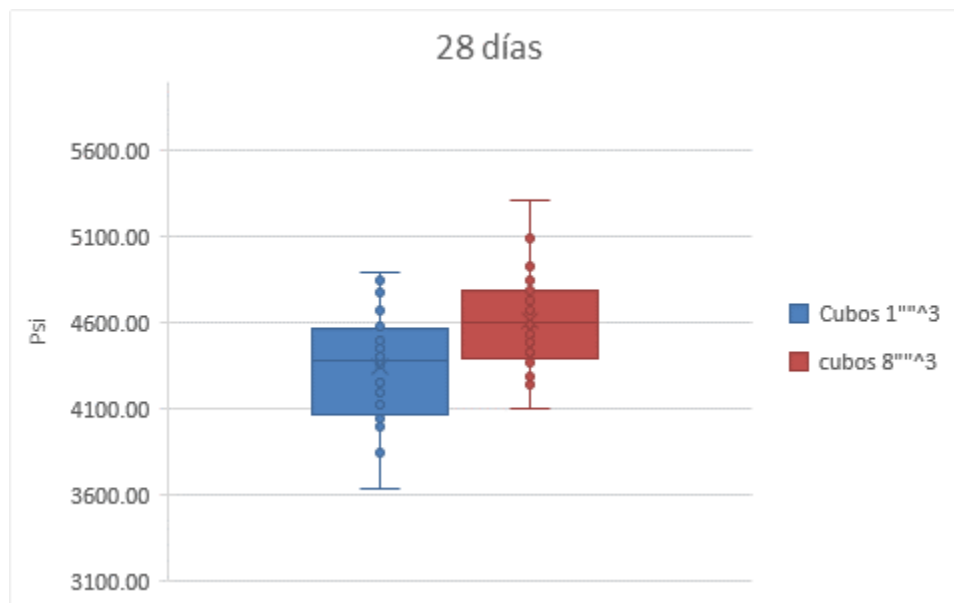
Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Gráfica N°3: Diagrama de cajas y bigotes para las resistencias a la compresión de área de cubos de mortero de cemento tipo I (PM) de 1"³ y 8"³ a los 7 días.



Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Gráfica N°4: Diagrama de cajas y bigotes para las resistencias a la compresión de área de cubos de mortero de cemento tipo I (PM) de 1"³ y 8"³ a los 28 días.



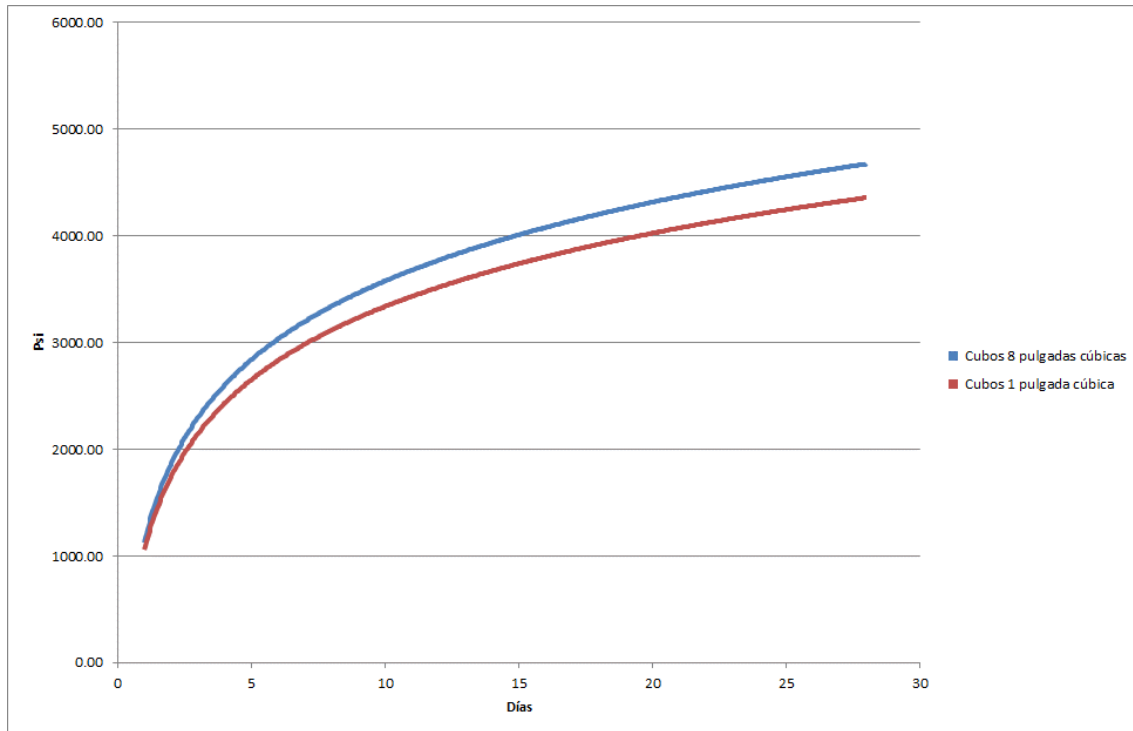
Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Tabla N°6: Parámetros de las funciones logarítmicas naturales de los días de fraguado vs las resistencias a compresión de área para cubos de morteros de cemento tipo I (PM) de 1”³ y 8”³

Cubos de 8”³	
β_1	1064.9
β_0	1125.4
R²	0.9765
Cubos de 1”³	
β_1	990.79
β_0	1056.5
R²	0.9618

Fuente: Elaboración propia con datos experimentales

Grafica N°5: Gráficas de las funciones logarítmicas naturales de los días de fraguado vs la resistencia a compresión de área de cubos de mortero de cemento tipo I (PM) generadas a partir de datos experimentales obtenidos



Fuente: Elaboración propia con datos experimentales

Tabla N°7: F Fisher para la validación de metodología de 1"³ a partir de 8"³ según los días de fraguado.

EDAD DE CUBOS	F EXP	F CRIT	CONCLUSIÓN
1	4.637	1.841	FALSO
3	0.995	1.841	VERDADERO
7	0.931	1.841	VERDADERO
28	0.824	1.841	VERDADERO

Fuente: Elaboración propia con datos experimentales

Tabla N°8: Parámetros de las funciones logarítmicas naturales de los días de fraguado vs las resistencias a compresión de área para cubos de morteros de cemento tipo I (PM) adicionado con Glenium Ace 30 de 1"³

0.20% Glenium Ace 30 / 0.00% MWCNTs (BLANCO)

β_1	1259.6
β_0	759.9
R^2	0.9554

0.20% Glenium Ace 30 / 0.01% MWCNTs

β_1	1241.9
β_0	1255.9
R^2	0.9362

0.20% Glenium Ace 30 / 0.03% MWCNTs

β_1	1249.1
β_0	1145.2
R^2	0.9476

0.20% Glenium Ace 30 / 0.05% MWCNTs

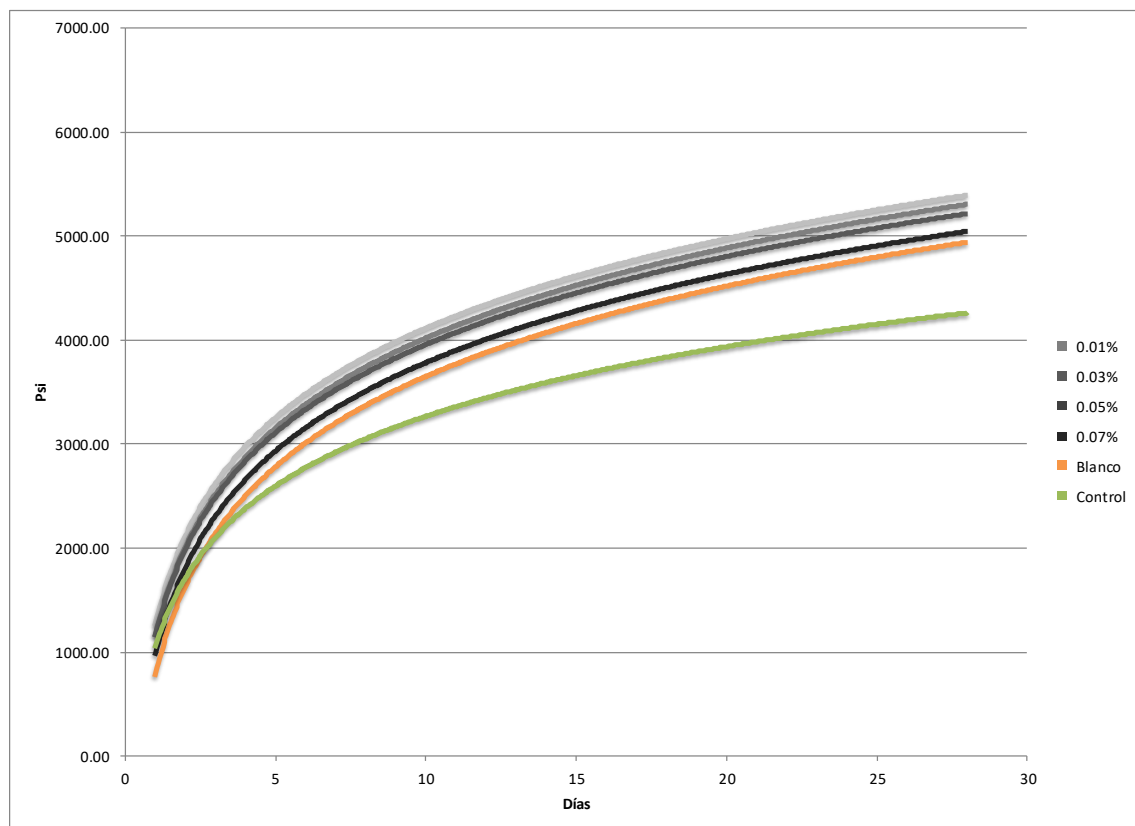
β_1	1233.4
β_0	1141
R^2	0.972

0.20% Glenium Ace 30 / 0.07% MWCNTs

β_1	1226.8
β_0	956.57
R^2	0.9517

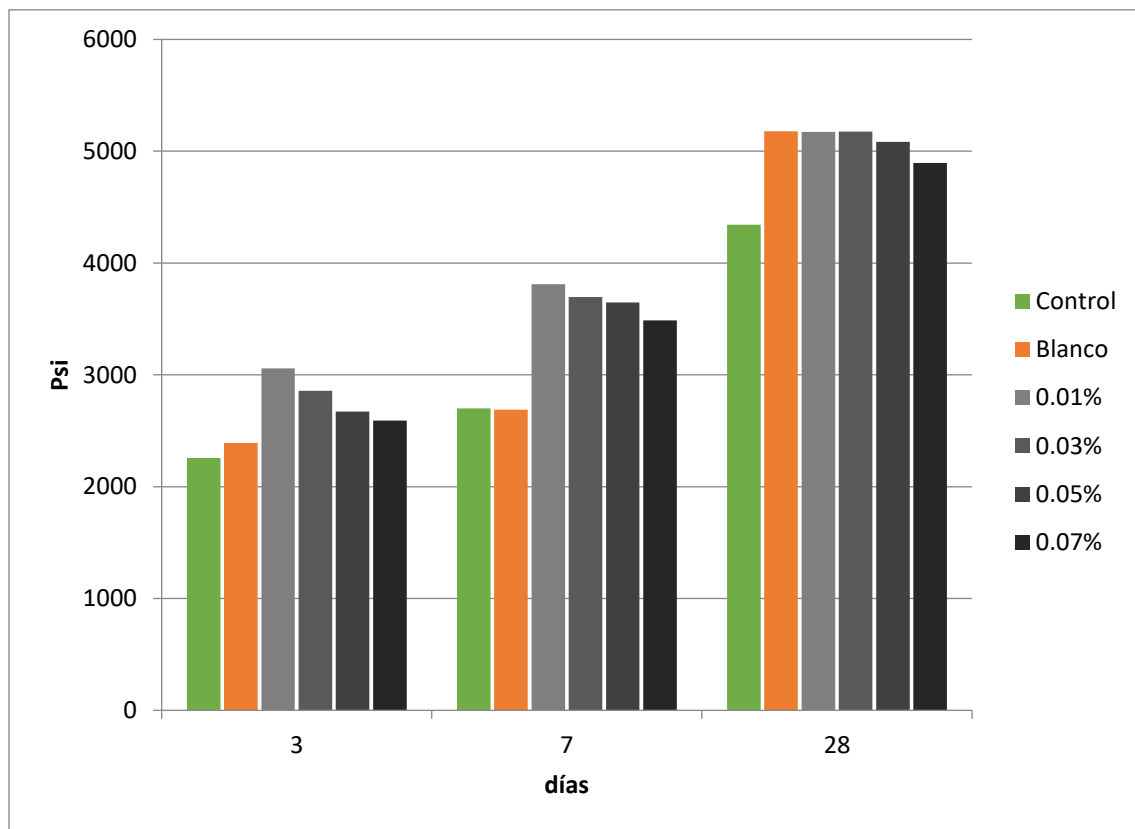
Fuente: Elaboración propia con datos experimentales

Grafica N°6: Gráficas de las funciones logarítmicas naturales de los días de fraguado vs la resistencia a compresión de área de cubos de mortero de cemento tipo I (PM) (control), cubos de mortero de cemento tipo I (PM) adicionado con 0.20% Glenium Ace 30 y cubos de mortero de cemento tipo I (PM) adicionado con 0.20% Glenium Ace 30 y distintas proporciones de MWCNTs.



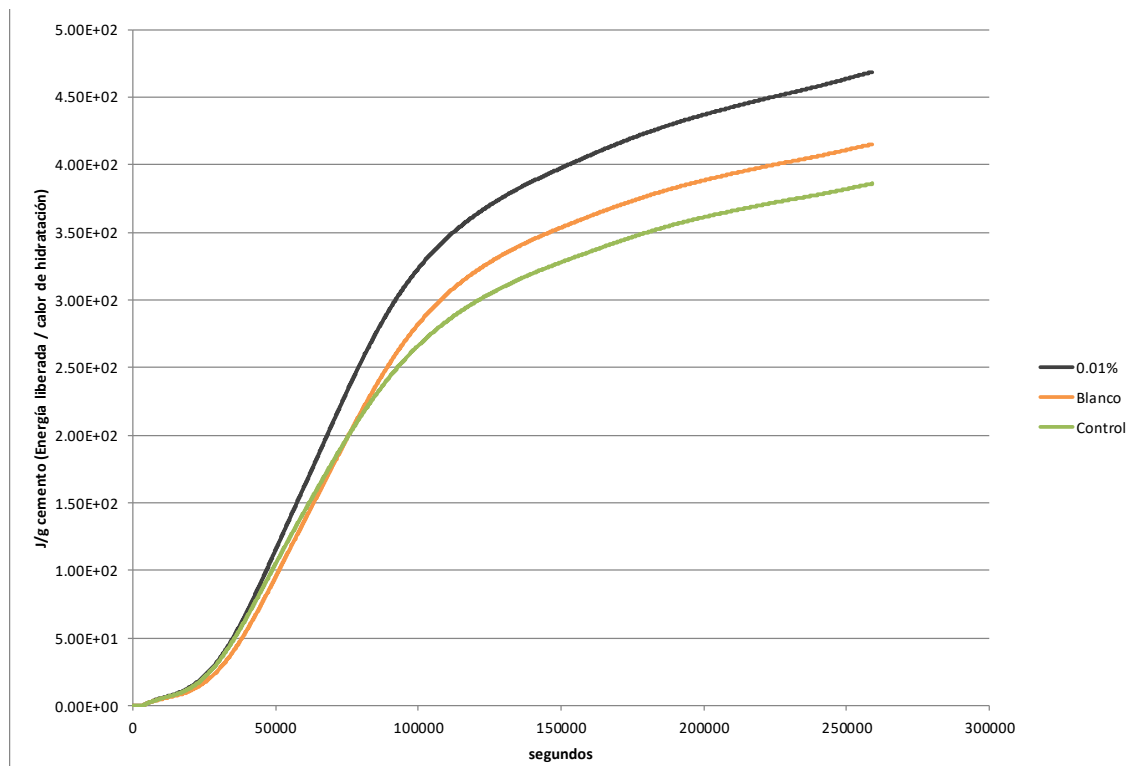
Fuente: Elaboración propia con datos experimentales

Grafica N°7: Diagrama de barras de las resistencias medias a la compresión de área de todos los ensayos realizados



Fuente: Elaboración propia con datos experimentales

Grafica N°8: Calorimetría Isotérmica del cemento control, blanco y composita 0.01% al cabo de 72 horas



Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

9. DISCUSION

La caracterización de los materiales a utilizar fue uno de los primeros pasos en donde se caracterizo el cemento a través de la técnica de FRX de onda dispersiva, se logro determinar que el cemento por su composición química seguía la química de un cemento portland tipo I (PM) (ver tabla N°1). Los nanotubos de carbono fueron caracterizados a través de DRX, llegando a la conclusión de que el patrón seguía el de grafito teniendo picos altos entre 26.12 y 26.59 en angulos de 2θ , siendo este el más alto y otro entre 42.74 y 43.43 en angulos de 2θ siendo el segundo más pronunciado (ver gráfica N°1 y tabla N°2). Picos presentes en los compuestos derivados de grafito por lo general.

Se realizó una validación de la implementación del método de la medición de resistencia a la compresión de área en cubos de morteros de cemento de $8''^3$ a $1''^3$, y se observó un buen desempeño dentro del coeficiente de variación en las mediciones a excepción del resultado dado para los cubos de $1''^3$ a 1 día, el cual presenta un porcentaje de coeficiente de variación del 18.93%. Sin embargo, a 1 día de igual manera los cubos de $8''^3$ presentaron un coeficiente de variación de 8.84%. Para reconfirmar esto se evaluó la F de Fisher para el fraguado de 1, 3, 7 y 28 días de los cubos de $8''^3$ versus los cubos de $1''^3$ encontrando que la varianza para los cubos de $1''^3$ no es equivalente a la de $8''^3$ pues el valor de F calculado, dando un resultado de 4.6367 el cual sobrepasa el valor de F critico de 1.841 (ver tabla N°7). Este porcentaje de variación tan alto se debe a que la pasta de cemento a 1 día presenta mayor inestabilidad ante la compresión debido a que solo ha fraguado el 40% de cemento. (Kosmatka et al., 2004) El resto de las mediciones realizadas (a 3, 7 y 28 días) presentaron una mejoría en el coeficiente de variación debido a que el cemento ya ha fraguado en su mayoría, yendo el coeficiente de variación hasta no más de 7.5% (ver tablas N°3, N°4 y N°5). Otro factor que afecta en estas mediciones a menor tamaño es la muestra utilizada debido a que cuanto más grande sea la medición, las estimaciones serían más precisas y con menos riesgo de error, sin embargo, también se presenta un aumento en el costo de la medición a realizar. (Scheaffer, Mendenhall, & Ott, 2007)

Para las mediciones de 3, 7 y 28 días de igual manera se evaluó la F de Fisher de igual manera dando los resultados de F calculados de 0.9949, 0.9311, 0.8239 respectivamente frente a un F crítico de 1.841 para los tres experimentos, concluyendo que la varianza es equivalente para los experimentos (ver tabla N°7). Toda esta variación ya mencionada puede ser observada en las gráficas N°1 a la N°4. Las graficas N°2, N°3 y N°4 muestran la dispersión de los datos a través de graficos de cajas con bigotes, mostrando un comportamiento en el que la varianza de los datos se mantiene al cambiar de metodología de 8"3 a 1"3.

Los cubos de 1"3 presentaron en promedio 42.79 psi menos que los cubos de 8"3 al cabo de 24 horas. Al cabo de tres días presentaron en promedio 97.51 psi menos, a los siete días presentaron en promedio 562 psi menos, sin embargo, al cabo de veintiocho días se redujo la brecha de diferencia con 179.07 psi de diferencia.

Se definieron los parámetros estadísticos de la función matemática de la resistencia a la compresión de área de ambas dimensiones de cubos con respecto al tiempo de fraguado encontrando que para ambos casos se define una función logarítmica de forma, para los cubos de 8"3 (ver tabla N°6):

$$f(x) = y = 1064.9 * \ln(x) + 1125.4$$

$$psi (cubos 8"3) = 1064.9 * \ln(\#días de fraguado) + 1125.4$$

Con un R² de 0.9765, con lo que podemos decir que, según el coeficiente de determinación, el 97.65% de los datos utilizados para realizar las mediciones, entran dentro de esta función.

Para los cubos de 1"3 (ver tabla N°6):

$$f(x) = y = 990.79 * \ln(x) + 1056.5$$

$$psi (cubos 1"3 o CONTROL) = 990.79 * \ln(\#días de fraguado) + 1056.5$$

Con un R² de 0.9618, con lo que podemos decir que, según el coeficiente de determinación, el 96.18% de los datos utilizados para realizar las mediciones, entran dentro de esta función.

Las pruebas de solubilidad de MWCNTs en agua presentaron separaciones de fases muy evidentes al cabo de no más de 1 hora, por lo que se utilizó un súper plastificante como dispersante de las nanopartículas presentando el mejor

desempeño polímeros etéreos policarboxílicos de cadenas de 30 carbonos en grado industrial (Glenium Ace 30). Ante esto, se realizó un blanco, únicamente utilizando cemento tipo I (PM) y Glenium Ace 30 presentando una función de tipo logarítmica (ver tabla N°8):

$$f(x) = y = 1259.6 * \ln(x) + 759.9$$

$$psi (BLANCO) = 1259.6 * \ln(\#días de fraguado) + 759.9$$

Con un R^2 de 0.9554, con lo que podemos decir que, según el coeficiente de determinación, el 95.54% de los datos utilizados para realizar las mediciones, entran dentro de esta función.

Los cubos del blanco presentaron en promedio 220.98 psi menos que los cubos de control (cubos de cemento tipo I (PM) de 1"³) al cabo de 24 horas. Sin embargo, al cabo de tres días presentaron en promedio 135.09 psi más, a los siete días presentaron en promedio 11.16 psi menos y al cabo de veintiocho días aumento la breca con 836.75 psi más que los cubos control.

Al realizar los cubos con MWCNTs se utilizó la misma cantidad de agua que necesitaba el cemento en un inicio, esto para no afectar con una variable más los resultados del estudio. Al definir esto, se logró observar que a mayor cantidad de nanotubos de carbono la consistencia de la pasta de cemento se volvía más fluida, aumentando su trabajabilidad y por consiguiente se debería de esperar resistencias más bajas al aumentar la trabajabilidad.

Dentro de todas las adiciones evaluadas (0.01%, 0.03%, 0.05% y 0.07%) se logró observar que al aumentar la cantidad de MWCNTs no se presentaba una mejoría en la resistencia a la compresión de área, siendo la mejor adición la de 0.01% con una función de tipo logarítmica de la siguiente forma (ver tabla N°8):

$$f(x) = y = 1241.9 * \ln(x) + 1255.9$$

$$psi (0.01\% MWCNTs) = 1241.9 * \ln(\#días de fraguado) + 1255.9$$

Con un R^2 de 0.9362, con lo que podemos decir que, según el coeficiente de determinación, el 93.62% de los datos utilizados para realizar las mediciones, entran dentro de esta función.

Los cubos de cemento tipo I (PM) con adición de 0.01% MWCNTs presentaron en promedio 84.93 psi más que los cubos de blanco (cubos de cemento tipo I (PM) con

0.20% de Glenium Ace 30 de 1³) al cabo de 24 horas. Al cabo de tres días presentaron en promedio 665.84 psi más, a los siete días presentaron en promedio 1121.58 psi más, sin embargo, al cabo de veintiocho días presentaron 5.92 psi menos que el blanco.

En las gráficas N°6 y N°7 se puede observar claramente el aporte de los nanotubos de carbono en las resistencias tempranas, principalmente a 3 y 7 días, con aumentos considerables en las resistencias, sin embargo, a los 28 días la resistencia a la compresión de área es superada por el blanco por tan solo 5.92 psi, como ya se mencionó con anterioridad.

Al realizar una calorimetría isotérmica de cemento con morteros realizados según la norma ASTM C109/C109M-1,1b durante un tiempo de 72 horas de análisis se observó como la presencia de Glenium Ace 30 aumenta en promedio la cinética del calor de hidratación del cemento UGC utilizado en los primeros 3 días de fraguado del cemento comparado con el promedio del control (Ver Grafica N°8). Se eligió la proporción de 0.01% de MWCNTs para la calorimetría al ser la composita que mejor se desempeñó en los ensayos de resistencia mecánica a la compresión de área. Se observa claramente como la proporción de 0.01% de MWCNTs en el cemento con el Glenium Ace 30 aumenta aún más la cinética de reacción al cabo de 72 horas de análisis, con lo que se concluye que los MWCNTs realizan un efecto conocido como "filler effect" o efecto de llenado, en donde su efecto de refuerzo es ser un núcleo de cristalización para el gel CSH (producto de hidratación del cemento) aumentando así la cinética de reacción mas no la termodinámica, haciendo que las resistencias aumente en las edades tempranas del fraguado de cemento (3 y 7 días), pero obteniendo la misma resistencia al finalizar el fraguado (28 días) (Oey, Kumar, Bullard, Neithalath, & Sant, 2013). Las repercusiones practicas de poseer un aumento en la cinetica en la reacción del cemento con aguá son, que este permitiría formar un concreto de fraguado a edades tempranas, en construcciones donde se necesita poseer resistencias altas a edades tempranas.

10. CONCLUSIONES

- 10.1 La F crítica para la validación de resultados de cubos de mortero de 1"3 comparada con 8"3 no cumple para la F teórica de Fisher en el análisis de 1 día de fraguado y si cumple para 3, 7 y 28 días de fraguado.
- 10.2 La validación de metodología de trabajo con cubos de 8"3 a 1"3 permitió el aumento del número de ensayos de 1 a 8 con la misma cantidad de material.
- 10.3 La composita de 0.01% MWCNTs, con 0.20% Glenium Ace 30 como dispersante en cemento tipo I (PM) mostró el mejor desempeño de todas las compositas realizadas aumentando las resistencias a edades tempranas, en 665.84 psi promedio para 3 días y 1121.58 psi promedio para 7 días con respecto al blanco (cemento tipo I (PM) y Glenium Ace 30)
- 10.4 No se obtuvo una correlación positiva entre la cantidad de MWCNTs adicionado al cemento y la resistencia a la compresión de área obtenida por los morteros analizados de estos cementos.

11. RECOMENDACIONES

- 11.1 Realizar un estudio en concentraciones más bajas de MWCNTs, entre 0.00% y 0.01% para determinar si existe una mejor correlación y valores más altos de resistencia a la compresión de área.
- 11.2 Funcionalizar los MWCNTs para aumentar su solubilidad y mejorar las proporciones a adicionar.
- 11.3 Evaluar el estudio nuevamente cuando los MWCNTs disminuyan su precio en el mercado y pueda ser rentable su utilización industrial.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 12.1. Aparicio, M., & Carbajal, G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo Nano*, 3(2), 62–72.
- 12.2. Bacon, R. (1960). Growth, structure, and properties of graphite whiskers. *Journal of Applied Physics*, 31(2), 283–290. <https://doi.org/10.1063/1.1735559>
- 12.3. Barrios, H. (1995). *Efecto de la adición de caliza dolomítica en el contenido de SO₃ óptimo del Cemento Portland tipo I (PM)*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 12.4. Basu-Dutt, S., Minus, M. L., Jain, R., Nepal, D., & Kumar, S. (2012). Chemistry of carbon nanotubes for everyone. *Journal of Chemical Education*, 89(2), 221–229. <https://doi.org/10.1021/ed1005163>
- 12.5. Callister, W., & Rethwisch, D. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. (J. W. & Sons, Ed.), *Materials Science and Engineering (7a., Vol. 94)*. New York. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90343-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90343-0)
- 12.6. Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. (A. International, Ed.). Ohio. Retrieved from <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSCM00001/structural-composite>
- 12.7. Cementos Bio Bio S.A. (2013). Cementos, fabricación y clasificación. Retrieved from http://www.cbb.cl/cementos/PutDocument.aspx%3FFile%3D576096_CEMENTO%2520FABRICAC.pdf
- 12.8. Duda, W. H. (2003). *Manual tecnológico del cemento*. (Reverté, Ed.) (1st ed.). España.
- 12.9. Endo, M., Takeuchi, K., Igarashi, S., Kobori, K., Shiraishi, M., & Kroto, H. W. (1993). The production and structure of pyrolytic carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. Solids*, 54(12), 1841–1848.
- 12.10. Fernández Paris, J. M. (1980). La pasta hidratada de cemento portland. *Materiales de Construcción*, 611(80), 17–25.
- 12.11. Ferro, G., Tulliani, J., & Musso, S. (2011). Carbon nanotubes cement composites. *Convegno IGF XXI*, 49–59. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.18.04>
- 12.12. Godoy, O. (2006). *Desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados*

- hidráulicos*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 12.13. Gramajo, N. (2015). *Selección y adecuación de acelerogramas sísmicos para análisis de estructuras con ejemplos para el valle de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 12.14. Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D. T., & Smalley, R. E. (1995). Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chemical Physics Letters*, 243(1–2), 49–54. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(95\)00825-O](https://doi.org/10.1016/0009-2614(95)00825-O)
- 12.15. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Letters To Nature*, 354, 56–58.
- 12.16. Kaushik, B. K., & Majumder, M. K. (2014). Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects: Analysis and Design. In Springer (Ed.), *Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects* (1st ed., Vol. 1, p. 86). India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2047-3>
- 12.17. Kittel, C. (2003). *Introducción a la física del estado sólido*. (Editorial Reverté, Ed.) (3a.). Sevilla.
- 12.18. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. (P. C. Association, Ed.) (1st.). Illinois.
- 12.19. MacLaren, D. C., & White, M. A. (2003). Cement: Its Chemistry and Properties. *Journal of Chemical Education*, 80(6), 623. <https://doi.org/10.1021/ed080p623>
- 12.20. Malhotra, V., & Mehta, P. (1996). *Pozzolanic and cementitious materials*. (Overseas Publishers Association, Ed.). Amsterdam. Retrieved from https://books.google.com.gt/books?hl=es&lr=&id=Izs6zne_pAUC&oi=fnd&pg=PR9&dq=pozzolanic+and+cementitious+materials&ots=5gAdRKSYvh&sig=yNrDcw4-eBiSREIA-N1C8flrFBI#v=onepage&q=pozzolanic and cementitious materials&f=false
- 12.21. Marroquin, J. . (2008). *Efecto de la activación química, con un aditivo, de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

- 12.22. Molina, M. (1989). *Cementos puzolánicos para manpostería típica en Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 12.23. Oey, T., Kumar, A., Bullard, J. W., Neithalath, N., & Sant, G. (2013). The filler effect: The influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(6), 1978–1990. <https://doi.org/10.1111/jace.12264>
- 12.24. Orihuela Espina, M. del P. (2007). *Análisis energético de las diversas alternativas aplicables a una planta de clinkerización y producción de cemento*. Universidad de Sevilla.
- 12.25. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). *Más allá del Conflicto, Lucha por el Bienestar: Informe Nacional de Desarrollo Humano 2015/2016*. (P. de las N. U. para el Desarrollo, Ed.). Guatemala. Retrieved from http://desarrollohumano.org.gt/wp-content/uploads/2016/04/INDH_Completo_digital-1.pdf
- 12.26. Rivas, G. A., Rubianes, D., Rodríguez, M. C., Ferreyra, N. F., Luque, G. L., Pedano, M., ... Parrado, C. (2007). Carbon nanotubes for electrochemical biosensing. *Talanta*, 74, 291–307. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.10.013>
- 12.27. Salazar Trujillo, J. E. (2007). *Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería*. (U. N. de Colombia, Ed.) (1a.). Colombia. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/5855/1/jorgeeduardosalazartrujillo20072_Parte1.pdf
- 12.28. Scheaffer, R. L., Mendenhall, W., & Ott, L. (2007). *Elementos de muestreo*. Retrieved from http://books.google.com.ec/books/about/Elementos_de_muestreo.html?id=o50wIT7hceoC&pgis=1
- 12.29. Theisen, K., & Johansen, V. (1975). Prehydration and Strength Development of Portland Cement. *American Ceramic Society Bulletin*, 54(9), 787–789.
- 12.30. Vian Ortuño, Á. (2006). *Introducción a la Química Industrial* (Reverté, S). Barcelona.

13. ANEXOS

Anexo N°1: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a las 24 horas de cubos de 8 pulgadas cubicas para validación

CUBOS 8"³				
	Identificación	Peso/g	Resistencia de compresión de área	
			1/(N/m2^m)	1/psi
REPETICIÓN 1	Val A 29	282.20	7.28	1055.87
	Val B 29	283.30	7.73	1121.14
	Val C 29	282.20	7.90	1145.80
	Val A 55	283.20	7.86	1140.00
	Val B 55	283.40	7.48	1084.88
	Val C 55	283.10	7.59	1100.84
	Val A 68	283.10	8.05	1167.55
	Val B 68	282.60	7.71	1118.24
	Val C 68	282.10	7.53	1092.13
	Val A 69	280.60	7.04	1021.07
	Val B 69	281.10	6.92	1003.66
	Val C 69	283.20	7.69	1115.34
	Val A 76	283.20	6.02	873.13
	Val B 76	283.80	6.17	894.88
	Val C 76	284.50	6.84	992.06
REPETICIÓN 2	Val A 29	282.40	5.96	864.42
	Val B 29	282.80	5.71	828.17
	Val C 29	283.20	6.01	871.68
	Val A 55	282.40	7.35	1066.03
	Val B 55	281.20	6.99	1013.81
	Val C 55	282.00	6.59	955.80
	Val A 68	281.60	7.46	1081.98
	Val B 68	282.20	7.37	1068.93
	Val C 68	282.00	7.01	1016.71
	Val A 69	283.70	7.10	1029.77
	Val B 69	283.00	6.79	984.81
	Val C 69	283.80	6.81	987.71
	Val A 76	282.80	7.53	1092.13
	Val B 76	283.80	7.38	1070.38
	Val C 76	282.20	7.36	1067.48

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

ANEXO N°2: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a las 24 horas de cubos de 1 pulgada cubica para validación

		CUBITOS 1"³					
	Identificación	Peso/g	Espesor/mm	Ancho/mm	Altura/mm	Resistencia de compresión de área	
						1/(N/m2^m)	1/(psi)
REPETICIÓN 1	1	37.10	25.04	26.73	25.68	8.28	1200.91
	2	36.80	25.37	26.04	25.76	8.20	1189.31
	3	36.40	25.76	25.82	25.70	8.86	1285.03
	4	36.30	25.69	25.70	25.58	8.79	1274.88
	5	36.40	25.63	25.65	25.73	8.97	1300.99
	6	36.10	25.51	25.63	25.97	8.49	1231.37
	7	36.00	25.54	25.52	25.78	7.58	1099.39
	8	36.20	25.94	25.51	25.52	8.32	1206.71
	9	36.40	25.80	25.51	25.99	7.99	1158.85
	10	35.80	25.68	25.81	25.57	7.64	1108.09
	11	36.60	25.69	25.52	25.98	8.32	1206.71
	12	36.40	25.58	25.87	25.68	9.21	1335.80
	13	36.50	25.90	26.00	25.55	7.74	1122.59
	14	36.30	25.67	25.61	25.57	7.94	1151.60
	15	36.40	25.62	25.82	25.56	8.19	1187.86
	16	35.70	25.42	25.65	25.48	7.49	1086.33
	17	35.80	25.70	25.75	25.81	7.19	1042.82
	18	35.60	25.71	25.40	25.87	7.90	1145.80
REPETICIÓN 2	1	37.00	26.65	25.21	25.77	5.34	774.50
	2	37.20	26.69	25.44	25.88	5.48	794.81
	3	35.80	25.65	25.39	25.49	5.41	784.65
	4	35.90	25.54	25.43	25.80	5.50	797.71
	5	35.80	25.40	25.69	25.58	5.21	755.65
	6	36.20	25.52	25.63	25.74	5.83	845.57
	7	36.00	25.64	25.61	25.61	5.19	752.75
	8	36.10	25.48	25.61	25.79	5.32	771.60
	9	36.10	25.59	25.51	25.61	5.30	768.70
	10	36.10	25.63	25.42	25.81	5.70	826.71
	11	36.20	25.52	25.60	25.71	5.78	838.32
	12	35.80	25.53	25.59	25.66	5.49	796.26
	13	35.70	25.55	25.43	25.64	5.18	751.30
	14	36.10	25.53	25.63	25.64	6.00	870.23
	15	35.80	25.55	25.59	25.54	5.01	726.64
	16	36.20	25.51	25.60	25.68	5.88	852.82
	17	35.30	25.33	25.48	25.63	5.05	732.44
	18	35.50	25.10	25.45	25.76	5.55	804.96

ANEXO N°3: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a los 3 días de cubos de 8 pulgadas cubicas para validación

CUBOS 8"³				
	Identificación	Peso/g	Resistencia de compresión de área	
			1/(N/m²m)	1/psi
REPETICIÓN 1	Val A 29	282.50	17.57	2548.31
	Val B 29	283.60	17.01	2467.09
	Val C 29	284.30	18.13	2629.53
	Val A 55	282.80	16.76	2430.83
	Val B 55	283.40	16.83	2440.98
	Val C 55	283.50	16.89	2449.69
	Val A 68	284.60	17.11	2481.60
	Val B 68	284.10	16.78	2433.73
	Val C 68	283.90	16.83	2440.98
	Val A 69	284.70	18.62	2700.60
	Val B 69	285.70	18.07	2620.83
	Val C 69	284.90	18.01	2612.13
	Val A 76	280.60	17.91	2597.63
	Val B 76	281.30	17.67	2562.82
	Val C 76	280.60	17.54	2543.96
REPETICIÓN 2	Val A 29	282.80	15.96	2314.80
	Val B 29	282.90	16.44	2384.42
	Val C 29	283.50	17.00	2465.64
	Val A 55	282.90	15.96	2314.80
	Val B 55	283.00	15.03	2179.92
	Val C 55	281.50	14.09	2043.58
	Val A 68	281.20	15.23	2208.92
	Val B 68	281.00	15.34	2224.88
	Val C 68	282.00	16.86	2445.34
	Val A 69	284.30	16.87	2446.79
	Val B 69	284.00	16.24	2355.41
	Val C 69	282.30	14.79	2145.11
	Val A 76	281.40	15.71	2278.54
	Val B 76	282.00	16.12	2338.01
	Val C 76	280.90	15.08	2187.17

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

ANEXO N°4: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a los 3 días de cubos de 1 pulgada cubica para validación

		CUBITOS 1"³					
	Identificación	Peso/g	Espesor/mm	Ancho/mm	Altura/mm	Resistencia de compresión de área	
						1/(N/m²m)	1/psi
REPETICIÓN 1	1	36.70	25.43	26.42	25.74	15.66	2271.29
	2	35.60	25.61	25.71	25.54	16.29	2362.66
	3	35.90	25.51	25.85	25.79	15.93	2310.45
	4	35.80	25.51	25.55	25.84	15.72	2279.99
	5	35.70	25.43	25.68	25.86	15.68	2274.19
	6	35.90	25.62	25.71	25.93	15.47	2243.73
	7	36.40	25.44	25.60	25.88	17.61	2554.11
	8	36.10	25.41	25.72	25.84	17.71	2568.62
	9	35.50	25.26	25.28	25.85	16.96	2459.84
	10	36.80	25.55	26.46	25.78	15.20	2204.57
	11	35.50	25.40	25.54	25.77	15.19	2203.12
	12	35.80	25.59	25.66	25.85	15.47	2243.73
	13	36.00	25.52	25.58	25.95	15.92	2309.00
	14	35.80	25.58	25.50	25.91	16.58	2404.73
	15	35.90	25.50	25.54	25.76	16.96	2459.84
	16	35.70	25.39	25.61	25.74	17.60	2552.66
	17	34.80	25.68	25.55	25.54	12.95	1878.24
	18	35.30	25.39	25.48	25.68	17.68	2564.27
REPETICIÓN 2	1	36.70	26.48	24.92	25.63	15.68	2274.19
	2	36.60	24.96	26.31	25.77	16.10	2335.11
	3	36.50	25.46	25.28	25.47	15.59	2261.14
	4	35.60	25.48	25.36	25.70	14.44	2094.34
	5	35.80	25.54	25.23	25.58	16.21	2351.06
	6	35.70	25.59	25.38	25.66	13.41	1944.96
	7	35.50	25.28	25.17	25.41	14.65	2124.80
	8	35.50	25.57	25.40	25.42	13.70	1987.02
	9	35.80	25.50	25.66	25.62	14.43	2092.89
	10	36.40	25.49	25.68	25.68	13.81	2002.97
	11	35.60	25.45	25.44	25.46	15.31	2220.53
	12	36.00	25.58	25.56	25.78	13.91	2017.47
	13	35.60	25.51	25.53	25.45	13.87	2011.67
	14	36.20	25.43	25.52	25.72	14.45	2095.79
	15	35.70	25.54	25.48	25.55	14.82	2149.46
	16	35.80	25.46	25.55	25.65	14.03	2034.88
	17	36.10	25.69	25.37	25.70	17.17	2490.30
	18	36.20	25.41	25.62	25.63	17.89	2594.72

ANEXO N°5: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a los 7 días de cubos de 8 pulgadas cubicas para validación

CUBOS 8"³				
	Identificación	Peso/g	Resistencia de compresión de área	
			1/(N/m ² m)	1/psi
REPETICIÓN 1	Val A 29	283.70	22.67	3288.00
	Val B 29	284.60	23.37	3389.53
	Val C 29	283.50	23.46	3402.58
	Val A 55	285.90	22.87	3317.01
	Val B 55	283.40	21.67	3142.97
	Val C 55	283.60	21.50	3118.31
	Val A 68	282.20	24.46	3547.62
	Val B 68	283.60	23.63	3427.24
	Val C 68	281.80	23.11	3351.82
	Val A 69	285.80	21.04	3051.59
	Val B 69	283.90	22.26	3228.54
	Val C 69	284.70	22.68	3289.46
	Val A 76	282.40	24.01	3482.36
	Val B 76	283.00	23.43	3398.23
	Val C 76	281.30	24.16	3504.11
REPETICIÓN 2	Val A 29	281.10	21.78	3158.92
	Val B 29	280.60	21.04	3051.59
	Val C 29	277.80	19.84	2877.55
	Val A 55	280.90	21.53	3122.66
	Val B 55	280.70	21.67	3142.97
	Val C 55	282.10	22.09	3203.88
	Val A 68	280.70	22.08	3202.43
	Val B 68	279.90	21.44	3109.61
	Val C 68	281.50	22.73	3296.71
	Val A 69	278.60	20.59	2986.33
	Val B 69	279.50	22.65	3285.10
	Val C 69	279.10	21.74	3153.12
	Val A 76	279.80	21.82	3164.72
	Val B 76	280.40	22.82	3309.76
	Val C 76	280.00	22.08	3202.43

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

ANEXO N°6: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a los 7 días de cubos de 1 pulgada cubica para validación

		CUBITOS 1"³					
	Identificación	Peso/g	Espesor/mm	Ancho/mm	Altura/mm	Resistencia de compresión de área	
						1/(N/m²m)	1/psi
REPETICIÓN 1	1	35.00	25.28	25.26	25.98	21.33	3093.65
	2	35.00	25.26	25.34	25.77	18.77	2722.36
	3	35.30	25.31	25.54	25.66	18.83	2731.06
	4	35.60	25.26	25.50	25.71	19.80	2871.75
	5	35.40	25.32	26.03	25.60	17.95	2603.43
	6	35.60	25.32	25.86	25.62	19.87	2881.90
	7	35.50	25.24	25.50	25.89	18.73	2716.56
	8	35.50	25.62	25.50	25.70	18.73	2716.56
	9	35.60	25.27	25.75	25.64	19.05	2762.97
	10	35.30	25.32	25.50	25.76	18.20	2639.69
	11	35.40	25.41	25.76	25.73	16.92	2454.04
	12	35.30	25.39	25.82	25.40	17.35	2516.40
	13	35.50	25.51	25.76	25.47	18.84	2732.51
	14	35.20	25.49	25.63	25.69	16.63	2411.98
	15	35.40	25.24	25.68	25.71	16.13	2339.46
	16	35.40	25.51	25.82	25.90	19.64	2848.54
	17	36.50	26.15	25.29	25.77	21.10	3060.30
	18	36.40	26.12	25.68	25.23	16.94	2456.94
REPETICIÓN 2	1	34.80	25.44	25.43	25.83	16.23	2353.96
	2	35.40	25.62	25.82	25.47	19.64	2848.54
	3	35.20	25.54	25.73	25.48	17.30	2509.15
	4	35.90	25.77	25.53	25.89	18.99	2754.27
	5	35.70	25.83	25.69	25.84	17.90	2596.17
	6	35.70	25.70	25.64	25.98	20.05	2908.01
	7	35.90	25.65	25.60	25.88	19.50	2828.24
	8	35.80	25.54	25.50	25.94	20.06	2909.46
	9	35.70	25.55	25.49	25.76	18.74	2718.01
	10	35.70	25.55	25.61	25.94	20.09	2913.81
	11	35.50	25.53	25.39	25.90	18.75	2719.46
	12	35.40	25.54	25.55	25.80	20.00	2900.75
	13	35.60	25.57	25.43	25.91	18.65	2704.95
	14	35.70	25.62	25.46	25.73	19.97	2896.40
	15	35.40	25.60	25.41	25.70	18.65	2704.95
	16	35.10	25.06	25.34	25.76	16.52	2396.02
	17	35.60	25.33	26.27	25.82	18.07	2620.83
	18	35.90	26.23	25.45	25.82	16.49	2391.67

ANEXO N°7: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a los 28 días de cubos de 8 pulgadas cubicas para validación

CUBOS 8"³				
	Identificación	Peso/g	Resistencia de compresión de área	
			1/(N/m ² m)	1/psi
REPETICIÓN 1	Val A 29	284.30	30.31	4396.09
	Val B 29	285.10	31.09	4509.22
	Val C 29	285.70	32.19	4668.76
	Val A 55	283.80	30.50	4423.65
	Val B 55	283.20	30.10	4365.63
	Val C 55	284.20	30.22	4383.04
	Val A 68	282.60	28.24	4095.86
	Val B 68	283.30	29.37	4259.76
	Val C 68	284.30	29.58	4290.22
	Val A 69	284.90	29.36	4258.31
	Val B 69	285.30	29.22	4238.00
	Val C 69	286.70	30.81	4468.61
	Val A 76	282.60	33.94	4922.58
	Val B 76	281.10	32.30	4684.72
	Val C 76	283.20	33.76	4896.47
REPETICIÓN 2	Val A 29	284.80	32.61	4729.68
	Val B 29	284.30	32.30	4684.72
	Val C 29	283.50	31.63	4587.54
	Val A 55	283.60	31.83	4616.55
	Val B 55	283.70	30.91	4483.12
	Val C 55	284.90	33.09	4799.30
	Val A 68	282.40	31.43	4558.53
	Val B 68	283.00	31.25	4532.43
	Val C 68	283.50	32.50	4713.73
	Val A 69	285.40	32.98	4783.34
	Val B 69	284.70	31.92	4629.60
	Val C 69	285.60	33.45	4851.51
	Val A 76	285.90	35.07	5086.47
	Val B 76	286.10	36.65	5315.63
	Val C 76	284.50	35.19	5103.88

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

ANEXO N°8: Tabla de resultados de resistencia a la compresión de área a los 28 días de cubos de 1 pulgada cubica para validación

		CUBITOS 1"³					
	Identificación	Peso/g	Espesor/mm	Ancho/mm	Altura/mm	Resistencia de compresión de área	
						1/(N/m²m)	1/psi
REPETICIÓN 1	1	35.80	25.88	25.50	25.98	27.91	4048.00
	2	35.80	25.65	25.45	25.75	29.30	4249.60
	3	35.80	25.36	25.97	25.62	28.00	4061.06
	4	36.10	25.55	25.87	25.57	28.04	4066.86
	5	35.90	25.38	25.98	25.62	26.60	3858.00
	6	36.30	25.59	25.74	25.58	29.44	4269.91
	7	36.20	25.41	26.03	25.61	29.16	4229.30
	8	36.10	25.48	25.75	25.53	27.54	3994.34
	9	36.50	25.91	25.89	25.58	27.83	4036.40
	10	36.20	25.70	25.92	25.57	28.53	4137.93
	11	36.50	25.70	25.92	25.57	30.01	4352.58
	12	35.40	25.44	25.76	25.58	26.52	3846.40
	13	36.50	25.82	25.84	25.69	29.08	4217.70
	14	36.50	25.95	25.81	25.54	28.00	4061.06
	15	36.30	25.91	25.89	25.52	27.67	4013.19
	16	36.40	25.63	25.72	25.56	28.43	4123.42
	17	37.70	26.42	25.84	25.80	32.25	4677.47
	18	37.50	26.39	25.69	25.72	30.36	4403.34
REPETICIÓN 2	1	37.40	26.16	25.77	25.94	31.31	4541.13
	2	37.40	26.28	25.57	25.79	32.95	4778.99
	3	36.60	25.68	25.73	25.45	33.54	4864.56
	4	36.50	25.85	25.64	25.52	30.90	4481.66
	5	36.40	35.79	25.70	25.54	31.87	4622.35
	6	35.40	25.87	25.64	25.57	25.09	3639.00
	7	36.50	25.63	25.63	25.61	31.90	4626.70
	8	36.80	25.92	25.60	25.50	31.58	4580.29
	9	36.70	25.67	25.68	25.54	33.43	4848.61
	10	36.90	25.98	25.79	25.54	30.71	4454.11
	11	36.70	25.81	25.80	25.46	30.91	4483.12
	12	36.70	25.56	25.81	25.71	33.74	4893.57
	13	36.60	25.92	25.78	25.54	28.88	4188.69
	14	36.50	25.72	25.63	25.55	31.04	4501.97
	15	36.50	25.69	25.59	25.62	32.28	4681.82
	16	36.60	25.55	25.57	25.72	30.81	4468.61
	17	35.80	25.24	25.50	25.73	31.20	4525.18
	18	35.80	25.45	25.17	25.87	31.20	4525.18

ANEXO N°9: Tabla de resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de área del blanco, cemento tipo I (PM) con Glenium Ace 30 (polímeros etéreos policarboxílicos de cadena n=30).

ID	REPETICION	PESO/G	RESISTENCIA/(N/MM ²)	RESISTENCIA/PSI	EDAD
1	R1	34.40	6.32	916.64	1
2	R1	35.20	5.89	854.27	1
3	R1	35.40	6.01	871.68	1
4	R1	35.60	6.14	890.53	1
5	R1	35.00	5.21	755.65	1
6	R1	34.80	5.31	770.15	1
7	R1	34.20	4.78	693.28	1
8	R1	35.40	5.28	765.80	1
9	R1	35.20	5.53	802.06	1
10	R1	35.40	5.59	810.76	1
11*	R1	35.20	5.37	778.85*	1
12	R1	35.10	5.61	813.66	1
13	R1	35.30	5.31	770.15	1
14	R1	35.30	5.47	793.36	1
15	R1	35.20	5.82	844.12	1
16	R1	35.00	5.59	810.76	1
17	R1	36.10	5.90	855.72	1
18	R1	35.60	5.48	794.81	1
1	R1	36.60	15.75	2284.34	3
2	R1	37.50	17.07	2475.79	3
3	R1	35.60	16.45	2385.87	3
4	R1	36.00	15.34	2224.88	3
5	R1	35.80	16.92	2454.04	3
6	R1	36.30	16.80	2436.63	3
7	R1	35.90	16.66	2416.33	3
8	R1	36.50	16.81	2438.08	3
9	R1	36.00	17.30	2509.15	3
10	R1	36.60	16.66	2416.33	3
11	R1	36.00	14.18	2056.63	3
12	R1	36.20	15.80	2291.60	3
13	R1	35.60	16.29	2362.66	3
14	R1	36.10	17.35	2516.40	3
15	R1	34.90	15.98	2317.70	3
16	R1	35.80	17.05	2472.89	3
17	R1	37.00	18.33	2658.54	3
18	R1	35.70	16.05	2327.86	3
1	R1	34.40	19.19	2783.27	7

2	R1	34.90	16.51	2394.57	7
3	R1	34.60	19.61	2844.19	7
4	R1	34.30	19.87	2881.90	7
5	R1	34.70	20.32	2947.17	7
6	R1	34.20	18.74	2718.01	7
7	R1	34.10	17.95	2603.43	7
8	R1	34.30	19.32	2802.13	7
9	R1	34.20	19.12	2773.12	7
10	R1	33.60	16.70	2422.13	7
11	R1	33.90	19.93	2890.60	7
12	R1	33.90	17.95	2603.43	7
13	R1	34.20	19.16	2778.92	7
14	R1	33.80	17.81	2583.12	7
15	R1	34.20	18.20	2639.69	7
16	R1	34.00	17.75	2574.42	7
17	R1	34.30	17.76	2575.87	7
18	R1	34.40	17.93	2600.53	7
1*	R1	35.30	33.35	4837.01*	28
2	R1	35.90	35.90	5206.85	28
3	R1	35.10	35.10	5090.82	28
4	R1	36.30	36.30	5264.87	28
5	R1	35.40	35.40	5134.33	28
6	R1	36.20	36.20	5250.36	28
7	R1	35.50	35.50	5148.84	28
8	R1	36.30	36.30	5264.87	28
9	R1	35.40	35.40	5134.33	28
10	R1	36.30	36.30	5264.87	28
11	R1	35.30	35.30	5119.83	28
12	R1	36.30	36.30	5264.87	28
13	R1	35.10	35.10	5090.82	28
14	R1	36.00	36.00	5221.36	28
15	R1	35.50	35.50	5148.84	28
16	R1	35.80	35.80	5192.35	28
17	R1	36.70	36.70	5322.88	28
18	R1	36.40	36.40	5279.37	28

*Resultados eliminados para cálculos finales al ser considerados como “datos anómalos” por al menos dos de tres criterios estadísticos.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

ANEXO N°10: Tabla de resultados finales de resistencia a la compresión de área de mortero de cemento tipo I (PM) con nanotubos de carbono multicapa.

ID	REPETICIÓN	DOSIS CNTS	PESO/G	RESISTENCIA/(N/MM ²)	RESISTENCIA/PSI	EDAD
1	R1	0.01%	36.40	6.09	883.28	1
2	R1	0.01%	36.20	5.73	831.07	1
3	R1	0.01%	35.80	5.68	823.81	1
4	R1	0.01%	35.60	5.32	771.60	1
5	R1	0.01%	35.90	20.52	2976.17	3
6	R1	0.01%	36.00	20.78	3013.88	3
7	R1	0.01%	35.80	20.41	2960.22	3
8	R1	0.01%	36.10	20.17	2925.41	3
9	R1	0.01%	36.00	27.16	3602.74	7
10	R1	0.01%	35.80	26.83	3521.52	7
11	R1	0.01%	35.90	27.41	3646.25	7
12	R1	0.01%	35.10	25.29	3575.18	7
13*	R1	0.01%	35.90	28.89	4190.14*	28
14	R1	0.01%	36.10	38.24	5546.24	28
15	R1	0.01%	34.90	31.63	4587.54	28
1	R2	0.01%	37.00	6.65	964.50	1
2	R2	0.01%	37.20	7.45	1080.53	1
3	R2	0.01%	35.80	6.63	961.60	1
4	R2	0.01%	36.00	7.54	1093.58	1
5	R2	0.01%	35.90	22.81	3308.31	3
6	R2	0.01%	35.90	22.08	3202.43	3
7	R2	0.01%	35.90	20.31	2945.72	3
8	R2	0.01%	36.10	22.77	3302.51	3
9	R2	0.01%	36.40	23.61	3424.34	7
10	R2	0.01%	35.80	28.46	4127.77	7
11	R2	0.01%	36.50	25.23	3659.30	7
12	R2	0.01%	35.70	27.56	3997.24	7
13	R2	0.01%	36.10	27.03	3920.37	7
14	R2	0.01%	35.40	38.72	5615.86	28
15	R2	0.01%	36.10	35.85	5199.60	28
16	R2	0.01%	35.70	38.66	5607.16	28
17	R2	0.01%	36.70	34.61	5019.75	28
18	R2	0.01%	35.80	34.96	5070.52	28
1	R3	0.01%	36.30	5.56	806.41	1
2	R3	0.01%	36.70	5.94	861.52	1
3	R3	0.01%	35.80	5.73	831.07	1
4	R3	0.01%	36.00	5.78	838.32	1

5	R3	0.01%	36.10	20.21	2931.21	3
6	R3	0.01%	35.40	20.64	2993.58	3
7	R3	0.01%	36.30	21.64	3138.62	3
8	R3	0.01%	35.60	20.61	2989.23	3
9	R3	0.01%	36.30	27.54	3994.34	7
10	R3	0.01%	36.30	27.30	3959.53	7
11	R3	0.01%	36.30	27.55	3995.79	7
12	R3	0.01%	36.10	26.75	3879.76	7
13	R3	0.01%	36.20	27.96	4055.25	7
14	R3	0.01%	36.00	36.86	5346.09	28
15	R3	0.01%	36.30	37.14	5386.70	28
16	R3	0.01%	36.40	37.39	5422.96	28
17	R3	0.01%	36.00	36.22	5253.27	28
18	R3	0.01%	36.30	34.58	5015.40	28
1	R1	0.03%	36.30	3.98	577.25	1
2	R1	0.03%	36.10	4.18	606.26	1
3	R1	0.03%	35.80	4.11	596.10	1
4	R1	0.03%	35.40	4.15	601.91	1
5	R1	0.03%	35.60	17.82	2584.57	3
6	R1	0.03%	35.90	18.92	2744.11	3
7	R1	0.03%	35.50	17.51	2539.61	3
8	R1	0.03%	36.10	18.38	2665.79	3
9	R1	0.03%	35.70	24.84	3602.74	7
10	R1	0.03%	36.10	24.28	3521.52	7
11	R1	0.03%	35.90	25.14	3646.25	7
12	R1	0.03%	35.70	24.65	3575.18	7
13	R1	0.03%	36.10	33.46	4852.96	28
14	R1	0.03%	36.00	34.55	5011.05	28
15	R1	0.03%	36.10	34.12	4948.69	28
16	R1	0.03%	36.00	34.12	4948.69	28
17	R1	0.03%	35.90	33.93	4921.13	28
18	R1	0.03%	36.00	33.65	4880.52	28
1	R2	0.03%	35.90	5.20	754.20	1
2	R2	0.03%	35.20	4.71	683.13	1
3	R2	0.03%	37.10	6.09	883.28	1
4	R2	0.03%	35.30	5.45	790.46	1
5	R2	0.03%	38.00	23.87	3462.05	3
6	R2	0.03%	35.40	21.07	3055.94	3
7	R2	0.03%	38.30	24.06	3489.61	3
8	R2	0.03%	35.70	21.33	3093.65	3
9	R2	0.03%	38.10	28.38	4116.17	7
10	R2	0.03%	36.00	27.19	3943.58	7

11	R2	0.03%	37.70	27.60	4003.04	7
12	R2	0.03%	36.40	25.93	3760.83	7
13	R2	0.03%	36.90	27.26	3953.73	7
14	R2	0.03%	36.70	37.36	5418.61	28
15	R2	0.03%	36.30	39.16	5679.68	28
16	R2	0.03%	36.60	38.34	5560.75	28
17	R2	0.03%	36.10	37.77	5478.07	28
18	R2	0.03%	36.50	39.76	5766.70	28
1	R3	0.03%	35.90	8.49	1231.37	1
2	R3	0.03%	36.70	8.19	1187.86	1
3	R3	0.03%	35.30	7.81	1132.74	1
4	R3	0.03%	36.50	8.99	1303.89	1
5	R3	0.03%	35.50	19.43	2818.08	3
6	R3	0.03%	36.50	17.07	2475.79	3
7	R3	0.03%	35.70	18.63	2702.05	3
8	R3	0.03%	36.50	18.44	2674.50	3
9	R3	0.03%	35.80	24.19	3508.46	7
10	R3	0.03%	36.90	25.83	3746.32	7
11	R3	0.03%	36.60	22.65	3285.10	7
12	R3	0.03%	35.50	23.32	3382.28	7
13	R3	0.03%	36.60	33.21	4816.70	28
14	R3	0.03%	36.30	36.36	5273.57	28
15	R3	0.03%	36.20	33.88	4913.88	28
16	R3	0.03%	37.60	36.75	5330.14	28
17	R3	0.03%	37.20	36.09	5234.41	28
18	R3	0.03%	35.70	34.01	4932.73	28
1	R1	0.05%	36.20	4.95	717.94	1
2	R1	0.05%	36.40	5.35	775.95	1
3	R1	0.05%	35.60	5.23	758.55	1
4	R1	0.05%	35.80	5.09	738.24	1
5	R1	0.05%	36.00	18.25	2646.94	3
6	R1	0.05%	35.80	18.29	2652.74	3
7	R1	0.05%	35.00	16.07	2330.76	3
8	R1	0.05%	35.50	17.40	2523.66	3
9	R1	0.05%	36.40	24.28	3521.52	7
10	R1	0.05%	36.50	25.82	3744.87	7
11	R1	0.05%	36.60	25.30	3669.45	7
12	R1	0.05%	36.30	25.43	3688.31	7
13	R1	0.05%	36.00	35.05	5083.57	28
14	R1	0.05%	36.00	34.34	4980.59	28
15	R1	0.05%	36.10	36.42	5282.27	28
16	R1	0.05%	36.00	34.36	4983.50	28

17	R1	0.05%	36.00	36.73	5327.23	28
18	R1	0.05%	36.10	36.46	5288.07	28
1	R2	0.05%	36.40	7.79	1129.84	1
2	R2	0.05%	36.60	8.02	1163.20	1
3	R2	0.05%	35.90	7.83	1135.65	1
4	R2	0.05%	36.00	7.64	1108.09	1
5	R2	0.05%	35.90	17.29	2507.70	3
6	R2	0.05%	36.20	18.25	2646.94	3
7	R2	0.05%	36.00	18.16	2633.88	3
8	R2	0.05%	36.10	17.39	2522.21	3
9	R2	0.05%	36.00	17.89	2594.72	3
10	R2	0.05%	36.20	18.20	2639.69	3
11	R2	0.05%	36.00	24.39	3537.47	7
12	R2	0.05%	36.20	22.57	3273.50	7
13	R2	0.05%	36.20	25.49	3697.01	7
14	R2	0.05%	36.20	25.30	3669.45	7
15	R2	0.05%	36.10	34.90	5061.82	28
16	R2	0.05%	36.30	37.03	5370.75	28
17	R2	0.05%	37.20	36.09	5234.41	28
18	R2	0.05%	35.70	34.01	4932.73	28
1	R3	0.05%	36.20	6.50	942.75	1
2	R3	0.05%	35.30	6.01	871.68	1
3	R3	0.05%	37.50	6.93	1005.11	1
4	R3	0.05%	35.60	6.66	965.95	1
5	R3	0.05%	36.70	19.91	2887.70	3
6	R3	0.05%	38.50	19.25	2791.98	3
7	R3	0.05%	36.70	20.22	2932.66	3
8*	R3	0.05%	38.10	21.37	3099.46*	3
9	R3	0.05%	36.70	25.18	3652.05	7
10*	R3	0.05%	37.40	29.12	4223.50*	7
11	R3	0.05%	36.80	24.35	3531.67	7
12	R3	0.05%	36.80	24.48	3550.52	7
13	R3	0.05%	36.90	32.80	4757.24	28
14	R3	0.05%	36.10	34.31	4976.24	28
15	R3	0.05%	36.40	33.18	4812.35	28
1	R1	0.07%	36.10	5.26	762.90	1
2	R1	0.07%	35.50	4.88	707.78	1
3	R1	0.07%	35.50	5.14	745.49	1
4	R1	0.07%	34.60	4.55	659.92	1
5	R1	0.07%	35.80	18.22	2642.59	3
6	R1	0.07%	36.40	18.05	2617.93	3
7	R1	0.07%	36.40	18.80	2726.71	3

8	R1	0.07%	36.20	18.67	2707.85	3
9	R1	0.07%	35.80	24.01	3482.36	7
10	R1	0.07%	35.60	24.74	3588.23	7
11	R1	0.07%	36.00	24.90	3611.44	7
12	R1	0.07%	36.30	26.40	3829.00	7
13	R1	0.07%	36.20	36.13	5240.21	28
14	R1	0.07%	36.20	37.38	5421.51	28
15	R1	0.07%	36.20	36.99	5364.94	28
16	R1	0.07%	36.40	38.60	5598.46	28
17	R1	0.07%	35.90	5.22	757.10	1
18	R1	0.07%	36.10	36.12	5238.76	28
1	R2	0.07%	35.80	4.52	655.57	1
2	R2	0.07%	35.40	4.61	668.62	1
3	R2	0.07%	37.40	5.55	804.96	1
4	R2	0.07%	35.60	5.31	770.15	1
5	R2	0.07%	37.90	18.31	2655.64	3
6	R2	0.07%	35.70	16.81	2438.08	3
7	R2	0.07%	38.10	18.49	2681.75	3
8	R2	0.07%	36.20	18.12	2628.08	3
9*	R2	0.07%	38.10	20.75	3009.53*	7
10	R2	0.07%	36.60	23.75	3444.65	7
11	R2	0.07%	37.60	24.81	3598.39	7
12	R2	0.07%	36.70	22.88	3318.46	7
13	R2	0.07%	36.90	25.04	3631.74	7
14*	R2	0.07%	37.00	25.28	3666.55*	28
15	R2	0.07%	36.50	32.18	4667.31	28
16	R2	0.07%	37.00	32.30	4684.72	28
17	R2	0.07%	36.00	30.47	4419.30	28
18	R2	0.07%	36.40	31.95	4633.95	28
1	R3	0.07%	36.20	4.84	701.98	1
2	R4	0.07%	37.00	4.91	712.14	1
3	R5	0.07%	36.20	4.78	693.28	1
4	R6	0.07%	36.50	5.05	732.44	1
5	R7	0.07%	36.00	17.48	2535.26	3
6	R8	0.07%	36.60	17.69	2565.72	3
7*	R9	0.07%	35.70	16.14	2340.91*	3
8	R10	0.07%	36.40	17.63	2557.01	3
9	R11	0.07%	36.40	22.66	3286.55	7
10	R12	0.07%	36.50	24.56	3562.13	7
11	R13	0.07%	36.50	24.13	3499.76	7
12	R14	0.07%	36.40	23.42	3396.78	7
13	R15	0.07%	36.40	24.56	3562.13	7

14	R16	0.07%	36.60	33.92	4919.68	28
15	R17	0.07%	36.30	34.23	4964.64	28
16	R18	0.07%	36.50	36.11	5237.31	28
17	R19	0.07%	35.90	32.40	4699.22	28
18	R20	0.07%	35.70	32.32	4687.62	28

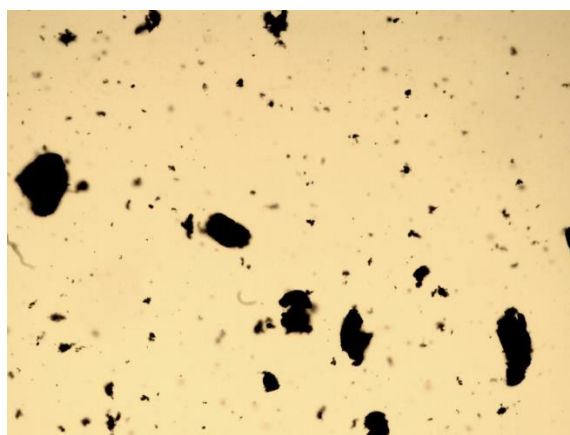
*Resultados eliminados para cálculos finales al ser considerados como “datos anómalos” por al menos dos de tres criterios estadísticos.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., Finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Anexo N°11: Pruebas de solubilidad de MWCNTs con a) poliacrilato, b) policarboxilato y c) éteres policarboxílicos respectivamente



a) poliacrilato



b) policarboxilato



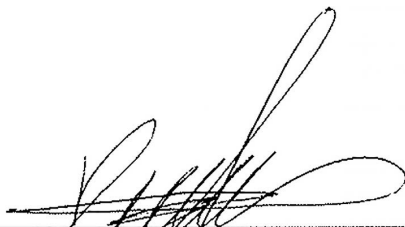
c) éteres policarboxílicos

Anexo N°12: Dispersiones de nanotubos realizadas por ultrasonido

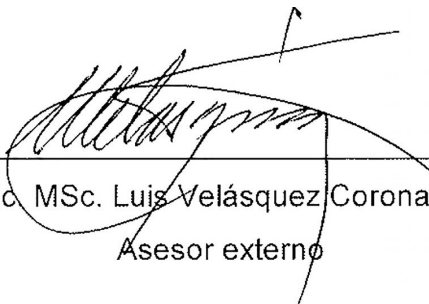


Anexo N°13: Cubos de 1"³ realizados

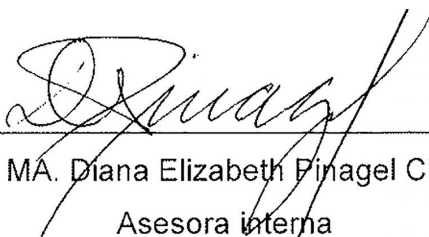




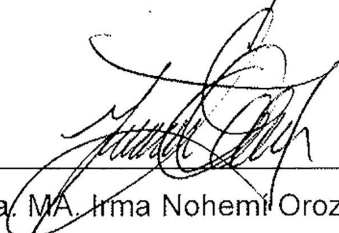
Br. Ricardo Antonio Posadas Villeda
Autor



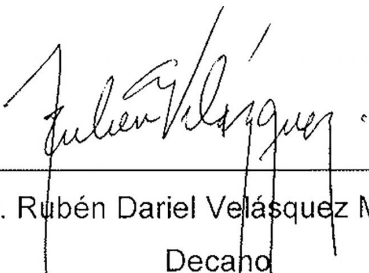
Lic. MSc. Luis Velásquez Corona
Asesor externo



Licda. MA. Diana Elizabeth Pinagel Cifuentes
Asesora interna



Licda. MA. Irma Nohemi Orozco Godínez
Directora de Escuela de Química



Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda
Decano