

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

**“Preparación de Probetas de Concreto con Nanotubos de Carbono
para el Mejoramiento de sus Propiedades”**

Para Obtener el Grado Académico de Maestría en Ciencias en Física

Elaborada Por:

Joe Takeshi Valerio Yachachin

Asesor:

Dr. Luis Alberto Mosquera Leiva

LIMA – PERÚ

2019

Dedicatoria:

Esta tesis va dedicada a mi familia, por apoyarme toda mi vida a superarme. Este logro es un pequeño detalle con mucho sacrificio y cariño de parte mía.

Agradecimiento:

A la Dr. Mosquera Leiva Luis Alberto, director del Círculo de Investigación. Por su dirección, paciencia, entrega y valiosos consejos, que me permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis.

A mis profesores Dr. Hector Loro, Dra. María Quintana y Mg. Clemente Luyo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniera los cuales he aprendido mucho en estos dos últimos años. 1

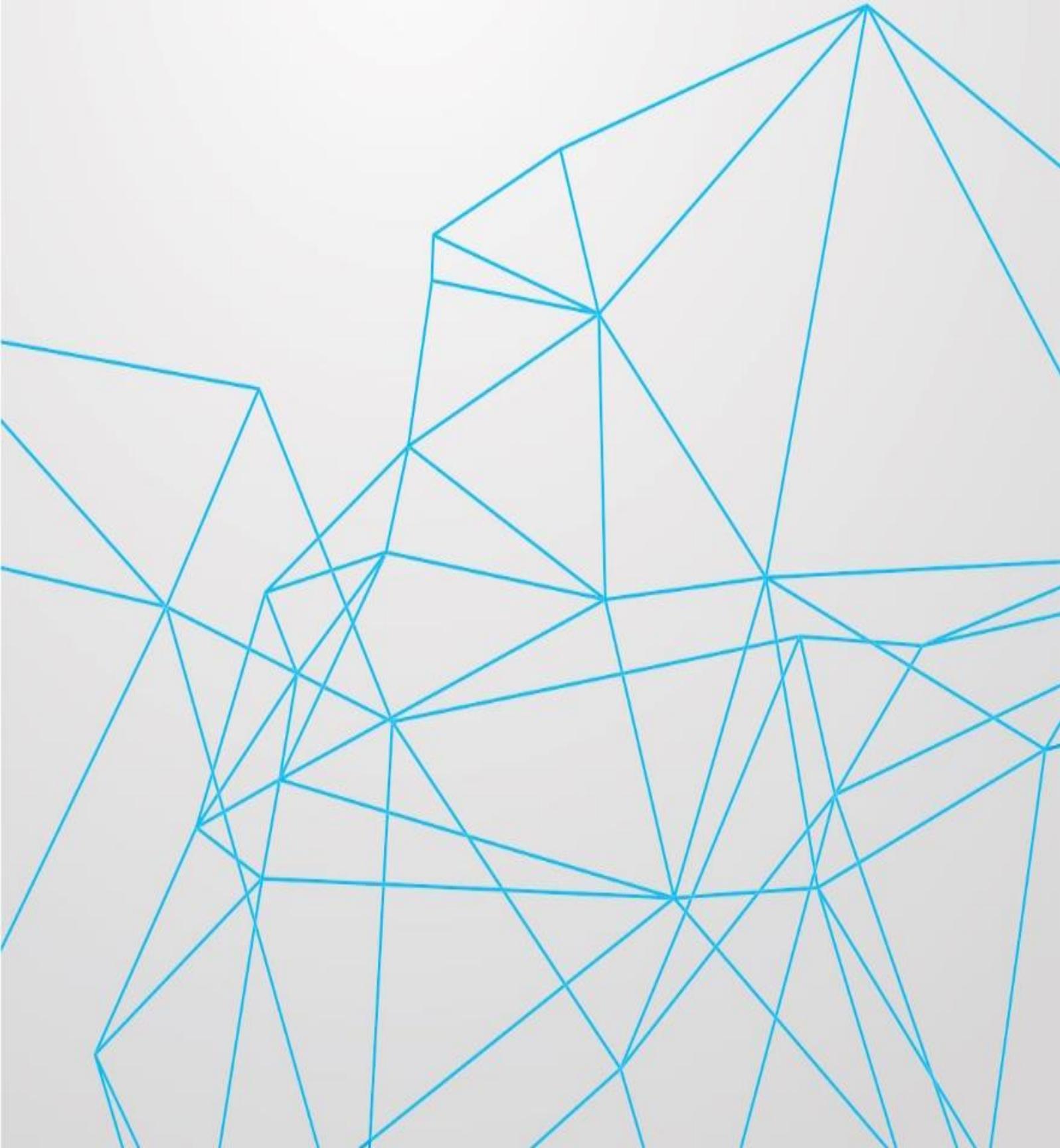
A la Mg. Ana Torre por el apoyo brindado durante la estadía en el Laboratorio N°1 de Ensayos de Materiales (LEM), Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

A mis compañeros Jose Yataco y Cesar Sanchez por su apoyo en la fabricación de las probetas de cemento.

El desarrollo de esta tesis fue posible debido al financiamiento recibido por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por medio del convenio de financiación N° 103-2015.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, mi alma mater, por brindarme las herramientas para ser un magister y mejor persona.

Resumen / Abstract



1. Resumen

El presente trabajo de investigación presenta el estudio de la elaboración y de las propiedades de carbonatación, mecánicas, morfológicas, estructurales y eléctricas del concreto dopado con nanotubos de carbono para analizar sus ventajas en futuras aplicaciones en la construcción.

Para el desarrollo de esta investigación se elaboraron probetas cilíndricas y cúbicas, como también se diseñó una cámara de carbonatación. Además, se consideró el estudio de la presencia de los Nanotubos de Carbono (CNT).

Las preparaciones de las probetas fueron realizadas mediante la Norma ASTM C305-14 para morteros y pasta de cemento. Además, de acuerdo con los resultados de granulometría mediante la normal ASTM C136 se usó la arena de la empresa UNICON en los morteros.

La caracterización de carbonatación para probetas se realizó empleando una cámara cerrada donde se ingresaba CO_2 en aproximadamente el 8% en masa con respecto al aire. Esta parte del trabajo se desarrolló en el Laboratorio N°1 de Ensayos de Materiales (LEM) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Por otro lado, la caracterización mecánica de las probetas consistió en el desarrollo de los ensayos mecánicos de compresión mediante la Norma ASTM C109, todos ellos realizados en el Laboratorio N°1 de Ensayo de Materiales.

Con relación al estudio de las propiedades estructurales y morfológicas se empleó Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido, ambas técnicas fueron desarrolladas en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La caracterización eléctrica de pastas de cemento se realizó empleando el método de las cuatro puntas de Wenner la Norma ASTM G57-06. Esta parte del trabajo se desarrolló en la empresa Para-Rayos S.A.C Lima-Perú.

Como resultados de la carbonatación acelerada se encontró que la máxima cantidad de Nanotubos de Carbono que puede agregarse a las probetas para una mayor impermeabilidad del dióxido de carbono es del 0,5% en relación a masa de cemento.

De acuerdo con los resultados de compresión las probetas de mortero con cemento Sol al 1% de Nanotubos de Carbono en relación a la masa de cemento tuvo el valor promedio más alto que fue de 6,626 kN/cm², comparado al de las probetas sin aditivos con cemento sol que fueron de 5,05 kN/cm². Encontrando un aumento máximo del 30% en la presión de compresión.

Según las fotografías de microscopia electrónica de barrido se puede observar la morfología y el compuesto CaCO_3 en el interior de las probetas lo que evidencia el proceso de carbonatación. Para el caso de los Nanotubos de Carbono, estos presentan una distribución aglomerada y con poca dispersión dentro de las probetas.

Los estudios de DRX, se tuvo que la portlandita y la calcita tienen estructuras hexagonales.

Finalmente, los resultados de la resistividad eléctrica en las probetas sin aditivo y con Nanotubos de Carbono al 1% mostraron cualitativamente que las probetas con nanotubos de carbono tienen menor porosidad a comparación de las probetas sin aditivo.

Palabras clave: Pasta de cemento, Mortero, *Nanotubos de Carbono (CNT)*, ASTM, Carbonatación, Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido y Conductividad Eléctrica.

2. Abstract

The present research project presents the study of the elaboration and carbonation, mechanical, morphological, structural and electrical properties of concrete doped with carbon nanotubes to analyze its advantages in future applications in construction.

For the development of this investigation, cylindrical and cubic specimens were prepared, as well as a carbonation chamber was designed. In addition, the study of the presence of Carbon Nanotubes (CNT) was considered.

The specimen preparations were made by Standard ASTM C305-14 for mortars and cement paste. In addition, according to the results of granulometry using the normal ASTM C136, the sand from the company UNICON was used in the mortars.

The characterization of carbonation for test specimens was done using a closed chamber where CO₂ was entered in approximately 8% by mass with respect to air. This part of the work was developed in the Laboratory No. 1 of Material Testing (LEM) of the Civil Engineering School of the National University of Engineering.

On the other hand, the mechanical characterization of the specimens consisted of the development of mechanical comprehension tests using the ASTM C109 Standard, all of them carried out in the Laboratory No. 1 of Material Testing.

In relation to the study of structural and morphological properties, X-ray diffraction and scanning electron microscopy were used, both techniques were developed in the Faculty of Sciences of the National University of Engineering.

The electrical characterization of cement pastes was carried out using the method of the four tips of Wenner, the ASTM G57-06 Standard. This part of the work was developed in Para-Rayos S.A.C Lima-Perú.

As a result of accelerated carbonation, it was found that the maximum amount of Carbon Nanotubes that can be added to the specimens for a greater impermeability of carbon dioxide is 0.5% in relation to the mass of cement.

According to the compression results, the mortar specimens with 1% Sol cement of Carbon Nanotubes in relation to the cement mass had the highest average value that was 6,626 kN / cm², compared to that of the specimens without Additives with sun cement that were 5.05 kN / cm². Finding a maximum increase of 30% in compression pressure.

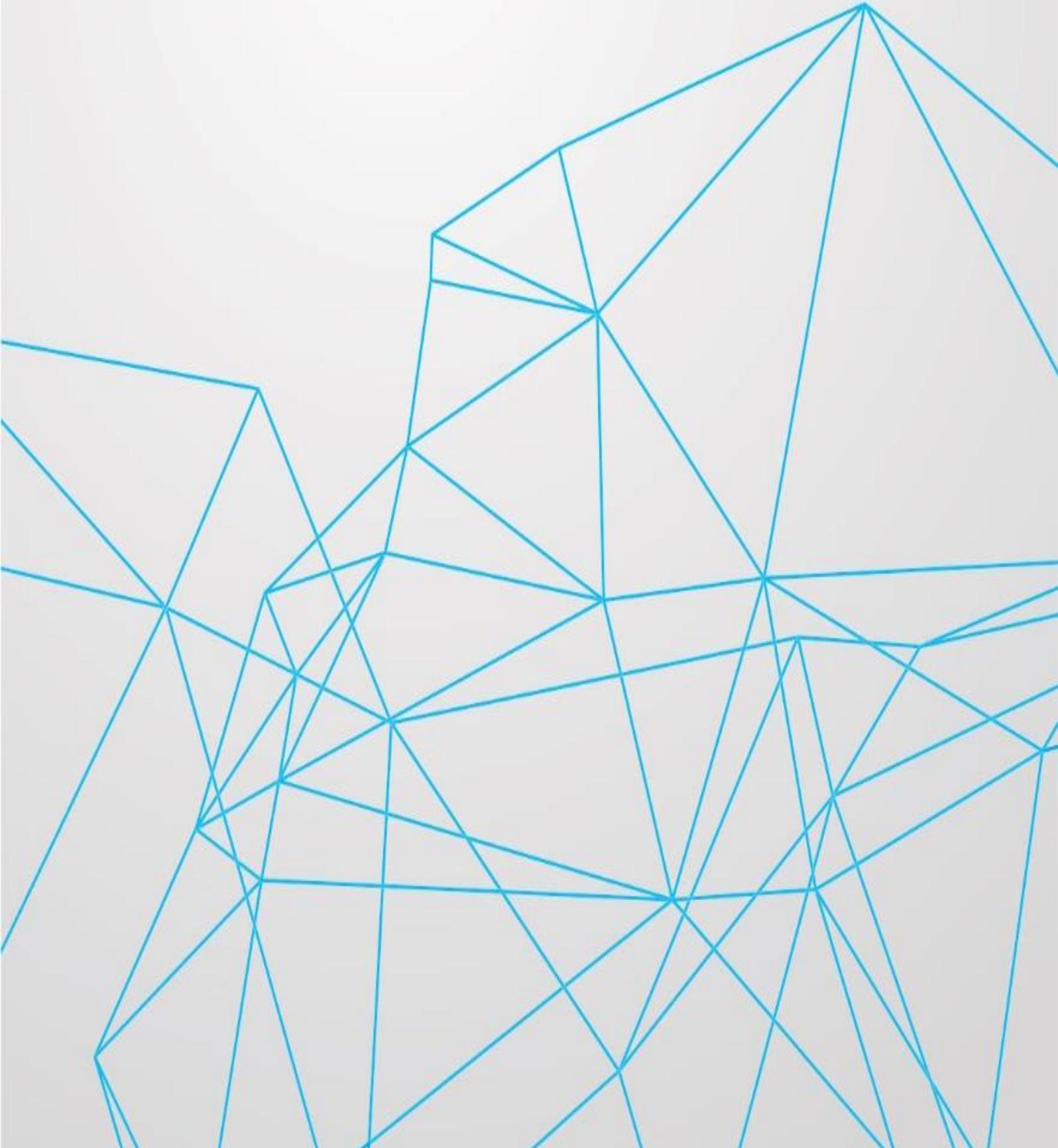
According to the scanning electron microscopy photographs, the morphology and the CaCO₃ compound can be observed inside the specimens, which is evidence of the carbonation process. In the case of the Carbon Nanotubes, they present an agglomerated distribution and with little dispersion inside the specimens.

The XRD studies, we had that portlandite and calcite have hexagonal structures.

Finally, the results of the electrical resistivity in the samples without additive and with 1% Carbon Nanotubes showed qualitatively that the samples with carbon nanotubes have lower porosity compared to the samples without additive.

Keywords: Cement paste, mortar, carbon nanotubes (CNT), ASTM, carbonation, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and electrical conductivity.

Índice

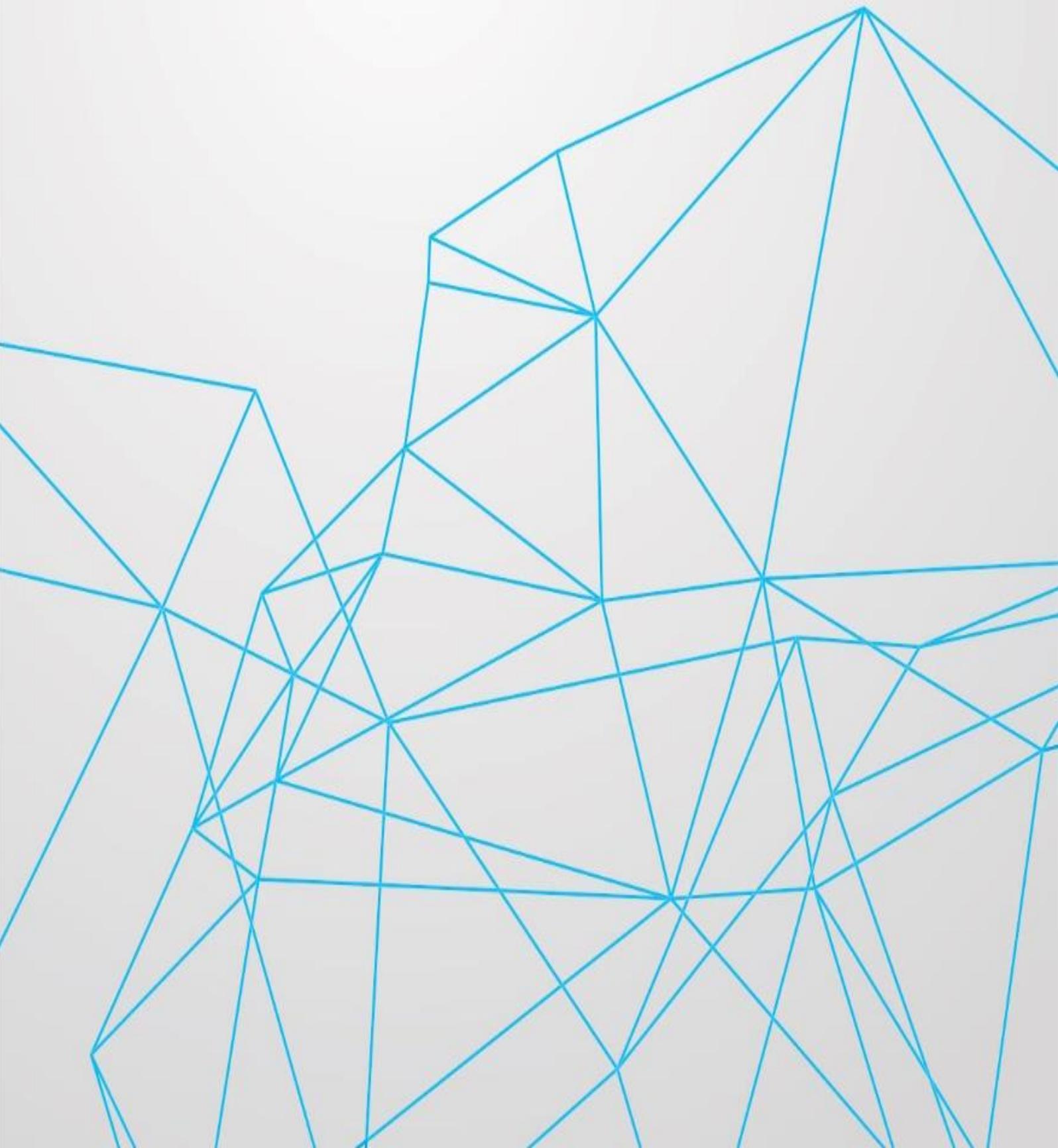


Índice

Dedicatoria	II
Agradecimiento	III
Resumen / Abstract	IV
1. Resumen	V
2. Abstract	VII
Índice	IX
Capítulo 1: Introducción	1
1. Antecedentes	2
2. Planteamiento del Problema	2
3. Hipótesis	3
4. Objetivos	3
Capítulo 2: Marco Teórico	5
1. Cemento Portland, Aditivos y Agregados	6
2. Fundamentos en la Fabricación y Medición de Probetas de Cemento	10
3. Nanotubos de Carbono (CNT)	16
4. Caracterizaciones	24
Capítulo 3: Desarrollo Experimental	34
1. Materiales	35
2. Procedimiento Experimental para la Fabricación y Caracterización de Propiedades en Probetas de Cemento	39

Capítulo 4: Resultados y Discusiones	46
1. Datos Experimentales	47
2. Análisis Estadísticas	77
Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos a Futuro	89
1. Conclusiones	90
2. Trabajos a Futuro	90
Capítulo 6: Bibliografía	91

Capítulo 1: Introducción



1. Antecedentes

Hasta mediados de la década de los 80 del siglo pasado, solo se conocía dos estructuras del carbono sólido puro, estas eran el diamante y grafito que son alótropos con diferentes propiedades; sin embargo, sus átomos están dispuestos en redes unidas covalentemente. En 1985 un grupo de investigadores liderados por Richard Smalley y Robert Curl de Rice University en Houston y Harry Kroto de la Universidad de Sussex en Inglaterra encontraron una nueva estructura del carbono, a esta estructura se la llamó “ buckminsterfullerene ” o “ buckyball ” para abreviar. Esta estructura represento un nuevo alótropo que es de la forma de una pelota de fútbol que se forma por una molécula C_{60} . Las propiedades geométricas únicas de este nuevo alótropo del carbono, no solo cambiaron el enfoque de cómo se podría aprovechar el carbono, también animo a los investigadores a buscar nuevas estructuras del carbono, encontrando tubos cilíndricos largos. Estos tubos originalmente se llamaron “ buckytubes ”, pero ahora se conocen mejor como nanotubos de carbono o CNT, para abreviar. Fue la observación del investigador Iijima en los nanotubos de carbono de varias capas en 1991 que anunció la entrada de muchos científicos en este campo, los cuales pretendían conocer todo sobre estas nuevas estructuras. Mientras que la observación experimental inicial fue para nanotubos de pared múltiple (MWNT), Iijima y su grupo tardaron menos de 2 años en descubrir nanotubos de carbono de pared única (SWNT) experimentalmente.

Las propiedades que se encontraron en las estructuras de los CNT fueron una fuerza a la compresión 1000 GPa, una conductividad eléctrica de $10^6 S/m$ y una conductividad térmica de 6000 W/mK, etc. La causa de estas propiedades fueron los efectos cuánticos unidimensionales (1D) predichos por su estructura, y posteriormente por la promesa de dar lugar a nuevas aplicaciones únicas en todas las áreas de la tecnología.

En la actualidad la capacidad de producción de los CNT está creciendo de manera exponencial ya que la síntesis de este compuesto ha mejorado notablemente y su caracterización es conocida por casi todos los científicos. Por lo que ha pasado de ser un material de ensueño a ser un material del mundo real ya que ha encontrado sus campos de aplicación provocando una alta demanda, que trajo como consecuencia el descenso abrupto de su precio. Los CNT han mostrado una sorprendente variedad no solo en sus propiedades sino también se han acoplado para generar nuevos resultados en diversos sectores como el de energía, sector de la medicina, sectores medioambientales, sectores de la electrónica, etc.

En el sector de ingeniería civil, los CNT se utilizan eficazmente en diversos trabajos de investigación que mejoran notablemente las propiedades del cemento en morteros y hormigón, cuando se agrega en ella, tales propiedades del cemento son la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, la resistencia a la flexión, la porosidad, la conductividad eléctrica y térmica [4].

2. Planteamiento del problema

Un problema del concreto de las edificaciones es la recombinación del CO_2 atmosférico con el concreto que ocurre de forma irreversible alterando las propiedades de las

construcciones por la disminución del pH, algo importante ya que el elevado pH protege al acero de la oxidación. Los hidróxidos y los compuestos hidratados que se encuentran en el concreto reaccionan con CO_2 , fenómeno denominado comúnmente como carbonatación, donde el principal producto de la reacción es el carbonato cálcico en condiciones normales de presión y temperatura. Este fenómeno ha sido estudiado por numerosos autores y han relacionado la concentración de CO_2 frente al cambio de pH, estos estudios en su mayoría son fundamentados con el fenómeno de la difusión.

Por otro lado, nuestro país al encontrarse e

n el “Cinturón de Fuego del Pacífico” es constantemente afectado a movimientos sísmicos de bajas y altas intensidades, que pueden generar pérdidas humanas como también económicas y no fuese el acaso generan deterioros internos en las edificaciones que podrían afectar a largo plazo el colapso de las mismas.

En la actualidad existen aditivos como la micro-sílice y el aceite de ricino que pueden mejorar las propiedades de comprensión-tracción y disminuir la permeabilidad respectivamente en las estructuras, pero las consecuencias que puedan generarse al agregarse al diseño de mezcla perjudican otras propiedades como es el caso de la micro-sílice que ocasiona que la flexibilidad disminuya por el incremento de rigidez de la estructura.

La capacidad en la actualidad de encontrar un aditivo el cual provea de una alta flexibilidad, que mejore las propiedades de comprensión, tracción e impermeabilice a la estructura sin modificar aspectos importantes de este son inexistentes con los aditivos tradicionales en la actualidad.

3. Hipótesis

Las propiedades únicas de los nanotubos de carbono como su alto módulo de Young, su poca afinidad a reaccionar y su tamaño podrían mejorar las propiedades de las estructuras diseñadas por concreto generando una disminución de poros que sucederá cuando los nanotubos de carbono se ubiquen dentro los poros y estando allí trabajen como resortes provocando una mejora en las propiedades mecánicas de comprensión, tracción y flexibilidad.

4. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos planteados en la presente tesis.

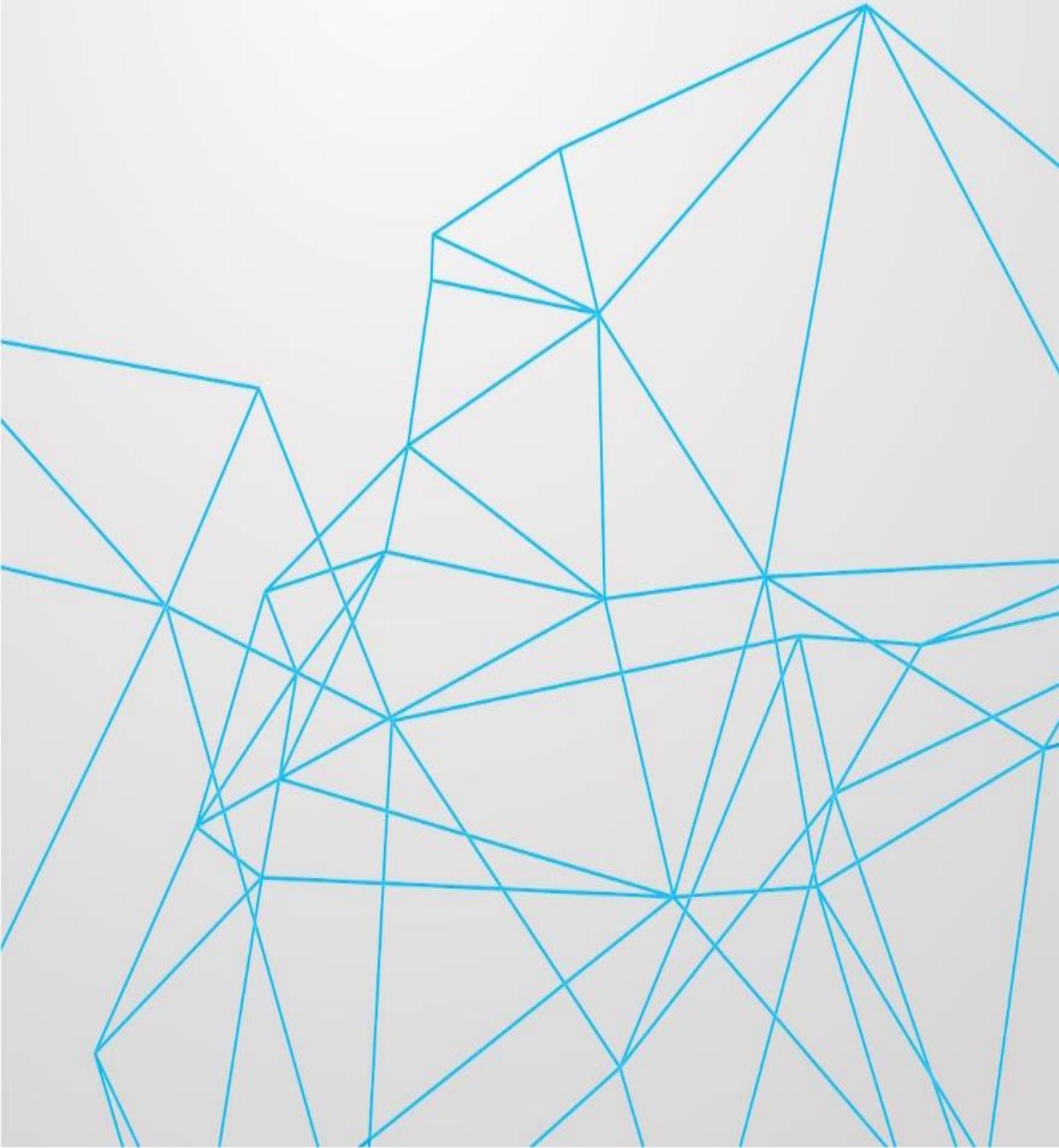
4.1 Objetivo Generales

- Encontrar un método de preparación de probetas de cemento con Nanotubos de Carbono, comparados con probetas sin aditivos. Identificando los cambios en las propiedades de las probetas mediante caracterizaciones de carbonatación, mecánica, estructuralmente, morfológica y eléctricas.

4.2 Objetivo Específicos

- Encontrar parámetros importantes en la carbonatación tanto para pasta de cemento como para morteros.
- Identificar como la concentración de CO₂ varía con diferentes porcentajes de nanotubos de carbono en el proceso de carbonatación, comparados con los aditivos convencionales para pasta de cemento y mortero.
- Relacionar los efectos de la carbonatación en las muestras de pasta de cemento con las muestras de mortero.
- Buscar funciones de ajuste la cual represente el comportamiento de la carbonatación en pasta de cemento y mortero.
- Identificar como las propiedades mecánicas varían con diferentes porcentajes de nanotubos de carbono.
- Caracterización estructural interna y morfológica de las probetas usadas.
- Identificar como las propiedades eléctricas se relacionan con el concreto.

Capítulo 2: Marco Teórico



1. Cemento Portland, Aditivos y Agregados

1.1 Cemento Portland

El cemento Portland patentado por Joseph Aspdin en 1824 es el material artificial de construcción más ampliamente utilizado en la construcción en la actualidad.

El cemento Portland es obtenido como resultado del calentamiento de granos finos de una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos a una temperatura próxima a 1400 ° C a 1700 °C. En el proceso descrito anteriormente se generan reacciones las cuales dan como productos una mezcla la cual se denomina Clinker. Por último, el Clinker es llevado a una molienda donde junto con una cantidad pequeña de sulfato de calcio es triturado generando como resultado el cemento Portland [8]. Tal y como lo define la norma ASTM C150/C150M – 09[9], “el cemento Portland es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente dividido que amasado con agua forma una masa plástica, donde internamente se genera el proceso de hidratación, dando paso al fraguado y finalmente el endurecimiento”. La composición estándar del cemento Portland es de 60% a 45% de $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C3S Silicato tricálcico), de 15% a 30% de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C2S), de 6% a 12% de $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A), de 6% a 8% de $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF) y de 1% a 3% de otros componentes. [8 – 11].

1.2 Tipos de Cemento Portland

Existen diferentes tipos de cemento de acuerdo a las aplicaciones del concreto y sus propiedades, estas propiedades pueden ser acelerar el proceso de construcción, disminución del calor de hidratación, controlar los cambios de volumen, las grietas de contracción asociadas y otros expuestos a los sulfatos. Todos los tipos de cementos varían principalmente de acuerdo al porcentaje de cuatro compuestos en su composición, dichos compuestos son C3S, C2S, C3A y C4AF.

Se tienen cinco tipos de cementos generales que están normados en ASTM C 150. Además de los cinco tipos de cementos existen otros como cementos Portland Puzolánicos (Cemento Portland Puzolánico Tipo IP y Cemento Portland Puzolánico Modificado Tipo I(PM)), cementos Portland escoria (Cemento Portland de Escoria Tipo IS y Cemento Portland de Escoria Modificado Tipo I(SM)) y cementos Portland tipo Ico.

- Cemento Tipo I (Normal): Se puede hacer trabajos generales con este tipo de cementos.
- Cemento Tipo II (Resistencia moderada a sulfatos): Este tipo de cemento que protege ante una exposición moderada a los sulfatos y un moderado calor de hidratación.
- Cemento Tipo III (Alta resistencia inicial): Se utilizada en construcciones rápida. En ambientes fríos reduce el tiempo requerido para una curación controlada.
- Cemento Tipo IV (Bajo calor de hidratación): Utilizadas cuando la masa de la estructura requiere un control cuidadoso del calor de hidratación.
- Cemento Tipo V (Alta resistencia a los sulfatos): Para protección frente a una exposición severa a los sulfatos.
- Cemento Portland Puzolánico Tipo IP: Producido mediante molienda conjunta de clinker y puzolana (contenido de puzolana de 15% - 40%)

- Cemento Portland Puzolánico Modificado Tipo I(PM): Producido mediante molienda conjunta de clinker y puzolana (contenido de puzolana < 15%).
- Cemento Portland de Escoria Tipo IS: Producido mediante molienda conjunta de clinker y escoria (contenido de escoria de 25% - 70%).
- Cemento Portland de Escoria Modificado Tipo I(SM): Producido mediante molienda conjunta de clinker y escoria (contenido de escoria < 25%).
- Cemento Portland Tipo Ico: Cemento Portland obtenido por pulverización clinker Portland, materias calizas y/o inertes hasta un máximo de 30%. Sus propiedades debido a su composición son su resistencia a la compresión, trabajabilidad, plasticidad, moderada resistencia al ataque de los sulfatos, cloruros, reduce fisuras, grietas en el concreto y mayor impermeabilidad

Se presenta una tabla de los tipos de cementos:

Tabla 1. Se presenta el porcentaje de los diferentes tipos de concreto y la densidad de cada una [12].

Tipos de cemento	Porcentaje de C3S	Porcentaje de C2S	Porcentaje de C3A	Porcentaje de C4AF	Finura de Blaine (m ² /kg)
I	55	19	10	7	370
II	51	24	6	11	370
III	55	19	10	7	540
IV	28	49	4	12	380
V	38	43	4	9	380

De las cuales el cemento I y III son idénticas pero la única diferencia es el área superficial que el cemento tipo III contiene. El contenido de C3A de los cementos de tipo II y V es inferior al del tipo I, lo que mejora la resistencia a los sulfatos. El C3S y C3A están limitados en el cemento de tipo IV, con el fin de limitar la velocidad de hidratación [12].

1.3 Aditivo

Los aditivos son aquellos productos que, introducidos en el hormigón, mortero o pasta de cemento permiten modificar sus propiedades del compuesto de manera prevista y controlada. Estos productos son agregados en pequeña proporción en su fabricación. Aun cuando los aditivos son un componente habitual en el cemento, existen ciertas condiciones y desventajas que producirá el aditivo en la muestra de cemento. De esta manera su uso estará condicionado por:

- a) Que se obtenga el resultado deseado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- b) Que el producto no tenga efectos negativos en otras propiedades de las muestras de cemento [12].

- **Aditivo Mejorador de la Trabajabilidad del Concreto Reductor de Agua para lograr Concretos Fluidos, Compactos y Durables**

Es un aditivo reductor de agua y plastificante de color marrón de uso universal, que hace posible diseñar mezclas de concreto de fácil colocación. Permite una reducción de agua hasta 10%, generando aumento en la resistencia a la compresión y durabilidad del

concreto. Tiene además propiedades de reducir la permeabilidad del concreto y cumple con la norma ASTM C-494 tipo A.

Propiedades:

- Aumenta la trabajabilidad sin necesidad de aumentar la relación agua / cemento.
- Aumenta la hermeticidad al agua impermeabilizándolo y produciendo mayor resistencia a la penetración de la humedad y por consiguiente al ataque de sales.
- Aumenta la durabilidad debido a su alto grado de resistencia al salitre, sulfatos y cloruros.
- Aumenta la resistencia a la compresión y flexión a todas las edades.
- No transmite olor ni sabor al agua potable.

Preparación y aplicación del producto:

Se debe agregar 145 ml a 360 ml de CHEMA PLAST por bolsa de cemento al agua de amasado de acuerdo al efecto deseado, sin combinarlo con otros aditivos. La cantidad que debe agregarse a morteros debe ser de 2 a 10% en masa de cemento [5].

• Aditivo Incorporador de Aire

Los incorporadores de aire tienen un papel importante en la producción del concreto, generan micro burbujas de aire, estables, separadas y distribuidas uniformemente. Mejora la trabajabilidad del concreto y reduce la segregación y exudación. Aumentan la durabilidad del concreto a los ciclos hielo-deshielo.

Aditivo elaborado a base de agentes tensoactivos que adicionado al concreto genera micro burbujas que se reparten uniformemente en la masa del concreto. No contiene cloruros y cumple con la Norma ASTM C 260 [6].

Propiedades:

- Mayor porosidad por la generación de micro burbujas de aire que se distribuyen en toda la muestra.
- Mayor trabajabilidad, reducción la segregación y exudación por la presencia de micro burjas de aire.
- Aumento de las resistencias a la acción de aguas agresivas.
- Incremento de las resistencias a ciclos de hielo y deshielo.
- Rompe la capilaridad.

Usos:

Se adiciona en un rango de 2 a 10% de cemento en la mezcla, nunca en el cemento durante la elaboración del concreto y la cantidad que debe agregarse es de 0,2 a 0,4 ml por kilo de cemento de la mezcla. La incorporación de aire en un concreto depende principalmente de:

- Los agregados que pueden ser arena o piedra chanchada (granulometría y forma de los granos).
- Razón a/c.
- Dosis de cemento por m³ de concreto elaborado.
- Finura del cemento.

- Relación de áridos finos/gruesos.
- Tipo de mezcladora y tiempo de mezclado.
- Temperatura, etc.

1.4 Agregados

La importancia del uso del tipo y de la calidad correcta del agregado (árido) no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada (partida, machacada, pedrejón) con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Para el caso de agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm.

Los agregados naturales como la arena y la grava normalmente se excavan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La escoria de alto horno es enfriada al aire y se tritura para ser agregado fino o grueso.

Los agregados deben cumplir la norma ASTM C 33 para que su uso sea optima, donde se evalúa características como: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento [76].

1.5 Pasta de cemento

Una pasta es un producto que se obtiene si se mezcla un conglomerante (cemento) con agua sin ningún tipo de árido (arena o piedra chancada). Generalmente se utiliza para reparaciones, decorados estéticos, separar las partículas de agregados, etc. Para determinar una buena consistencia en la pasta de cemento se debe usar la norma ASTM C 187 donde la cantidad de agua que se le agregue será el único factor a considerar.

La proporción en masa que se utiliza entre el agua y el cemento (a/c) para pastas de cemento se encuentra entre los valores de 0,2 a 0,4; esto depende mucho del uso que se le dé en el área de trabajo. Si se aumenta la proporción de agua que utilizemos aumentará la fluidez, disminuirá las propiedades mecánicas y se incrementa la porosidad y la permeabilidad. Por otro lado, si disminuye la proporción de agua la fluidez disminuirá, las propiedades mecánicas aumentaran, se disminuirá la porosidad y la permeabilidad [12].

1.6 Mortero

Un mortero es un producto que se obtiene si se mezcla un conglomerante (cemento) con agua y arena (agregados) cuya aplicación se utiliza para obras de albañilería, como material de agarre, revestimiento de paredes, etc. Para tener una fluidez adecuada en las mezclas de mortero se recurre a la norma ASTM C 1437.

La resistencia a la compresión es una propiedad la cual se determina en morteros con la normal NTP 334.051:2013, donde esta norma está basada en la norma internación ASTM C109/C109M-2012 cuyo nombre es “Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento portland usando especímenes cúbicos de 50mm de lado”. La norma establece el procedimiento y preparación de probetas para determinar la resistencia a la compresión en morteros de cemento Portland, usando cubos de 50mm de lado, lo cual se determina llevando a la rotura dichos cubos. La preparación de las probetas consistente de 1 parte de cemento y 2,75 partes de arena dosificada en masa y son mezclados a una relación agua cemento de 1 a 0,485 este último aproximadamente. Los cubos son secados por un día en su molde y luego son desmoldados para curarlos en agua con cal en una proporción de 1L por 3 g respectivamente en los 28 días siguientes [13].

2. Fundamentos en la Fabricación y Medición de Probetas de Cemento

2.1 Mezclado

Son necesarios esfuerzo y cuidado para que se asegure que la combinación del cemento, agua y agregados sea homogénea. La secuencia en la que se vierte los ingredientes en la mezcladora puede desempeñar un papel importante en la uniformidad del producto acabado. La secuencia, sin embargo, puede variar y aún producir un concreto de buena calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el momento de la adición del agua, el tiempo al mezclarlos y la velocidad de la revolución de la mezcladora. Las mezcladoras aprobadas, correctamente operadas y conservadas garantizan un intercambio de materiales de extremo a extremo y una mezcla homogénea [76].

2.2 Sangrado y Asentamiento

Sangrado (exudación) es la generación de agua en el tope o en la superficie del concreto recién colocado en el molde. Es causada por la sedimentación de los agregados y el cemento portland de la masa plástica.

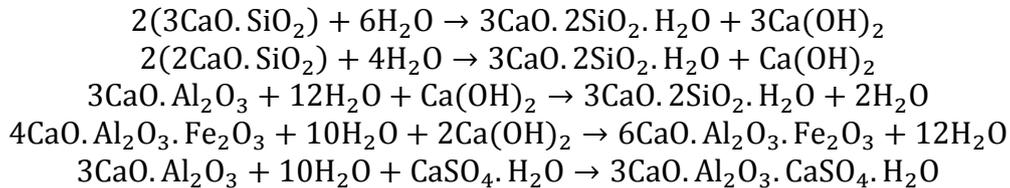
Después que toda el agua de sangrado se evapore, la superficie endurecida va a ser un poco más baja que la superficie recién colocada. Esta disminución de la altura desde el momento de la colocación (puesta, colado en el molde) hasta el inicio del fraguado se llama retracción por sedimentación.

La tasa de sangrado y la capacidad de sangrado aumentan con la cantidad inicial de agua, altura del elemento de concreto y presión. El uso de agregados de granulometría adecuada, ciertos aditivos químicos, aire incluido, materiales cementantes suplementarios y cementos más finos reduce el sangrado [76].

2.3 Hidratación del Cemento

La hidratación es la mezcla de cemento con agua la cual reacciona de manera que hidrata a las fases constituyentes. La relación masa de agua/cemento (a/c) en las mezclas de cemento (pastas, morteros y hormigones) suele estar comprendida entre 0,2 a 0,6 y se

debe tener en cuenta que al aumentar la relación agua cemento se incrementa la porosidad, la permeabilidad y disminuye la resistencia mecánica. Los principales productos de la hidratación son el hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o comúnmente llamado “Portlandita” y el gel de silicato cálcico hidratado C- S- H ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Las reacciones que se dan en este proceso son:



La forma en cómo se encuentran los productos de la reacción en la mezcla del concreto y agua, en el caso del hidróxido de calcio, es una estructura de forma octaédrica para los átomos de calcio y tetraédrica para el oxígeno, pero cuando el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ precipita se considera que idealmente estos tienen una forma de cristales hexagonales. Por su parte C- S- H es muy importante ya que este compuesto genera la resistencia de los materiales hechos de cemento y presenta una estructura variable, siendo aún investigado en la actualidad. Otras estructuras que se forman luego del proceso de hidratación del cemento son los sulfo-aluminatos y los aluminatos hidratados AFt y AFm, siendo la ettringita de tipo AFt y los monocarboaluminatos y los monosulfoaluminatos del tipo AFm, la formación de estos últimos depende de muchos factores tales como la composición del cemento, las condiciones y el tiempo de hidratación [8 – 11].

Por último, la relación calcio/silicio y el número de moléculas de agua combinadas varían dependiendo de los factores de la hidratación y la composición del cemento [7].

2.4 Fraguado

El fraguado es la etapa donde se endurece y pierde plasticidad la probeta de cemento, producido por la desecación y recristalización que es consecuencia de la reacción de hidratación donde los hidróxidos metálicos reaccionan con los óxidos metálicos presentes en el Clinker.

El tiempo de este proceso es generalmente de alrededor de unas diez horas, aunque varía dependiendo de la humedad relativa, temperatura ambiente, etc.

Se pueden añadir aditivos retardantes o acelerantes del fraguado que permiten su mejor manejo en la elaboración de probetas [76].

2.5 Curado del Cemento

El curado, según la norma ACI 308, es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor [51]. En sentido práctico curar el concreto es garantizar las condiciones óptimas de humedad y temperatura necesaria para que el concreto desarrolle propiedades que ayuden a que los poros se reduzcan mediante una buena reacción de hidratación.

Un adecuado y oportuno método de curado debe hacerse por lo general en 28 días sumergidos en agua para pasta de cemento, mortero y hormigón. Este proceso trae tantos y tan variados beneficios a la estructura del concreto que no hacerlo es simplemente desperdiciar sus bondades. El curado no sólo influye en la resistencia mecánica final del concreto, también disminuye la permeabilidad trayendo como consecuencia la resistencia del concreto al ingreso de gases (CO_2 , Oxígeno y sulfuros) y elementos que evitan la carbonatación y la corrosión. La reducción de la porosidad y grietas son generadas en una buena reacción de hidratación y un proceso de secado lento y homogéneo lo cual puede realizarse con el curado.

2.6 Vida Útil del Cemento

El cemento mezclado con agua genera la pasta de cemento que puede utilizarse para reparaciones, empastados y acabados en construcción. Pero si se añade áridos de diferentes tamaños se obtiene el mortero u hormigón. Existen diversas aplicaciones del mortero, pero en el ámbito de la construcción los más importantes son el revestimiento, el solado y la reparación. El hormigón, por su parte, es usado en armaduras de acero y en columnas, siendo las armaduras de acero su aplicación más importante. Debido a sus notables ventajas de durabilidad, resistencias y por su versatilidad comparado con otros materiales el cemento Portland es el material más usado en construcción.

El concreto armado, diseñado y producido en el rubro de la construcción es un material muy duradero, pero el diseño y la producción son esenciales para cumplir esta condición caso contrario puede deteriorarse y por consiguiente dejar de cumplir su propósito correctamente. Conforme a las normas vigente en la actualidad para garantizar la seguridad de los bienes, la protección ambiental, los animales y sobre todo los seres humanos; las estructuras de concreto tienen que ser adecuadas no solo en su uso sino también en todo el tiempo de vida útil, siendo para las estructuras de edificación 50 años y para las de obra civil de 100 años.

La vida útil que tienen las edificaciones se consigue gracias a la protección que el concreto armado proporciona al acero, esta protección es generada especialmente por el recubrimiento del hormigón el cual protege en dos formas al acero interno, siendo la primera una barrera física que dificulta el acceso de agentes agresivos exteriores y la segunda por la alta alcalinidad ($\text{pH} = 12$) que el hormigón tiene, esta última protección es considerada como una capa pasiva que mantiene inalterable las condiciones del acero. A pesar de recubrir el acero con hormigón, la porosidad que existe en el concreto permite que este material sea permeable permitiendo que líquidos y gases de carácter ácidos accedan hasta el acero produciendo una corrosión electroquímica causada por la disminución de la alcalinidad que da lugar a que las sustancias ácidas reaccionen con el acero [12].

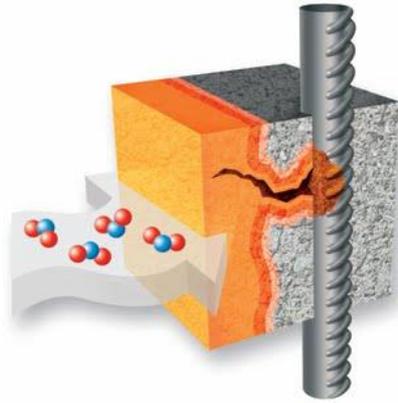


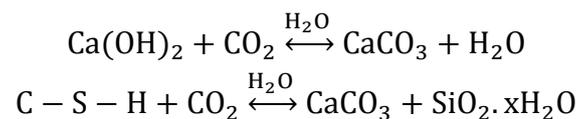
Figura 1. Proceso de corrosión del acero causada por el medio que lo rodea.

2.7 Carbonatación

El hormigón tiene un alto pH de valores de 12 a 14 que forma una capa protectora para el acero, todo esto es gracias a la portlandita y C-S-H especialmente los cuales se forman durante la hidratación de los compuestos anhidros del cemento y el hidróxido de calcio presente. La pérdida de la alcalinidad se debe por las reacciones de los compuestos básicos que se encuentran en el concreto en estado acuoso y los componentes ácidos del medio ambiente, dichos compuestos son el dióxido de carbono (CO_2) y el dióxido de azufre (SO_2), generando como resultado carbonatos, sulfatos y agua. Dado que el compuesto ácido de mayor relevancia en el aire es el CO_2 , esto debido a que su concentración en el medio ambiente es de 0,04% en la actualidad, sus interacciones con el concreto serán importantes para el estudio de la disminución de pH. A este fenómeno en el cual se forman carbonatos a causa de la pérdida de la alcalinidad se le denomina como 'carbonatación'.

La carbonatación produce pérdida de la resistencias a la tracción y compresión en las zonas afectadas, así como también generar micro-fisuras y tensiones que ayudan a mejorar la propagación del CO_2 en el concreto. Se debe tener en cuenta que el CO_2 al reaccionar con el concreto da lugar a un reacción irreversible.

El CO_2 ingresa al concreto a través de los poros no saturados con agua debido a la propiedad de difusión de los gases donde posteriormente este gas se disuelto pasando a estado acuoso y quedando atrapado dentro de los poros. Los iones CO_3^{2-} generados en la reacción de carbonatación interactúan con los iones Ca^{2+} formando carbonato cálcico (CaCO_3). Esta interacción de iones puede producirse tanto con los iones Ca^{2+} provenientes de la portlandita como con los del gel C- S-H. Las reacciones son expresadas continuación:



La reacción que se produce con el gel C- S- H es una reacción de tipo descalcificación y polimerización, donde se genera como productos el silicato hidratado ($\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) y el carbonato cálcico (CaCO_3). El carbonato cálcico precipita, por lo general, en forma de calcita, aunque en casos específicos se genera también los polimorfos de aragonito y

vaterita. Los materiales encontrados en concretos totalmente carbonatados son las fases estables de sílice amorfa, calcita, hidróxido de aluminio y yeso.

La carbonatación dependen de parámetros del concreto los cuales son la porosidad, la cantidad y el tipo de cemento; por otra parte, las condiciones ambientales tales como la humedad, la concentración CO_2 y las sustancias acidas también afectan dicho proceso [14].

La porosidad es un factor de importancia dado que los poros existentes en el concreto forman una red permitiendo que se construya un camino por el cual el CO_2 ingresa al interior de la estructura [15- 21]. La porosidad tiene una relación con el nivel de compactación, el tiempo de curado, el tipo de curado y la relación agua/cemento [22- 24]. Una forma inadecuada de curar el concreto en los 28 días o una mala compactación al elaborar estructuras de concreto pueden dar lugar a que la porosidad se incremente permitiendo que las estructuras sean más permeables. En general, dentro de unos límites aceptables de hidratación, siempre se busca una baja relación agua/cemento ya que generara que los poros sean pequeños y no estén interconectados para que se produzca un concreto menos permeable.

La cantidad de cemento es un factor importante dado que proporciona la capacidad de fijar el CO_2 en el concreto, también se tiene que el tipo de cemento es otro factor importante ya que los compuestos que se encuentran en cada tipo de cemento pueden variar en composición y proporción siendo los aluminatos, álcalis o capaz algún otro compuesto modificadores de la cinética química en la carbonatación. La cantidad necesaria de CO_2 para disminuir la alcalinidad hasta un pH casi neutros, en donde el acero dejara de estar protegido, varía de manera directa a la cantidad alcalina dentro del concreto la cual depende exclusivamente de la cantidad de cemento utilizado [25- 26].

La humedad es otro factor importante ya que a valores de humedad bajas, aproximadamente por debajo del 50%, la cinética química en la carbonatación se reduce por la falta de una cantidad mínima de agua para que reaccione de manera adecuada la portlandita, pero a humedades muy altas el agua que se encuentra dentro de los poros dificultará el paso del CO_2 a través de estos. Por lo tanto existe un rango adecuado en el cual existe una mayor difusión del CO_2 , este es de 50- 60%. También la temperatura influye en el contenido de la humedad del hormigón y en la difusión del CO_2 dado a que si se tiene ambientes con mayor temperatura la humedad disminuirá pero la difusión del CO_2 aumentará [27].

Todo lo anteriormente expuesto condujo a que se propusiera normas (UNE 112011:1994 y UNE- EN 14630:2007) con las cuales se caracterizara la profundidad de las zonas de pH inferiores a 8, denominada habitualmente como 'profundidad de carbonatación' [52- 53]. Por el lado de la difusión del CO_2 se propusieron modelos para la concentración de dicho gas, uno de estos modelos sencillo es la función $y = y_0 + A \cdot e^{-\frac{x}{t}}$, como también la función $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{t}{x_0})^p}$ [28].

2.8 Carbonatación Acelerada

La carbonatación es un proceso lento que demora años a causa del bajo contenido de CO_2 en el aire, del orden de 0,04% en volumen en la actualidad, de manera que en las

construcciones, por lo general, los efectos de este fenómeno son relevantes luego de varios años o décadas. Por este motivo los investigadores aceleran el proceso utilizando porcentajes de CO_2 mayores que los atmosféricos donde su objetivo es predecir el comportamiento de la carbonatación a largo plazo. Los resultados que obtuvieron los investigadores, entre los ensayos naturales y acelerados, no es clara en todos los casos, razón por la cual en 1958 Verbeck expuso que la reacción de carbonatación parece depender de la concentración de CO_2 , ya que la humedad internamente el concreto podría verse afectado indirecta por la concentración de CO_2 . Lo encontrado por Verbeck es que a altas concentraciones de CO_2 se produce un aumento de la humedad interna del concreto llegando a ser en estos casos mayor que la humedad externa, esto es ocasionado por una mayor cinética química en la reacción que genera como consecuencia un aumento en la formación de agua, caso contrario ocurre en los procesos naturales donde sus bajas concentraciones de CO_2 permiten que la humedad interna no aumente por encima de la humedad exterior.

En 1987 las investigaciones sobre la carbonatación dieron resultados comprobando que a concentraciones del 6% la profundidad hasta donde ingresaba el CO_2 era similar al de probetas que se carbonataban en ambientes de laboratorio a lo largo de un año. El investigador Sanjuan et al. en el 2003 [30] concluyo y verificó que realizar ensayos de 7- 15 días con probetas de concreto en un ambiente cuya concentración es del 6- 8% de CO_2 estable un procedimiento donde las condiciones son adecuadas para entender la cinética química en el proceso de carbonatación, ya que los resultados obtenidos con las condiciones expuestas anteriormente dan como resultado aproximadamente la misma profundidad que al cabo de un año en condiciones naturales. Como conclusión la bibliografía determina que a concentraciones no mayores al 6 o 8% de CO_2 el proceso de carbonatación es similar al que ocurre en ambientes naturales.

En cuanto a las microestructuras causadas por la carbonatación acelerada y la natural, los investigadores tienen diversas opiniones. Las caracterizaciones en microscopia realizadas por Al- Kadhimi et al. en 1996 afirman que la microestructura no difiere entre una probeta de pasta de cemento que ha sufrido carbonatación acelerada con una que ha sufrido carbonatación natural. El trabajo de Castellote et al. en 2009 [31], siendo este trabajo centrado en la reacción de las fases, confirma que a bajas concentraciones de CO_2 , menores al 7%, las probetas carbonatadas de manera acelerada no modifican su microestructura de forma drástica y son similares en su microestructura a las probetas carbonatadas de manera natural, caso contrario a lo ocurrido con concentraciones mayores al 10% donde la microestructura es totalmente diferente. Por otro lado, las investigaciones realizadas por Anstice et al. en 2005 [32] consistían en carbonatar probetas de pasta de cemento a concentraciones del 0,03, 5 y 100% de CO_2 , hasta que la prueba de la fenolftaleína indicara una carbonatación total, dando como resultado que los valores en las pruebas de mineralogía, alcalinidad en las disoluciones de poros, y la estructura de los mismos varían significativamente con las pruebas hechas en las probetas a concentración del medio ambiente.

La norma europea UNE- EN 13295:2005 actualmente que se usa para reparación en estructuras de concreto [33] se basa en la realización de ensayos con probetas de concreto al 1% de CO_2 por 56 días en una atmósfera con una humedad controlada del 60% para poder determinar de esta manera la profundidad de la carbonatación mediante la

coloración por fenolftaleína, aunque no se determine ninguna relación entre la carbonatación acelerada y la natural.

2.9 Resistividad Eléctrica del Concreto

Estudios realizados por Calleja 1960; Monfore 1968; McCarter and Ashfar 1988; Morris moreno et al 1966 tal como cita Rebolledo, 2010 han demostrado que las propiedades eléctricas del concreto tienen una relación con las características de la microestructura en el concreto [54].

Una de las características del concreto es que es un material poroso en el cual los iones se disuelven mediante la humedad que tiene el propio concreto, esta condición del concreto permite que la capacidad de transportar carga eléctrica por dichos poros dependa exclusivamente de la humedad, la corriente de iones en la solución de los poros, la acumulación de iones en las interfaces y la polarización de las moléculas. Todo esto fue encontrado por los investigadores los cuales propusieron que la resistividad eléctrica de un material poroso depende de la movilidad de los iones en la porosidad conectada. Adicionalmente se agrega que el factor de formación y de difusión de los iones en el medio poroso se puede calcular a partir de la resistividad del material y la resistividad de la solución del poro.

La relación encontrada de las propiedades eléctricas y microestructura del concreto se basa en el desplazamiento y acumulación de la carga eléctrica. Lo mencionado anteriormente llevo a que R Corral Higuera, et al, 2011 investigara y llegara a la conclusión, la cual acentuó las investigaciones previas, que existía una relación inversa entre la porosidad de las estructuras del concreto con la resistividad eléctrica, esto produjo que la resistividad sea un referente en la porosidad y la permeabilidad del concreto [55].

3. Nanotubos de Carbono (CNT)

En las últimas décadas se han observado que las estructuras de los nanotubos de carbono tienen micrómetros de largo y entre 1 y 100 nanómetros de diámetro por esta razón presentan una elevada relación longitud/radio [56]. Los primeros tipos de CNT encontradas fueron las de paredes múltiples (MWCNT), los cuales se representan por un grupo de cilíndricos concéntricos que están separados a 0,34 nm aproximadamente. Por otro lado, los CNT de paredes simples (SWCNT) son formados por una lámina de grafeno (una capa de grafito) enrollada [56-58]. Los CNT se forman cuando se unen los extremos de una capa de grafito, esta unión puede ser de varias maneras y determina las propiedades físicas de los CNT.

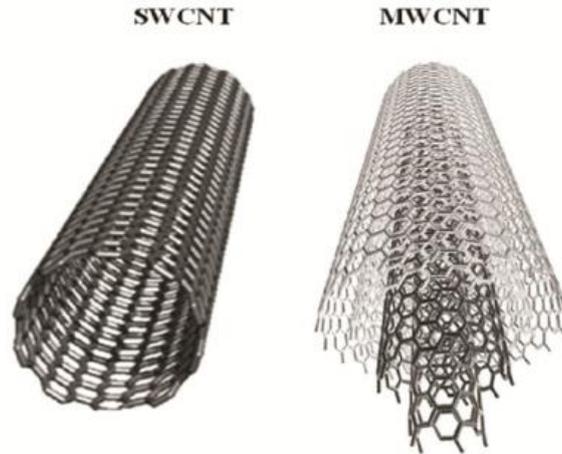


Figura 2. Los MWCNT (multi walled nanotubes) presentan tubos concéntricos y los SWCNT (single walled nanotubes) presentan una estructura formada por una sola capa.

3.1 Clasificación de los nanotubos de carbono

La forma en que se enrollan las láminas de grafeno definen las propiedades físicas de los CNT como se muestran en la Figura. Estas estructuras se pueden definir teóricamente a partir del vector \mathbf{C}_h llamado vector chiral o vector de circunferencia que forma un ángulo perpendicular con T denominado vector de traslación [58]. El vector \mathbf{C}_h está determinado de la siguiente manera:

$$\mathbf{C}_h = a_1 m + a_2 n$$

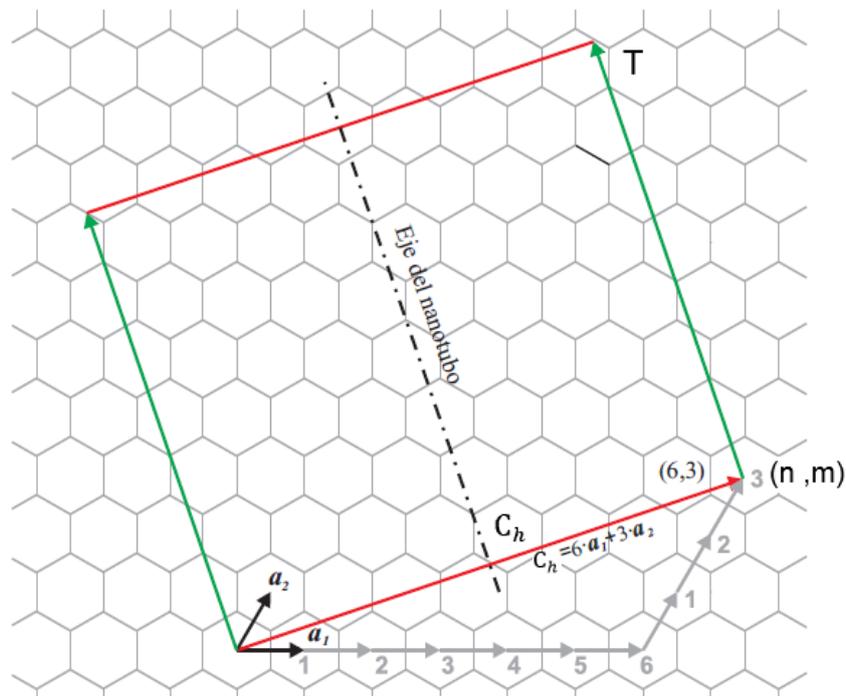


Figura 3. La lámina de grafeno muestra los vectores \mathbf{a}_1 y \mathbf{a}_2 de una celda unitaria bidimensional, estos vectores para el ejemplo se relacionan con \mathbf{C}_h como se muestra en la figura y sus índices de Hamada son (6,3).

En donde \mathbf{a}_1 y \mathbf{a}_2 son los vectores unitarios en la lámina de grafeno y m, n son dos enteros, conocidos como índices Hamada. Por otro lado, la longitud del enlace entre átomos de carbono es de 1.42 Å que fue medido por Spires y Brown en 1996, y posteriormente confirmado por Wilder en 1998 [67]. Usando esto tenemos que:

$$|\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2| = a = 2,46\text{Å}$$

Los vectores $n\mathbf{a}_1$ y $m\mathbf{a}_2$ conectan el centro de algún hexágono de la lámina con el origen definido en (0,0) formando el vector chiral [59].

Si conocemos el vector chiral es posible conocer el diámetro de los nanotubos y la dirección de enrollamiento utilizando las siguientes expresiones:

$$|\mathbf{C}_h| = a(m^2 + mn + n^2)^{1/2}$$

$$d = \frac{a(m^2 + mn + n^2)^{1/2}}{\pi}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{2n + m}{2(m^2 + mn + n^2)^{1/2}}\right)$$

Donde θ es el ángulo entre el vector chiral y el vector \mathbf{a}_1 , el cual junto a $|\mathbf{C}_h|$ definen la dirección del vector chiral [60].

La orientación del vector chiral en diferentes direcciones con respecto al eje T, genera que la lámina de grafeno se enrollará de diferentes maneras como se muestran en la Figura.

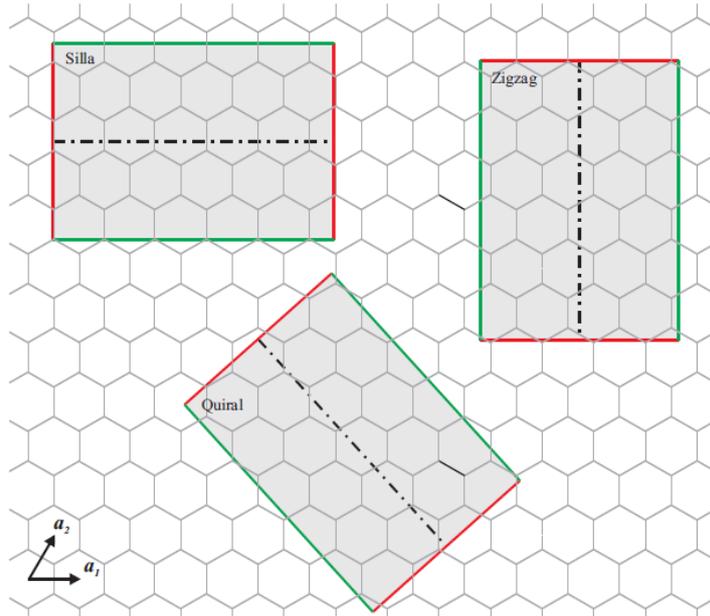


Figura 4. Diferentes orientaciones del rectángulo definido por el vector quiral y el vector de traslación dan como resultado los tres tipos de CNT posibles.

La importancia de cómo se enrolla la lámina de grafeno es producto de la variación de los índices (m,n) generando tres diferentes tipos de estructuras que existen en los CNT de paredes simples, los cuales son armchair, zig-zag y quiral, como se muestra en la figura 4.

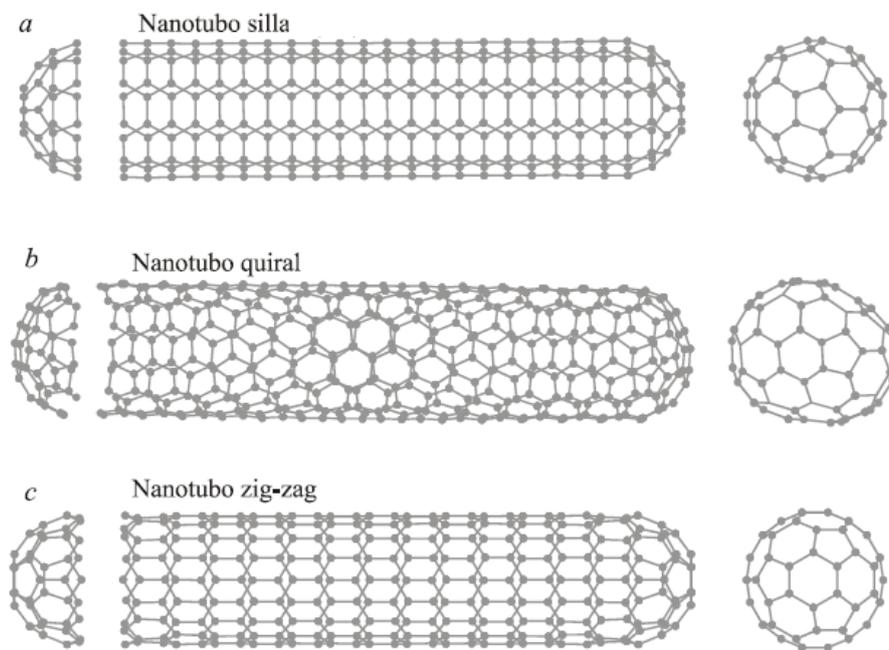


Figura 5. Morfología de los nanotubos de carbono según el ángulo de enrollamiento de la lámina de grafeno.

Los nanotubos Armchair tienen esta denominación si $n = m$ y si además poseen una helicidad de $\theta=30^\circ$. Los Zig-zag se denominan así cuando $m=0$ y poseen además una helicidad de $\theta=0^\circ$. Todas las demás combinaciones son características de los CNT quiral [61]. De acuerdo a su clasificación genérica los nanotubos tipo quiral no tienen simetría de reflexión y son no isomórficos. Por el contrario, los zig-zag y armchair poseen simetría de reflexión y son isomórficos.

Los nanotubos de carbono con múltiples paredes están formados precisamente por múltiples tubos, estos CNT puede ser Zig-zag, Armchair o de tipo Chiral. Por esta razón los MWCNT son difíciles de agrupar y ser estudiados.

3.2 Propiedades de los nanotubos de carbono.

- **Propiedades Eléctricas**

Al poco tiempo de haberse iniciado las investigaciones con los CNT, el investigador Thess calculó que la resistividad de los SWCNT era del orden de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ a 300K. Esto se hizo midiendo la resistividad directamente con la técnica de cuatro puntas. Uno de los valores que se llegó a medir fue 0.34×10^{-4} , la cual indica que los SWCNT tienen una alta conductividad eléctrica parecida a los metales pero poco después los investigadores encontraron valores del orden de $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$. Entonces se produjo una

incertidumbre que se resolvió cuando se propuso que los CNT dependiendo de su estructura podrían ser conductores o semiconductores.

La estructura geométrica depende únicamente de su diámetro, la manera de enrollarse y el número de capas concéntricas, y esta a su vez afecta a las propiedades eléctricas de los CNT haciéndolos sensibles a su estructura geométrica. Las características electrónicas únicas de los CNT se deben al confinamiento de la cantidad de los electrones normales al eje del nanotubo que poseen dos niveles disponibles para que los electrones se propaguen dentro de ellos.

Para que un nanotubo sea metálico se debe cumplir una condición llamada como la Regla de Hamada en los índices (n, m) , los cuales son: si $n - m = 3q$ (donde q es un número entero), el nanotubo será metálico; por el contrario, si los diferencia no es múltiplo de 3 será un semiconductor [62]. Entonces todos los nanotubos armchair (donde $n = m$) son metálicos y los nanotubos tipo Zig-zag y quirales que no cumplan la Regla de Hamada serán semiconductores. Estadísticamente, dos tercios de los CNT producidos son semiconductores, mientras que el otro tercio es metálico [66].

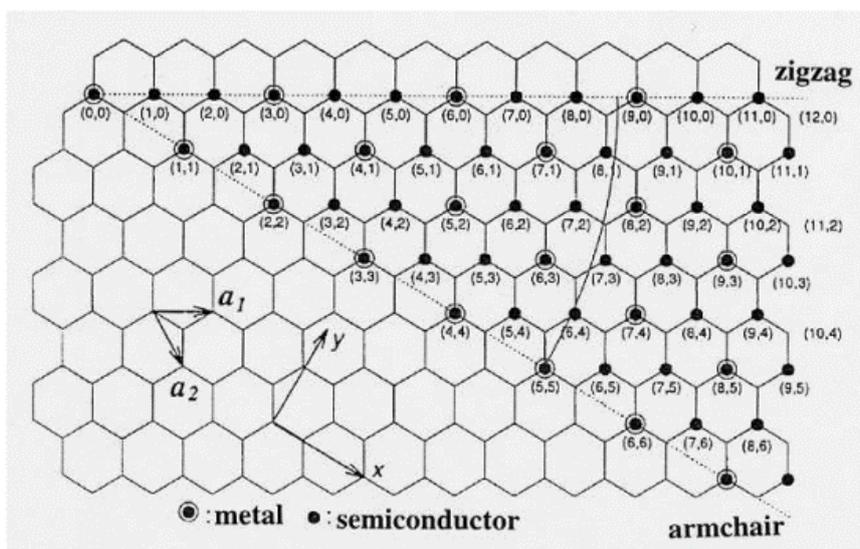


Figura 6. Representación de la lámina de grafeno, que según el vector chiral C_h especifica el comportamiento eléctrico de los nanotubos de pared simple, ya sea metálico o semiconductor

Correspondiente a los nanotubos de pared simple en los nanotubos de pared múltiple, las mediciones de la conductividad eléctrica muestran que cada nanotubo exhibe propiedades únicas de transporte y todos ellos en conjunto dan como resultado el comportamiento total de MWCNT [63,66].

- **Propiedades Mecánicas**

La fuerza de enlace carbono-carbono en la capa de grafeno es una de las más fuertes en la naturaleza, por lo que se espera que las propiedades mecánicas de los CNT tengan un gran potencial en las diferentes aplicaciones que dependan de dicha propiedad. Algunos de los parámetros importantes con las que se caracterizan las propiedades mecánicas de

los CNT son la constante elástica, su módulo de Young, la proporción de Poisson, la dureza, la resistencia a la tensión y compresión.

La propiedad de la elasticidad en los CNT ha sido una de las áreas más disputadas del estudio de los nanotubos en los últimos años. En general, los nanotubos son muy estables en la dirección del eje, estos son más rígidos que el acero y son resistentes a fuerzas de compresión y tracción. Presionar un extremo del nanotubo causará que este se doble, pero no se dañe el extremo o todo el CNT. Cuando la fuerza es removida, el extremo del CNT recobrará su estado original. Sin embargo, cuantificar estos efectos es difícil, por lo que no se ha podido llegar a un acuerdo en su valor [11].

El módulo de Young está directamente relacionado a la cohesión de un sólido y por consiguiente, a la vinculación química de los átomos que lo constituyen, por lo que se relaciona con la fuerza del enlace sp^2 dentro del hexágono de la lámina de grafeno [22]. Los cálculos para el módulo de Young de un CNT tipo SWCNT, no dependen mucho del diámetro del nanotubo o de la chiralidad y tiene un valor aproximado de 1Tpa (aprox. 1000 GPa), aunque un valor exacto no ha sido acordado.

Los resultados de varios estudios a través de los años han mostrado una gran variación en el valor reportado. En 1996, científicos de NEC en Princeton y en la Universidad de Illinois midieron el módulo Young promedio siendo de 1.8 Tpa [11]. En 1997, G. Gao, T. Cagin, y W. Goddard III midieron el módulo de Young de diferente forma, reportaron tres variaciones en el módulo de Young que eran dependientes del vector chiral, siendo estos valores para los CNT armchair (10,10) un valor del módulo de 640,30 GPa, para los CNT zigzag (17,0) un valor del módulo de 648,43 GPa, y un tipo chiral (12,6) tuvo un valor de 673,94 GPa. Al utilizar estos dos métodos diferentes, surge una discrepancia.

Más estudios se llevaron a cabo. En 1998, Treacy reportó un módulo de Young de 1,25 Tpa utilizando el mismo método básico como se hizo en 1996. Esto fue comparado con el módulo de los nanotubos multicapa (1,28 Tpa), encontrado por Wong en 1997. En 1999, E. Hernández y Ángel Rubio mostraron usando cálculos de enlace fuerte, que el Módulo de Young era dependiente del tamaño y la chiralidad del SWCNT, en un rango desde 1,22 Tpa para los tubos (10,0) y (6,6) a 1,26 Tpa para el SWCNT (20,0). Sin embargo, utilizando los primeros cálculos principales, calcularon un valor de 1,09 Tpa para un CNT genérico.

La evidencia previa podría llevar a asumir que el diámetro y la estructura del nanotubo fue el factor determinante de su módulo Young. Sin embargo, cuando se trabajaba con diferentes MWCNT, Forró encontró en 1999 no dependía fuertemente del diámetro, como se había sugerido recientemente. Ellos afirmaron que el módulo de los MWCNT correlaciona la cantidad de desorden en las paredes de los nanotubos.

Sin embargo, su evidencia mostraba que el valor para los SWCNT dependía del diámetro; un tubo individual tiene un módulo de alrededor de 1 Tpa, mientras los que MWCNT de 15 a 20 nm de diámetro tienen un módulo de alrededor de 100 GPa. Se sugirió para evitar esta controversia que el valor del módulo de Young debe estar en la interpretación del autor sobre el grosor de las paredes de los nanotubos. Si se tiene un tubo que es un cilindro sólido, entonces tendrá un menor módulo de Young. Si se considera que el tubo es hueco, el módulo se eleva, y entre más delgadas sean las paredes del nanotubo, crecerá el valor del módulo.

- **Propiedades Térmicas**

La conductividad térmica (K) es una propiedad intrínseca de los materiales que explica la capacidad de conducción del calor a través de un material la cual es elevada en metales y en general en cuerpos continuos. Aunque es baja en los gases, en materiales iónicos y covalentes, siendo los más bajos en materiales como la fibra de vidrio.

El diamante y el grafeno son los materiales con la mayor conductividad térmica que se conoce, es probable que los nanotubos también se consideren excelentes conductores de la temperatura ya que estudios teóricos han demostrado, que la conductividad térmica, puede llegar a tener valores de hasta 6600 W/m.K [14]. En 1999, J. Hone, M. Whitney, y A. Zettle encontraron que la conductividad térmica dependía de la temperatura, y estos parámetros se relacionaban de forma casi lineal. Estos investigadores propusieron que la conductividad era lineal en intervalos de temperatura que son 7K a 25K y de 25K a 40K la relación también es lineal, pero con un incremento en la pendiente y se eleva con la temperatura por encima de la temperatura ambiente [11]. Ellos propusieron un modelo para explicar el comportamiento a bajas temperaturas que es:

$$K_{zz} = \sum C v_z^2 \tau$$

K_{zz} : Pendiente de la línea en la gráfica

C : capacidad de calor

v : velocidad del sonido (Hone usó 1, 2, y 0.8 x 10⁶ cm/s)

τ : es el tiempo de relajación, que es aproximadamente 10 – 11 s

Por otro lado los investigadores Che, Cagin, y Goddard calcularon numéricamente la conductividad térmica de un SWCNT (10,10) la cual se aproxima a 29,8 W/cm.K mientras se incrementa la corriente aplicada a este ver figura 2.22 [21].

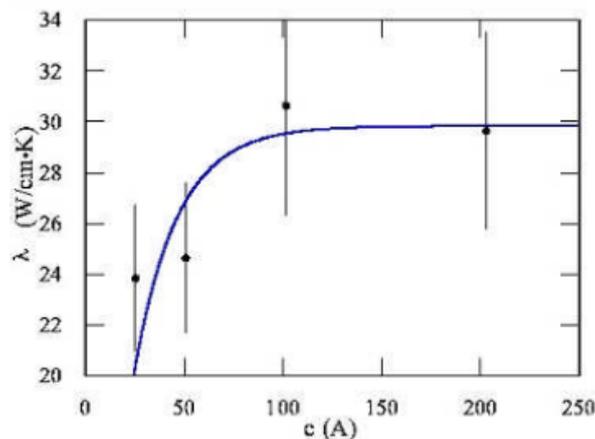


Figura 7. Conductividad térmica en función de la corriente que pasa a través del SWCNT (10, 10) [21].

La razón para la conductividad térmica sea tan alta, se basa en la teoría cinética molecular y el módulo de Young muy alto. La conductividad térmica no depende de la quiralidad o de su geometría atómica tanto a bajas temperaturas como a temperatura ambiente (mostrada en la figura) diferenciándose de las propiedades eléctricas [14].

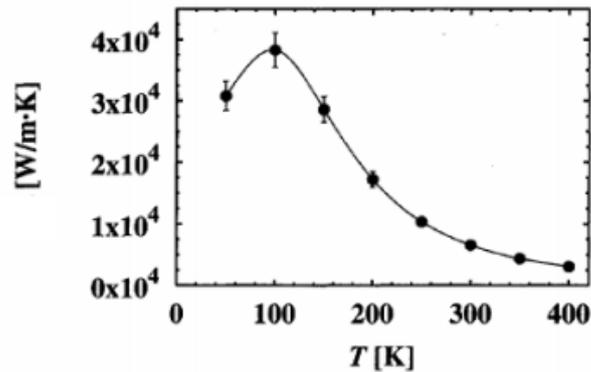


Figura 8. Conductividad térmica (K) en función de la temperatura que pasa por SWCNT (10,10) [14].

3.3 Aplicaciones de CNT

Los CNT tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores, como aplicaciones de energía, medicina, medio ambiente, electrónica e ingeniería civil.

Investigadores de la Universidad de Rice han desarrollado electrodos hechos a partir de CNT cultivados en grafeno con un área de superficie muy alta y una resistencia eléctrica muy baja. También han construido una célula solar que usa grafeno como electrodo mientras usan buckyballs y CNT para absorber la luz y generar electrones. Por el lado del almacenamiento de energía se pueden usar los CNT en una capa de cátodo de una batería que se puede producir en casi cualquier superficie simplemente rociando capas de pintura que contienen los componentes necesarios para cada parte de la batería. Los CNT también pueden funcionar como catalizadores en una pila de combustible evitando el uso de platino caro. La medicina no se queda atrás y se han hecho investigaciones para mejorar el proceso de curación de los huesos rotos al proporcionar un andamio de CNT con el que puede crecer nuevo material óseo con mayor facilidad. Otras aplicaciones incluyen su uso en aviones para aumentar la resistencia y flexibilidad en componentes altamente estresados, en compuestos de moldeo de plástico disipativos que contienen CNT que serán usados para fabricar piezas como defensas de automóviles que pueden ser pintadas electrostáticamente y cables hechos de CNT que producirán materiales suficientemente fuertes para usarlos en la construcción del elevador espacial para reducir drásticamente el costo de poner personas y materiales en órbita.

La industria de la construcción tiene una gran variedad de aplicaciones de los CNT en estructuras de hormigón. Los investigadores han descubierto que los CNT pueden llenar los vacíos que se producen en el hormigón convencional. Estos huecos permiten que el agua penetre en el concreto y cause grietas. Los CNT son candidatos potenciales para ser usados como nano-refuerzos en materiales a base de cemento [37-39]. Para aplicaciones como mejoras en las propiedades mecánicas, los CNT pueden mejorar la rigidez y la tenacidad a la fractura en un 6% y 23%, respectivamente, sin comprometer otras propiedades mecánicas. Además de la mejora en las propiedades mecánicas en el hormigón también aumenta la resistencia a la penetración de cloruros, aumento de las propiedades autocompactantes, una reducción de la permeabilidad y se han llevado a cabo muchas investigaciones en todo el mundo sobre el uso de CNT como sensores

piezoeléctricos que pueden detectar grietas para un monitoreo de salud en las estructuras de concreto [40,41].

4. Caracterizaciones

Las técnicas existentes para estudiar la carbonatación son el análisis químico, la cromatografía de gases y la espectroscopia de Infrarrojo, siendo por algunos autores importantes para evaluar diferentes aspectos del fenómeno de la carbonatación [44]. Otros métodos para caracterizar las probetas de concreto carbonatado son mediante el pH, rayos X (DRX), SEM (Microscopia electrónica de barrido) y mediante sensores que permiten medir la absorción del CO_2 .

4.1 Medición de la carbonatación mediante sensores

Se presenta un diagrama esquemático del arreglo experimental para la observación de la rapidez de absorción de CO_2 en las probetas de pastas de cemento y morteros, la cual es mostrado en la figura 9. El equipo permite monitorear en forma simultánea la concentración presente de CO_2 en la cámara, su temperatura, humedad relativa y presión en su interior mientras se produce el fenómeno de carbonatación.

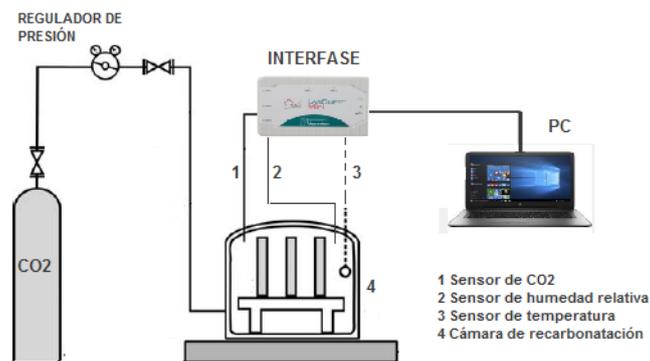


Figura 9. El diagrama muestra una cámara con entrada de CO_2 a presión regulada, cuyo interior es monitoreado en tiempo real por sensores de CO_2 , humedad relativa y temperatura.

Existen métodos para medir la velocidad de absorción CO_2 en el concreto. En el presente trabajo se realizó mediante los sensores de la empresa Pasco.



Figura 10. Equipo donde se realizaron las muestras de concreto.

- **Sensor PS-2110**

Este sensor de gas dióxido de Carbono PS-2110 mide la concentración de gas dióxido de carbono en partes por millón en gases tales como aire. El sensor está diseñado para trabajar con una interfaz compatible PASPORT (tal como el USB Link PS-2100) y software de recolección de datos PASCO (tales como Capstone o SPARKvue) para medir la concentración de gas dióxido de carbono.

El sensor incluye un cable de extensión del sensor, una botella de plástico transparente de muestreo de 250 ml y un tapón que se coloca sobre la sonda del sensor [47].

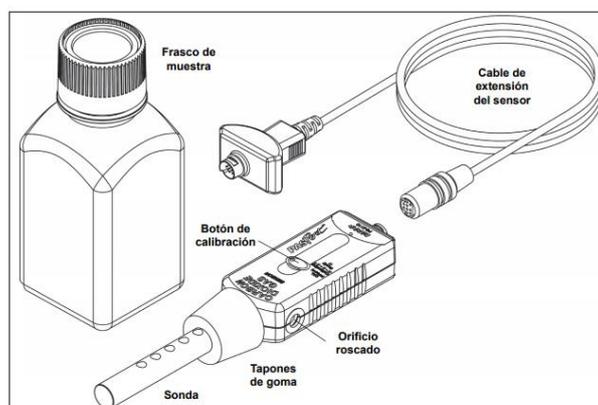


Figura 11. Sensor en cargado de medir la concentración de CO₂ de la serie PS-2110 y sus accesorios.[47]

Sus especificaciones son:

- Rango de funciones: ± 0 a 300,000 ppm.
- Precisión: 0 a 50,000 ppm: 100 ppm o 10% del valor, lo que sea mayor 10,000 a 50,000 ppm: 20% del valor Más de 50,000 ppm: sólo cualitativa.
- Resolución: 1 ppm.
- Temperatura de funcionamiento: $+20^{\circ}$ a $+30^{\circ}$ C.
- Humedad relativa: 5 a 95% sin condensación.

- Repetibilidad: ± 50 ppm o 5% del valor, lo que sea mayor.

Para la configuración del Sensor de Gas Dióxido de Carbono se debe hacer los siguientes pasos:

- Conecte el sensor de gas dióxido de carbono en el puerto de entrada PASPORT de una interfaz PASCO. NOTA: Si se necesita más distancia entre el sensor y la interfaz, conecte el sensor en el cable de extensión incluido, y luego conecte el cable a la interfaz.
- Inserte la sonda del sensor en la muestra de gas. Permita que el sensor se caliente durante 90 segundos con la sonda de temperatura entre 20° y 30° C.
- Inicie el software de recolección de datos PASCO. Usando el Software de Recolección de Datos PASCO
- Configure una pantalla de visualización de datos (tal como una pantalla digital o en gráfico) en el software.
- En Capstone, haga clic en una de las plantillas de visualización en la página de libro, o haga doble clic en un icono en la paleta de “Pantallas” para abrir una pantalla de datos.
- En la pantalla de parámetros de SPARKvue del sensor, toque ‘Concentración de CO_2 ’ para resaltarlo, y luego toque ‘Mostrar’ para abrir una pantalla de gráficos.
- Haga clic en “Grabar” (en Capstone) o toque ‘Inicio’ en SPARKvue para comenzar la grabación de datos.

- **Sensor PS-2124**

El sensor PS-2124 mide la de humedad y temperatura. Todas estas mediciones son registradas por su interfaz PASPORT o su software DataStudio. Por defecto, los datos se graban a una velocidad de 2 muestras / s. La velocidad máxima es de 10 muestras / s [48].

La humedad absoluta es obtenida mediante el punto de rocío y sus unidades en las cuales se expresan son g / m³, este sensor también puede expresar la humedad como Humedad Relativa. La temperatura por su parte es obtenida mediante una termocupla donde las unidades que puede ser expresadas son Celsius, Fahrenheit o Kelvin.

Para mejores resultados se tienen las siguientes recomendaciones:

- Mantenga el sensor alejado de la luz solar directa cuando realice mediciones.
- Si tiene la intención de dejar el sensor al aire libre, colóquelo al menos 1 m sobre el suelo y asegúrese de que permanecerá sombreado y seco.
- Si el sensor estará en un entorno inmóvil, como un terrario, use un pequeño ventilador para mantener el flujo de aire a través del sensor.

Importante: no sumerja el sensor en líquido ni permita que se moje.

Usos sugeridos

- Compare humedad, temperatura y punto de rocío a medida que cambian con el tiempo.
- Compare humedad y temperatura en varios lugares.
- Monitorear las condiciones climáticas.
- Monitorear las condiciones del invernadero.

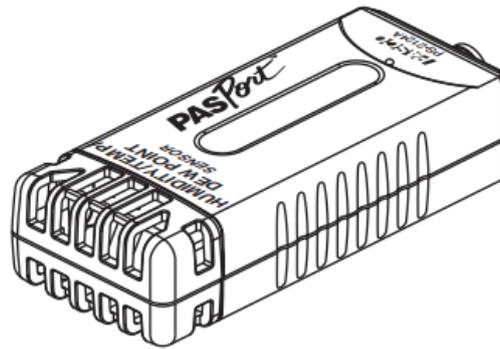


Figura 12. Sensor en cargado de medir la concentración de CO_2 de la serie PS-2124 y sus accesorios [48].

Sus especificaciones son:

Humedad

- Rango 0% a 100% (RH), 0 g / m³ a 50 g / m³ (AH).
- Precisión $\pm 2\%$ (RH), 10% de lectura (AH).
- Resolución 1% o mejor (RH), 0.1 g / m³ o mejor (AH).
- Repetibilidad 0.5% o mejor (RH), 0.1 g / m³ o mejor (AH).

Temperatura

- Rango -20 ° C a 55 ° C.
- Precisión 2 ± 0.5 ° C.
- Resolución 0.1 ° C o mejor.
- Repetibilidad 0.1 ° C o mejor.

4.2 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción es el fenómeno mediante el cual una onda electromagnética cumple la ley de Bragg y se desvía de su trayectoria cuando interactúa con muestras cuyas dimensiones son comparables a su longitud de onda, siendo el orden de la longitud de onda aproximadamente de 10^{-10} m. Para tener interferencia constructiva, debemos exigir que la diferencia de camino sea igual a un número entero de veces a la longitud de onda de haz ($n\lambda$), para ello se expresa ley de Bragg como:

$$2d\text{Sen}\theta = n\lambda$$

La técnica de DRX nos permite determinar estructuras cristalinas de los materiales los cual debe ser periódico [49].

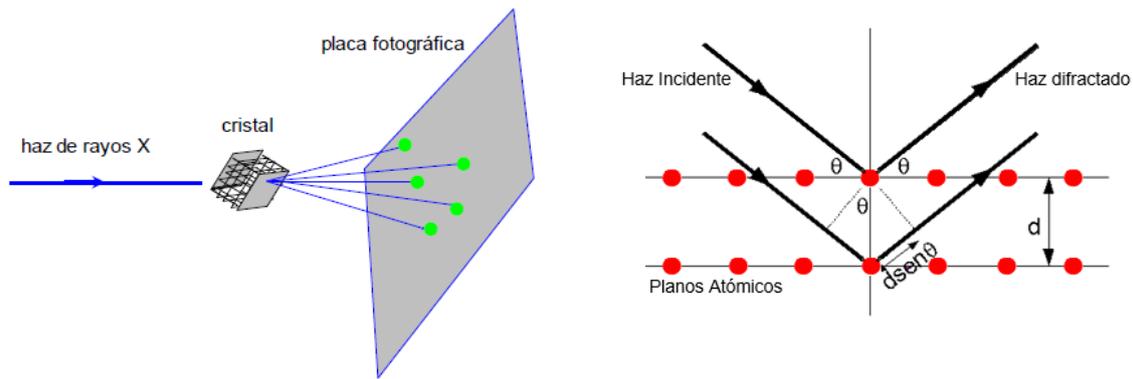


Figura 13. Cuando los frentes de onda emergentes (tras la reflexión) están en fase, se observará intensidad reflejada, cumpliendo la ley de Bragg. [49]

El campo eléctrico del haz de los rayos x incidente hace oscilar a los electrones de los átomos del material con los cuales interactúa. Los electrones con cargas eléctricas, que al ser sometidos a oscilaciones forzadas de la onda incidente (movimiento acelerado), emiten radiación electromagnética de la misma frecuencia de la onda incidente, transformándose en una fuente emisora de ondas secundarias que se propaga por el material o por fuera de él. Por ser ondas generadas en planos atómicos cercanos entre sí, estas ondas emitidas guardan una relación de fase entre sí y por consiguiente pueden superponerse generando un patrón de interferencia tridimensional al cual se le conoce como difractograma.

El equipo de Difracción de Rayos X que se usó fue de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería de la marca BRUKER D8 ADVANCE. Las condiciones que se trabajaron fueron:

- Voltaje 40 kV.
- Corriente 40 mA.
- Muestreo $0.03^\circ 2\theta$.
- Rango de medición $5-80^\circ 2\theta$.
- Radiación $\text{CuK}\alpha$ cuya longitud de onda fue $1,5418 \text{ \AA}$ de barrido tipo continuo.

4.3 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

El método que más se utiliza para caracterizar la morfología de los materiales es la microscopía electrónica de barrido, conocido por sus siglas inglesas SEM. Esta caracterización consta en incidir un haz de electrones que es enfocado con una pequeña sonda y explora la superficie de la muestra. Cuando interactúan los electrones primarios con la muestra, se genera electrones secundarios, estos últimos son recogidos como voltajes para ser interpretados como una imagen sobre la topografía de la superficie de la muestra. El diámetro de la sonda de electrones y el volumen de la interacción de las mismas dentro de la muestra limita la resolución de un SEM.

De todas las formas de radiación resultante de la interacción del haz incidente y la muestra, hay dos realmente fundamentales en el microscopio de barrido: los electrones secundarios y los electrones retrodispersados. Los primeros son electrones de baja energía menores a 50 eV, que resultan de la emisión por parte de los átomos constituyentes de la

muestra (los más cercanos a la superficie) debido a la colisión con el haz incidente. Por otro lado, los electrones retrodispersados son electrones del haz incidente que han interactuado (colisionado) con los átomos de la muestra y han sido reflejados [71]. La intensidad de ambas emisiones varía en función del ángulo que forma el haz incidente con la superficie del material, es decir depende de la topografía de la muestra.

La señal emitida por los electrones y radiación resultante al impacto son detectados por sensores y se amplifican para cada posición de la sonda. Las variaciones en la intensidad de la señal que se producen conforme la sonda barre la superficie de la muestra, se utilizan para variar la intensidad de la señal en un tubo de rayos catódicos que se desplaza en sincronía con la sonda. De esta forma existe una relación directa entre la posición del haz de electrones y la fluorescencia producida en el tubo de rayos catódicos. El resultado es una imagen topográfica muy ampliada de la muestra.

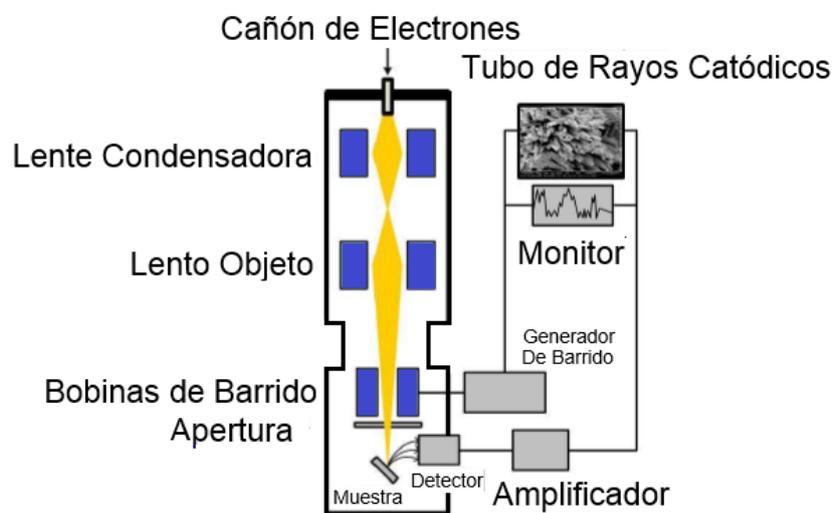


Figura 14. Diagrama esquemático del Microscopio Electrónico de Barrido [71].

Se muestra un esquema de un SEM. Donde un haz de electrones se suele generar por emisión termoiónica o por emisión de campo a partir de un cátodo de wolframio (W) o podría ser también por hexaboruro de lantano (LaB6). En la emisión termoiónica, el cátodo se calienta hasta una temperatura determinada T , para la cual los electrones adquieren una energía mayor al trabajo de extracción Φ del cátodo y, por tanto, pueden abandonar la superficie de éste. El proceso de calentamiento se suele llevar a cabo haciendo circular una corriente eléctrica intensa por el cátodo. Por otra parte, en la emisión de campo los electrones se generan a partir de la ionización del cátodo por la presencia de un campo electroestático. Los cátodos que se usan para este tipo de emisión suelen tener una forma puntiaguda, debido a que este tipo de configuración favorece el incremento de la intensidad del campo eléctrico en la punta del cátodo. [72]

El microscopio electrónico de barrido de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería usado fue el Hitachi SU8230.

4.4 Ensayos Mecánicos

Los ensayos mecánicos tienen un procedimiento y consideraciones, los cuales se detallan a continuación:

Cualquier material que es producido en laboratorios de investigación debe ser caracterizado mecánicamente para poder ser usados en aplicaciones futuras. El comportamiento mecánico es descrito por la compresión, tracción, ductilidad, rigidez, elasticidad y la dureza [29].

Si tiene una carga (fuerza aplicada en una muestra) que cambia en función del tiempo uniformemente a través de una sección o superficie de un material, este comportamiento mecánico puede ser analizado mediante una simple prueba de esfuerzo vs deformación. Existen tres formas de aplicar una carga, que son: carga tracción, compresión y cortante como se muestra en la Figura 21.

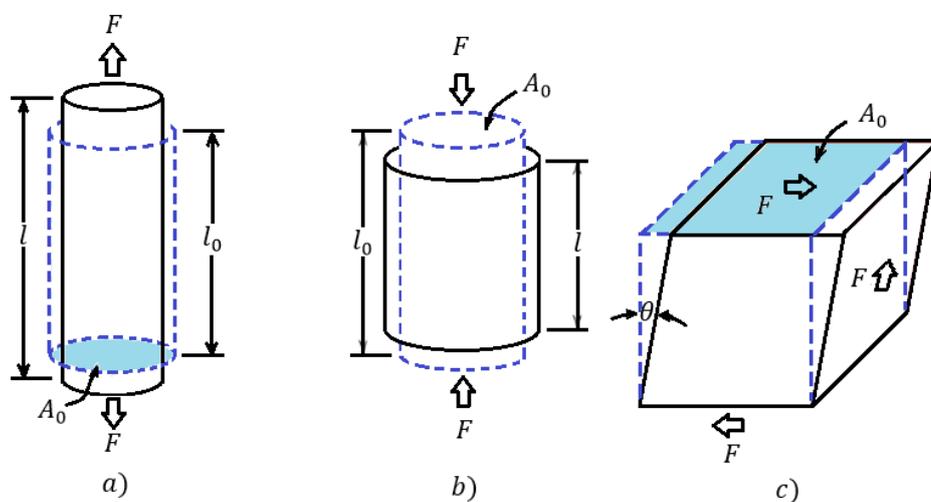


Figura 15. Diagramas de las pruebas de esfuerzo vs deformación. (a) Tracción, (b) Compresión, (c) cortante [29].

Para el caso de la carga de compresión el proceso que se realiza es aplicar fuerza en una cara de la probeta generando la compresión a lo largo de la dirección del esfuerzo, la fuerza aplicada en la cara debe realizarse hasta que la probeta sufra una rotura la cual se registrara como fuerza máxima de compresión. La norma peruana que regula este ensayo es NTP 334.051 2013 basada en la norma internación ASTM C109 para probetas de mortero con dimensiones de 5,0 cm x 5,0 cm x 5,0 cm.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Donde se usó la Máquina Uniaxial TONI TECHNIK (Figura 23). Este equipo es un sistema modular expandible para las pruebas automáticas, controladas por computadora, donde el rango de carga es 0 KN a 3 000 KN con su resolución de 0.1KN.

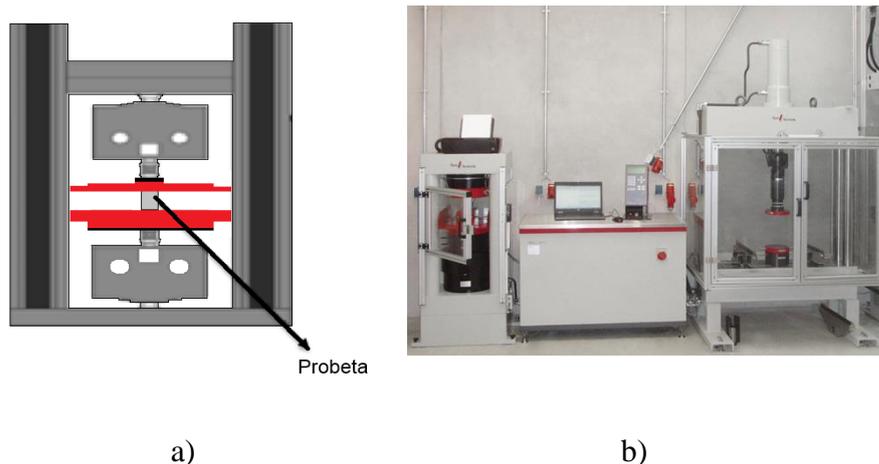


Figura 16. A) Diagrama una máquina Uniaxial. B) Máquina Uniaxial para compresión, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

El equipo proporciona valores de fuerza de máxima de compresión (F) que se conoce también como fuerza de rotura. Si se desea encontrar la presión de rotura (P) se debe de medir el área de la superficie de asiento (A_0) donde se aplica la fuerza de compresión y junto a la fuerza de rotura estarán relacionadas como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A_0}$$

Donde F es la carga de rotura, A_0 y P es la presión de rotura.

4.5 Resistividad Eléctrica

Las propiedades eléctricas en los materiales son descritas por la resistividad o conductividad. Todos los materiales según sus propiedades eléctricas se clasifican en conductores, semiconductores o aislantes; siendo estos dos últimos difíciles de cuantificar sus propiedades eléctricas ya que no son conductores, pero existen métodos los cuales pueden ayudarnos a caracterizarlos eléctricamente.

El Método de Wenner de los 4 electrodos es un método por el cual se puede cuantificar la resistividad en cualquier tipo de material sólido. Este método requiere que los electrodos de metal sean ubicados con igual separación en una línea recta, en la superficie de la muestra a una profundidad no mayor del 5% de la separación mínima de los electrodos como se muestra en la figura 17.

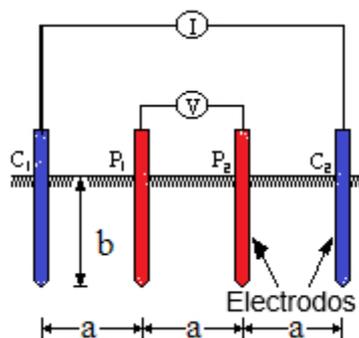


Figura 17. Diagrama del Método de Wenner.

El voltaje es impuesto entre los electrodos externos, causando un flujo de corriente y la caída de voltaje entre los electrodos que es medida usando un voltímetro. La resistencia puede ser medida directamente como:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Dónde: ρ = Resistividad del material.

R = Resistencia.

l = Es el espacio entre los electrodos internos.

S = El área de la sección transversal por donde se desplaza la corriente.

Para el caso donde en donde “ b ” es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos “ a ”. O sea, $a > 20b$, la siguiente fórmula se simplifica en:

$$\rho = 2\pi a R$$

Dónde: a = Separación de electrodos.

R = Resistencia.

ρ = Resistividad del material.

Si los electrodos externos no están espaciados al mismo intervalo de los electrodos internos la resistividad es entonces:

$$\rho = \frac{\pi b R}{1 - \frac{b}{a + b}}$$

Dónde: b = Espacio entre los electrodos externos.

a = Espacio entre los electrodos internos.

R = Resistencia.

La normal ASTM G-57-06 estandariza el método de Wenner para suelos no conductores, cimientos de concreto, entre otros.

La resistividad en las probetas de concreto se realizó en la Facultad de Ciencias con el equipo MILLER 400D. El equipo tiene cuatro salidas dos para la diferencia de voltaje y otros dos para la corriente eléctrica; estos van conectados a la muestra como se establece en la figura 18 y la medición en la resistencia tiene un rango que va desde 0.01Ω a $10M \Omega$ con una resolución de $\pm 0.01 \Omega$.

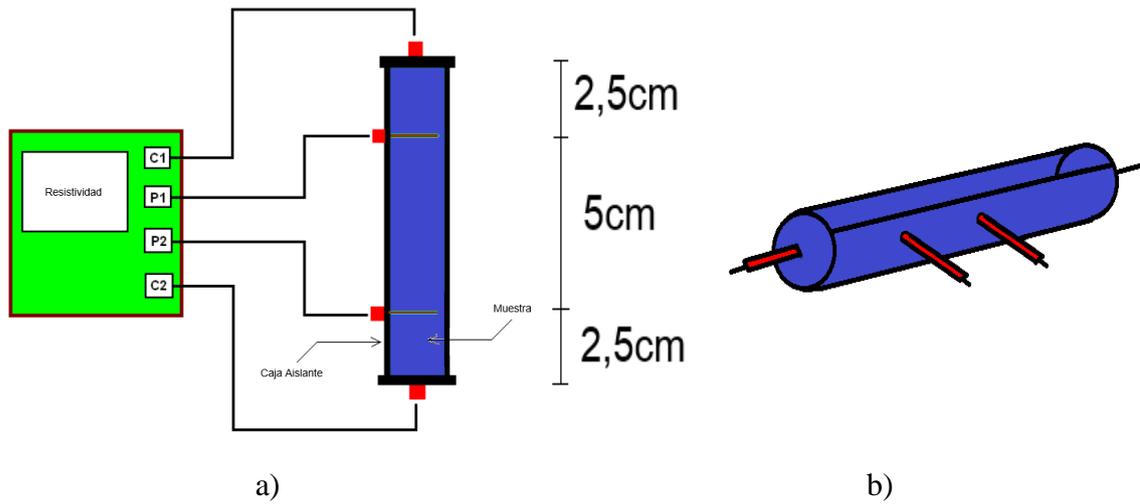
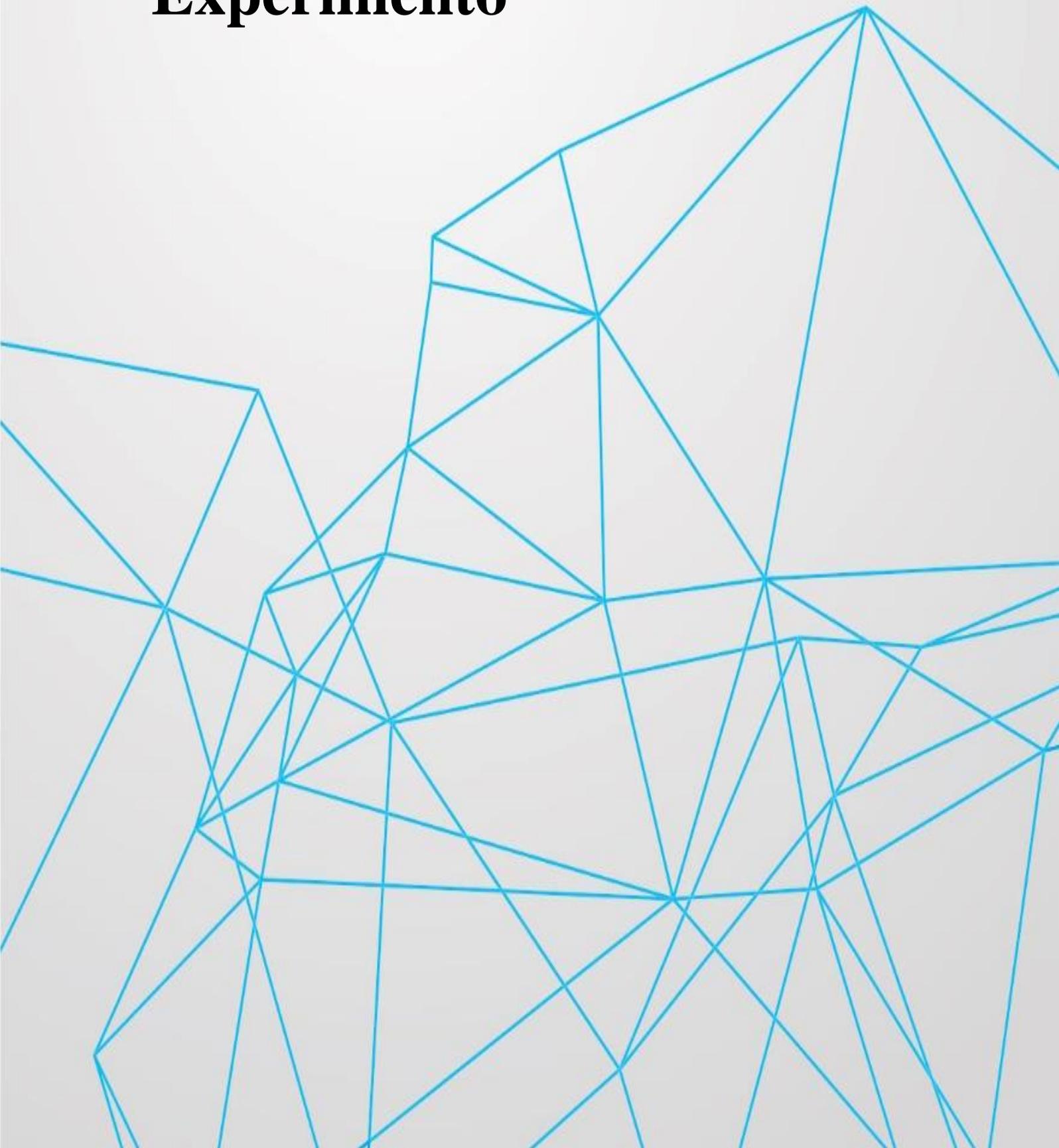


Figura 18. A) Se muestra el diagrama de conexión del equipo para la medición de la resistividad de la muestra en donde C1 y C2 es la salida de corriente y P1 y P2 la salida de la diferencia de voltaje. b) El cilindro que servirá como recipiente para la muestra donde sus dimensiones son 10cm de largo y 5cm de diámetro.

Capítulo 3: Desarrollo Experimento

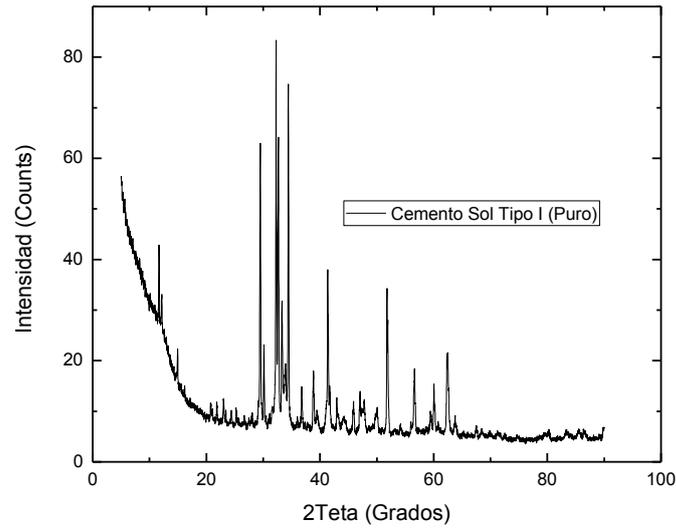


1. Materiales

1.1 Cemento

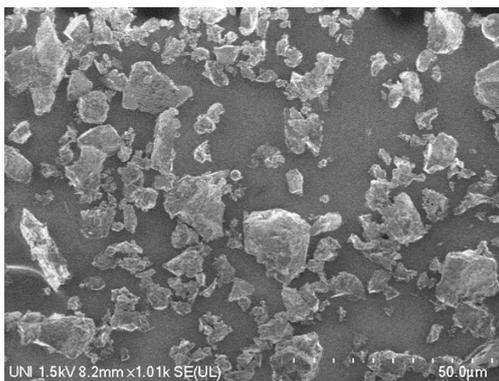
El tipo de cemento usado es cemento Andino tipo V, Apu tipo I, Nacional tipo I, Inka tipo I y Sol tipo I. Siendo este último cemento el más usado para todas las pruebas.

Para el cemento Sol puro tipo I se tienen los análisis de DRX y SEM, las cuales son:

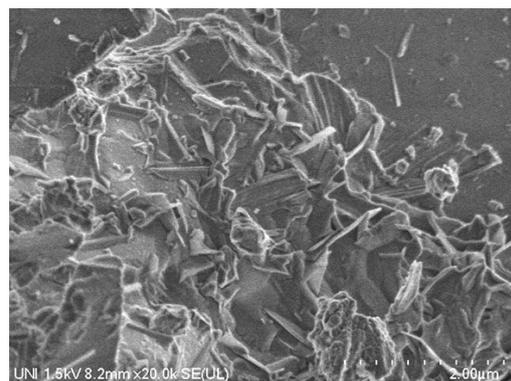


a)

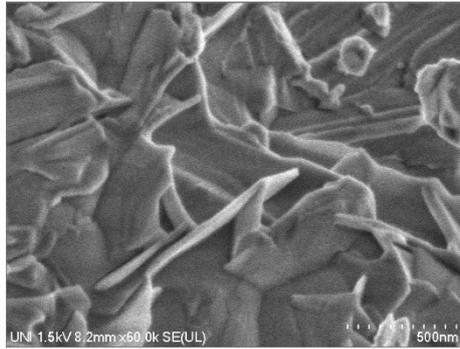
Gráfica 1. A) Gráfica de DRX del Cemento Sol Tipo I puro medidos por el equipo D8 ADVANCE.



a)



b)



c)

Gráfica 2. a) Gráfica SEM del Cemento Sol Tipo I puro a una escala de 50um. b) Gráfica SEM del Cemento Sol Tipo I puro a una escala de 2um. c) Gráfica SEM del Cemento Sol Tipo I puro a una escala de 500nm.

1.2 Arena

La arena gruesa de la marca UNICON fue elaborada mediante la norma ASTM C33 y fue usada en las probetas de mortero.

Se realizó un análisis granulométrico mediante la norma ASTM C136 por su gran importancia en la elaboración de morteros. El análisis consistió en:

Separar una porción 600g de arena de la muestra total la cual se llevó al horno a una temperatura de 110°C para ser secada. De acuerdo a la norma se tamizó la arena por las mallas: N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y fondo. Por último, se pesó lo obtenido en cada malla y se colocó en una tabla.

Tabla 2. Registro de pesos de la arena con la que se trabajó en los tamices.

Tamiz	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	% Parcial Retenido	(%) Retenida acumulado
N°4	4,76	20,4	3,4	3,4
N°8	2,38	65,5	10,92	14,32
N°16	1,19	140,9	23,48	37,8
N°30	0,595	180,3	30,05	67,85
N°50	0,297	118,8	19,80	87,65
N°100	0,149	51,7	8,62	96,27
Fondo		22,4	3,73	100
Total		600,0	100	

Para conocer el módulo granulométrico se sumó los porcentajes retenidos acumulados de la malla N°4 a N° 100 utilizando la fórmula:

$$\text{Módulo Granulométrico} = \frac{\sum \% \text{ Retenido acumulado}}{100}$$

En donde el resultado del módulo granulométrico de la arena gruesa de la marca UNICON es 3,07.

1.3 Aditivos

Los aditivos usados son: el aditivo mejorador de la trabajabilidad del concreto reductor de agua para lograr concretos fluidos de la marca Chema Plast y el aditivo incorporador de aire de la marca SIKA Aer.

1.4 Nanotubos de Carbono (CNT)

Los MWCNT fueron de la empresa Cheap Tubes. La ficha técnica de los CNT es:

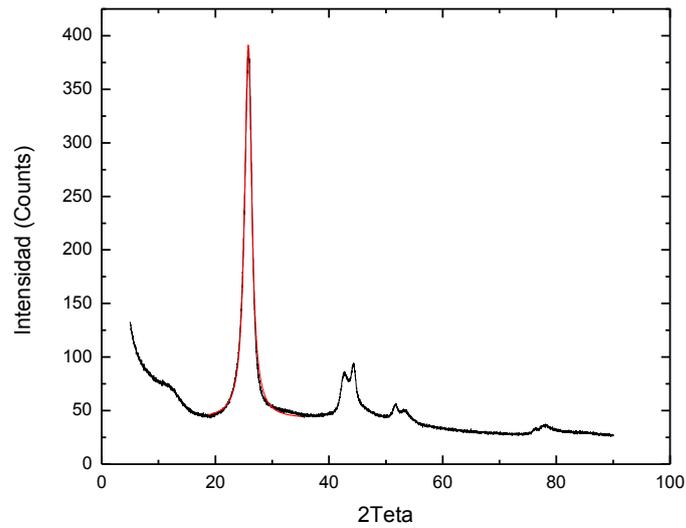
Propiedades y características Principales

- Diámetro Externo: 30 -50 nm
- Diámetro Interno: 5-10 nm
- Longitud: 10 – 20 um
- Pureza: 95wt%
- Ash: 1,5wt%
- Área superficial Específica: 60 m²/g
- Conductividad Eléctrica: 10⁴ s/m
- Densidad aparente: 2,1 g/ cm³

Información general

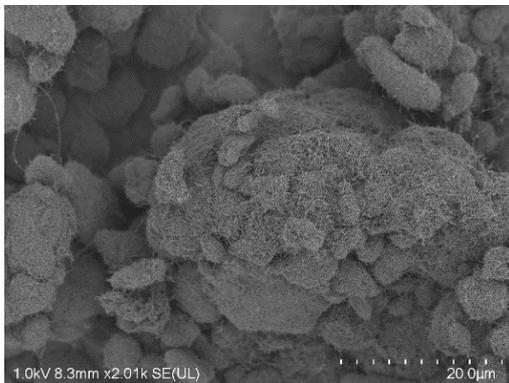
- Forma: polvos
- Olor: inodoro
- Punto de fusión / rango de fusión: estimado 3652-3697 ° C
- Punto de ebullición / campo de ebullición: no determinado
- Temperatura de sublimación / inicio: no determinado
- Punto de inflamación: no determinado
- Temperatura de ignición: no determinado
- Temperatura de descomposición: no determinado
- Peligro de explosión: el producto no presenta un riesgo de explosión
- Presión de vapor: no determinado
- Densidad: a 20 ° C -2,1 g / cm³
- Solubilidad / miscibilidad con Agua: insoluble

También, se tiene el análisis de DRX mediante el código de referencia JCPDS 751621 perteneciente a los CNT el cual indexa los picos formados en los ángulos 26° y 44°, siendo la estructura cristalina de esta hexagonal. Para el pico formado en el ángulo de 48° se usó el código de referencia JCPDS 870712 lo que permitió identificar pequeñas cantidades de níquel (5% aproximadamente) debido a que se utilizó óxido de níquel como catalizador en la síntesis de los CNT.

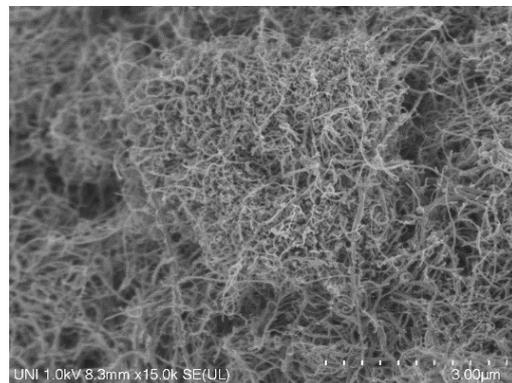


Gráfica 3. A) Gráfica de DRX de CNT puro medido por el equipo D8 ADVANCE, donde el pico dominante es 26° correspondiente a los CNT y los picos que se encontraron entre 44° y 52° son corresponden al níquel que fueron el catalizador para su síntesis [75].

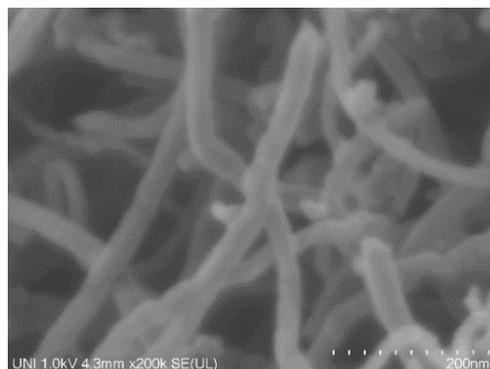
Por último, se tienen imágenes SEM. En ellas se puede confirmar lo expuesto en la ficha técnica de los CNT y se puede agregar que estos se encuentran aglomerados.



a)



b)



c)

Gráfica 4. a) Gráfica SEM de CNT puro a una escala de 20um. b) Gráfica SEM de CNT puro a una escala de 3um. c) Gráfica SEM de CNT puro a una escala de 200nm.

2. Procedimiento Experimental para la Fabricación y Caracterización de Propiedades en Probetas de Cemento

El presente capítulo se detalla el proceso de selección, clasificación y elaboración empleada para la fabricación de las probetas de pasta y morteros de cemento. Además, se presentan los fundamentos de cada una de las técnicas experimentales usadas para su estudio.

2.1 Fabricación de Probetas de Pasta de Cemento

Para la elaboración tradicional de probetas la selección del cemento era de manera empírica. Sin embargo, es necesario que las probetas se realicen mediante una norma y un procedimiento estandarizado.

Por otro lado, para la elaboración de las probetas con CNT no existe una norma ni un procedimiento estandarizado por este motivo existieron problemas tales como la forma correcta de agregar este compuesto a la mezcla, la disolución de este mismo en agua y las consecuencias que estos traerían en la mezcla del concreto. Por este motivo se planteó que los aditivos sean fijados por el porcentaje en masa del cemento, también se propuso que para mezclas de pasta de cemento la relación agua /cemento sea alta contrario a las pruebas de mortero que se eligió relaciones de agua /cemento bajas.

Por ello en esta sección se explica, de manera concisa, el proceso de elaboración de las probetas.

- **Preparación de las Probetas de Pasta de Cemento con Diversos Tipos de Cemento**

La fabricación de las probetas de pasta de cemento está realizada mediante la norma ASTM C305-14. Se explica a continuación la fabricación de las probetas variando el tipo de cemento y se presenta un diagrama en la figura 19:

- El tamiz con la malla N° 200 (0,075 mm de abertura) se usó para eliminar los grumos del cemento mediante el tamizado del mismo.
- Los equipos tales como la espátula y la mezcladora se humedecieron para luego instalar la mezcladora.
- Se vertió 260g de agua en la mezcladora y se agregó luego 650g de cemento, por probeta, para mezclar ambos por 30s en velocidad lenta. Se elaboraron tres muestras por cada tipo de cemento.
- Luego la mezcladora es apagada por 15s para luego subir la velocidad y mezclar la masa plástica con el equipo por 60s.

- Una vez se terminó el proceso anterior la mezcla paso a ser puesta en moldes cilíndricos de 10cmx5cm (donde 10cm es diámetro y 5cm es la altura).
- El tiempo de secado fue de 24h.
- Con una balanza electrónica se midieron la masa de cada probeta de pasta de cemento.
- Se repitió el mismo proceso explicado anteriormente para cada tipo de cemento (Sol tipo I, Apu tipo I, Nacional tipo I, Inka tipo I y Andino tipo V).

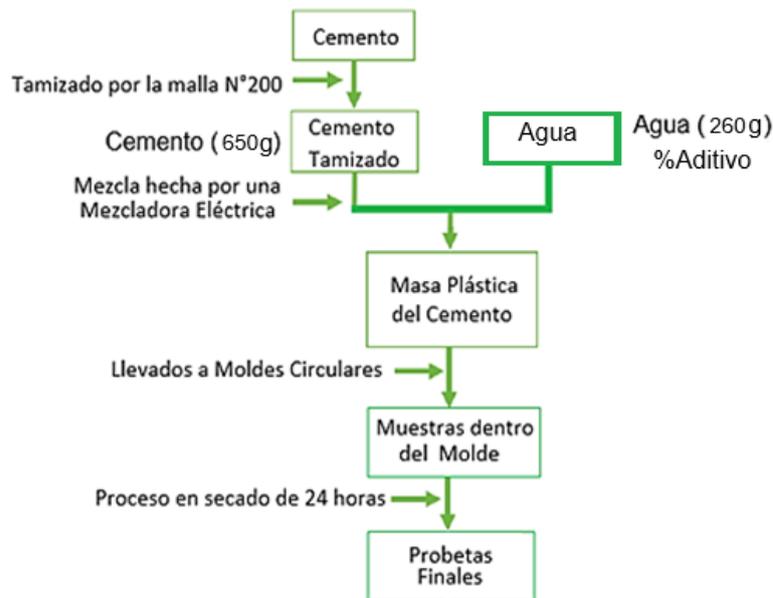


Figura 19. Diagrama de flujo para la preparación de probetas de pasta de cemento variando el tipo de cemento.

• Preparación de las Probetas de Pasta de Cemento Sol con Aditivos

La fabricación de las probetas de pasta de cemento está realizada mediante la norma ASTM C305-14. Se explica a continuación la fabricación de las probetas variando el tipo de aditivo y se presenta un diagrama en la figura 20:

- El tamiz con la malla N° 200 (0,075 mm de abertura) se usó para eliminar los grumos del cemento mediante el tamizado del mismo.
- Los equipos tales como la espátula y la mezcladora se humedecieron para luego instalar la mezcladora.
- Para el caso que se usó aditivo, este se mezcló con el agua hasta llevarla a una mezcla homogénea (aunque para los CNT no se logró el cometido ya que los CNT son hidrofóbicos y se encuentran aglomerados).
- Se vertió 260g de agua en la mezcladora y se agregó luego 650g de cemento, por probeta, para mezclar ambos por 30s en velocidad lenta. Se elaboraron tres muestras por cada tipo de aditivo.
- Luego la mezcladora es apagada por 15s para luego subir la velocidad y mezclar la masa plástica con el equipo por 60s.
- Una vez se terminó el proceso anterior la mezcla paso a ser puesta en moldes cilíndricos de 10cmx5cm.
- El tiempo de secado fue de 24h.
- Con una balanza electrónica se midieron las masas de cada probeta de pasta de cemento.

- El curado fue en un recipiente con agua y cal en una relación de 1L por 3g por 28 días.
- Pasado los 28 días se pasó a medir la masa de cada muestra de pasta de cemento en una balanza electrónica.
- Se repitió el mismo proceso explicado anteriormente para cada tipo de aditivo (sin aditivo, con aditivo de trabajabilidad, incorporador de aire y plastificante donde el porcentaje en masa de cemento que se usó por cada aditivo fue del 2%, también se usó como aditivo los CNT con porcentajes en masa de cemento de 0,25%, 0,5% y 1%).

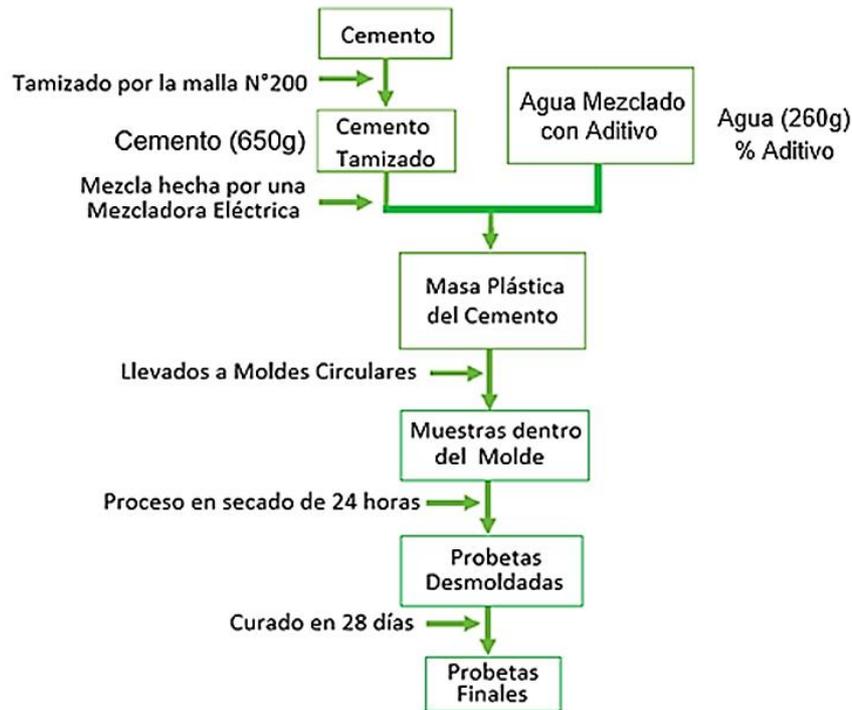


Figura 20. Diagrama de flujo para la preparación de probetas de pasta de cemento variando el tipo de aditivo.

• Preparación de las Probetas de Mortero con Cemento Sol y Aditivos

Se elaboró las probetas de mortero mediante la norma ASTM C109/C109M-2012 donde se requiere que el modulo granulométrico de la arena sea 3. Se explica a continuación la fabricación de las probetas variando el tipo de aditivo y se presenta un diagrama en la figura 21:

- El tamiz con la malla N° 200 (0,075 mm de abertura) se usó para eliminar los grumos del cemento mediante el tamizado del mismo.
- Los equipos tales como la espátula y la mezcladora se humedecieron para luego instalar la mezcladora.
- Para el caso que se usó aditivo, este se mezcló con el agua hasta llevarla a una mezcla homogénea (aunque para los CNT no se logró el cometido ya que los CNT son hidrofobicos y se encuentran aglomerados).
- Se vertió 140g de agua en la mezcladora y se agregó luego 260g de cemento, por tres probetas, para mezclar ambos por 30s en velocidad lenta. Durante dicho periodo se agregó lentamente 715g de arena sin detener el equipo. Se elaboraron tres muestras por cada tipo aditivo.

- Luego la mezcladora es apagada por 15s para luego subir la velocidad y mezclar la masa plástica con el equipo por 60s.
- Una vez se terminó el proceso anterior la mezcla paso a ser puesta en moldes cúbicos de 5cm de lado.
- El tiempo de secado fue de 24h.
- Con una balanza electrónica se midieron las masas de cada probeta de mortero.
- El curado fue en un recipiente con agua y cal en una relación de 1L por 3g por 28 días.
- Pasado los 28 días se pasó a medir la masa de cada muestra de mortero en una balanza electrónica.
- Se repitió el mismo proceso explicado anteriormente para cada tipo de aditivo (sin aditivo, con aditivo de trabajabilidad, incorporador de aire y plastificante donde el porcentaje en masa de cemento que se usó por cada aditivo fue del 2%, también se usó como aditivo los CNT con porcentajes en masa de cemento de 0,25%, 0,5% y 1%).

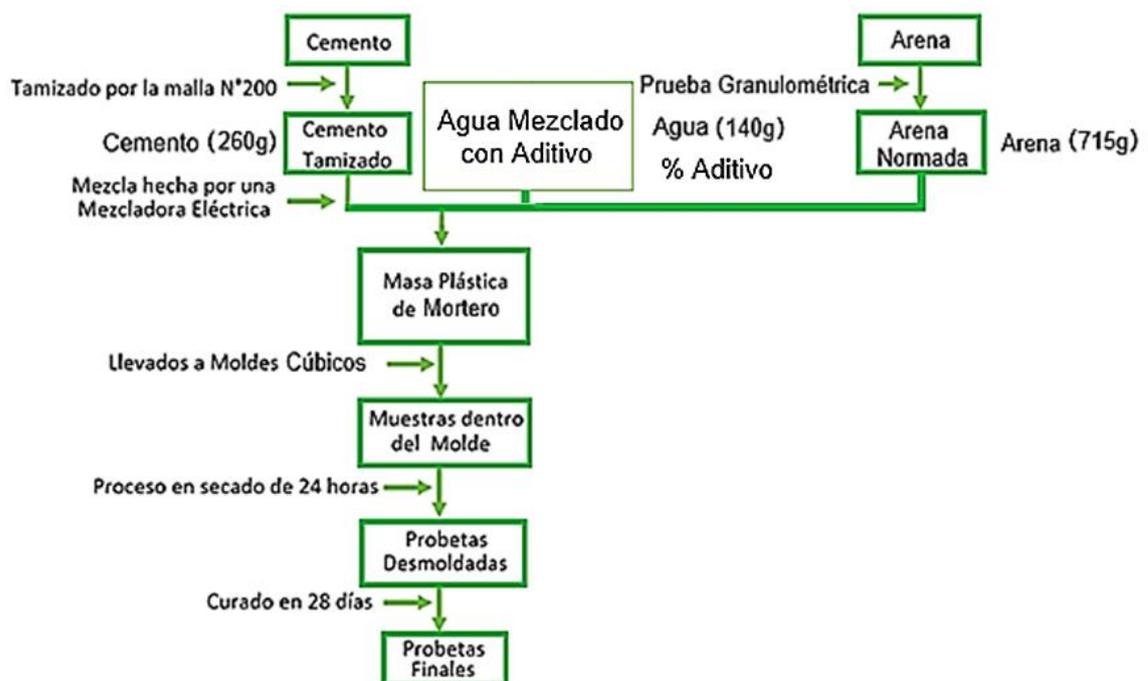


Figura 21. Diagrama de flujo para la preparación de probetas mortero variando el tipo de aditivo.

- **Preparación de las Probetas de Pasta de Cemento Sol con CNT para Pruebas de Resistividad**

La fabricación de las probetas de pasta de cemento está realizada mediante la norma ASTM C305-14. Se explica a continuación la fabricación de las probetas con y sin CNT y se presenta un diagrama en la figura 22:

- El tamiz con la malla N° 200 (0,075 mm de abertura) se usó para eliminar los grumos del cemento mediante el tamizado del mismo.
- Los equipos tales como la espátula y la mezcladora se humedecieron para luego instalar la mezcladora.

- Se vertió 60g de agua en la mezcladora y se agregó luego 150g de cemento, por probeta, para mezclar ambos por 30s en velocidad lenta. Se elaboró una muestra con CNT y sin CNT.
- Luego la mezcladora es apagada por 15s para luego subir la velocidad y mezclar la masa plástica con el equipo por 60s.
- Una vez se terminó el proceso anterior la mezcla paso a ser puesta en moldes cilíndricos de 5cmx10cm.
- El tiempo de secado fue de 24h.
- Se repitió el mismo proceso explicado anteriormente para cada tipo de muestra (sin aditivo y con CNT con un porcentaje en masa de cemento del 1%).

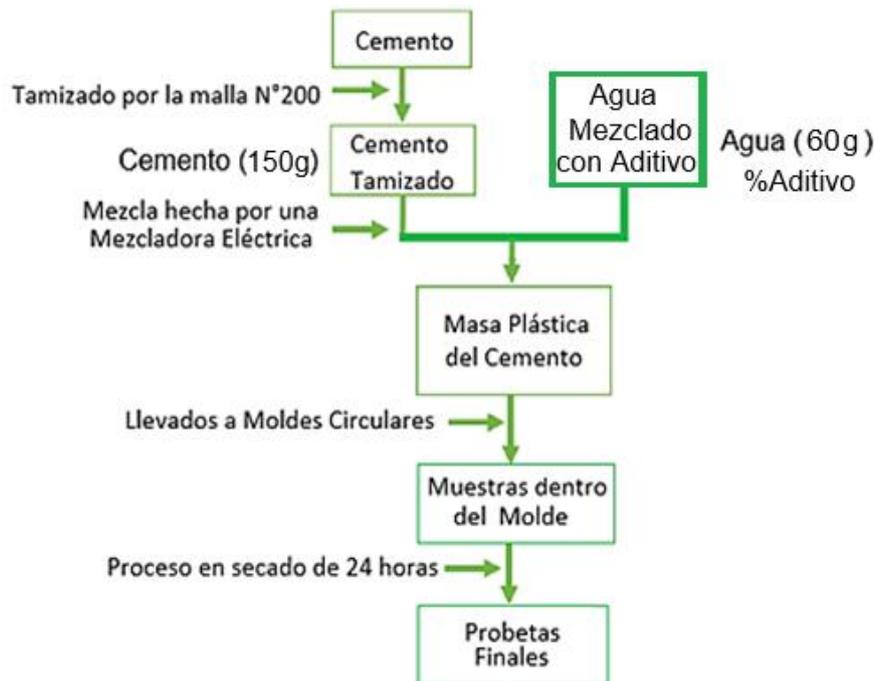


Figura 22. Diagrama de flujo para la preparación de probetas de pasta de cemento sin y con CNT al 1%.

2.2 Determinación de las Propiedades de las Probetas de Cemento

Obtención de la Absorción de CO₂

Antes de medir la absorción de CO₂, la temperatura y la humedad relativa se calibraron e instalaron los sensores en una cámara de cerrada. Una vez calibrado los sensores, se pasó a la toma de datos que se explica a continuación:

- **Probetas de Pasta de Cemento Variando el Tipo de Cemento**

- Luego de transcurrido el tiempo de curado se ingresaron las tres muestras del mismo tipo cemento en una cámara cerrada para luego ingresar CO₂ y realizar el proceso de carbonatación acelerada (los rango de concentración de CO₂ fueron de 80000ppm aproximadamente).
- Terminada el proceso de carbonatación se pasó a medir las masas de cada muestra de cemento con una balanza electrónica.

- Todo el proceso anteriormente explicado se realizó para cada tipo de cemento (Andino, Inka, Nacional, Sol y Apu).
- El proceso descrito se repitió luego de diez días de la primera toma de datos para cada tipo de cemento.
- Por último, se repitió el proceso luego de diez días después de la segunda toma de datos.

- **Probetas de Pasta de Cemento Sol con Diferentes Tipos de Aditivo**

- Luego de transcurrido el tiempo de curado se ingresaron las tres muestras del mismo tipo de aditivo en la cámara cerrada para luego ingresar CO_2 y realizar la carbonatación acelerada (los rango de concentración de CO_2 fueron de 80000ppm aproximadamente).
- Terminada el proceso de carbonatación se pasó a medir las masas de cada muestra de cemento con una balanza electronica.
- Todo el proceso anteriormente explicado se realizó para cada tipo de aditivo (trabajabilidad, incorporador de aire, plastificante, CNT al 1%).
- El proceso descrito se realizó para cada tipo de aditivo después de diez días después de la primera toma de datos para cada tipo de aditivo.

- **Probetas de Mortero con Cemento Sol con Diferentes Tipos de Aditivos**

- Luego de transcurrido el tiempo de curado se ingresaron las tres muestras de mortero con el mismo tipo de aditivo a la cámara cerrada para luego ingresar CO_2 y realizar la carbonatación acelerada (los rango de concentración de CO_2 fueron de 80000ppm aproximadamente).
- Terminada el proceso de carbonatación se pasó a medir las masas de cada muestra de cemento con una balanza digital.
- Todo el proceso anteriormente explicado se realizó para cada tipo de aditivo (trabajabilidad, incorporador de aire, plastificante, CNT al 0,25%, 0,5% y 1%).

Obtención de las Pruebas de Compresión

Las muestras fabricadas con la norma NTP 334.051-2013 se realizaron bajo las mismas proporciones y condiciones para compararlas en los ensayos mecánicos de compresión. La toma de datos de estos ensayos se hizo de la siguiente manera:

- Pasado el proceso de curado, las muestras pasaron a ser secadas por un día.
- Las tres muestras secas pasaron a ser pesadas por una balanza electronica y se midieron sus dimensiones con ayuda de un vernier.
- Con el equipo TONI TECHNIK se mido la fuerza de máxima de compresión que genera una rotura para cada una de las tres muestras.
- Todo el proceso anteriormente explicado se realizó para cada tipo de aditivo (sin aditivo y CNT al 0,25%, 0,5% y 1%).

Obtención de las Pruebas de Resistividad

Para medir la resistividad se usó la normal ASTM G57-06 la cual produjo que se prepararan muestras en moldes cilíndricos de 5cmx10cm. Con las probetas preparadas se pasó a toma de datos que se explica a continuación:

- Pasado las 24h del secado se conectó el equipo MILLER 400D con el molde cilíndrico. Este equipo tiene cuatro entradas de los cuales dos para la intensidad de corriente y dos entradas para la diferencia de potencial como se detalla en el método Wenner.
- Se realizó por día una medida de la resistividad en los 15 días posteriores al secado.
- Este proceso se realizó tanto para las muestras de pasta de cemento sol con CNT al 1% y sin CNT.

Capítulo 4: Resultados y Discusiones



A continuación, se mostrarán los distintos resultados obtenidos en los estudios de las propiedades mecánicas, morfológicas y estructurales de diferentes probetas de concreto que pasarán luego a ser analizadas y discutidas.

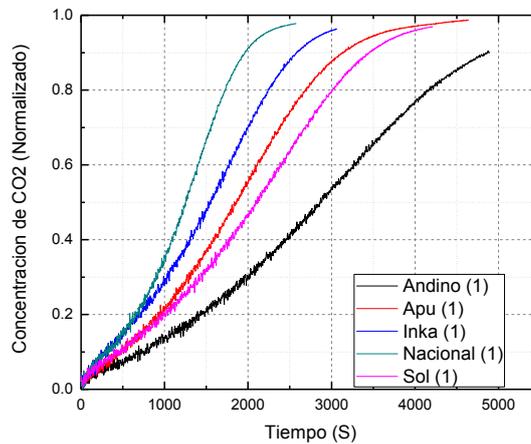
1. Datos Experimentales

1.1 Probetas de Pasta de Cemento Variando el Tipo de Cemento

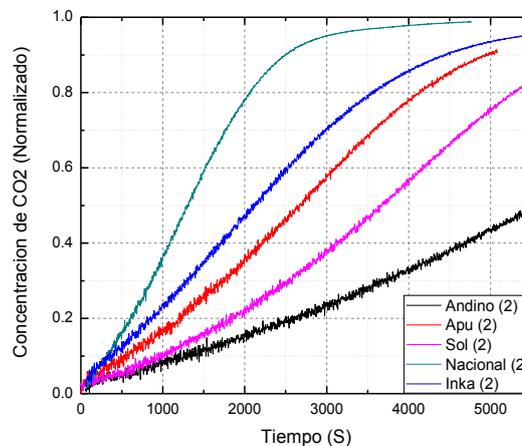
- Gráficas de Carbonatación

En esta sección se presenta las gráficas de la concentración de CO_2 para cada tipo de cemento carbonatado varias veces.

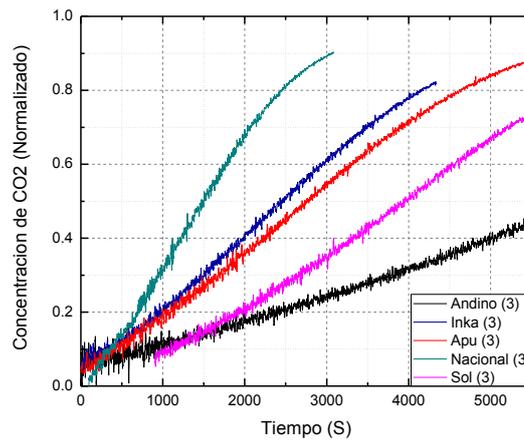
La primera medición se preparó como se menciona en el procedimiento, esta medición se realizó luego de diez días de preparada la muestra y las muestras no tuvieron un proceso de curado. Las gráficas obtenidas fueron:



Gráfica 5. Esta gráfica representa la primera toma de datos de la concentración de CO_2 vs tiempo.



Gráfica 6. Esta gráfica representa la segunda toma de datos de la concentración de CO_2 vs tiempo, con las probetas tomadas en la primera medición.

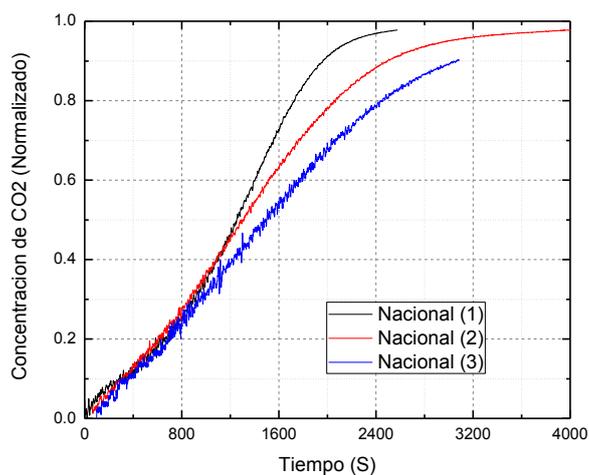


Gráfica 7. Esta gráfica representa la tercera toma de datos de la concentración de CO₂ vs tiempo, con las probetas tomadas en la primera medición.

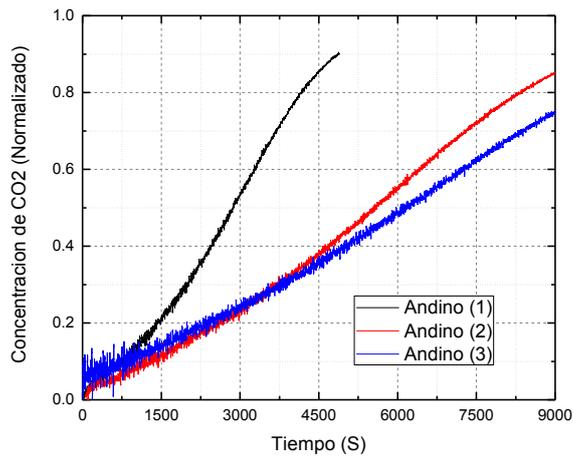
De los resultados de la carbonatación en probetas el cemento Andino tiene un mayor tiempo tanto en la primera, segunda y tercera etapa de la carbonatación. Esto ocurre porque el cemento es tipo V cuyas propiedades como resistencia al ataque de los sulfatos y cloruros, reduce fisuras, grietas en el concreto y tiene una mayor impermeabilidad; permitiendo que el CO₂ no ingrese con facilidad al concreto. Por otro lado el cemento Nacional presenta una mayor absorción de CO₂ en un menor tiempo a diferencia de las otras muestras, esto ocurre tanto en la primera, segunda y tercera carbonatación.

- **Gráficas Comparativas para los Procesos de Primera, Segunda y Tercera Carbonatación.**

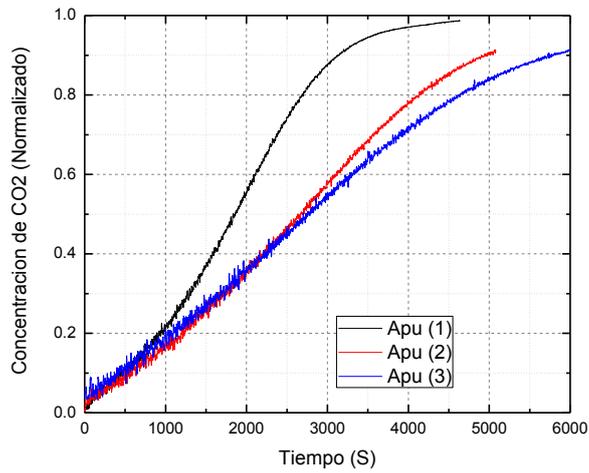
La comparación de los procesos de la primera, segunda y tercera carbonatación para cada tipo de cemento es expuesta en las siguientes gráficas:



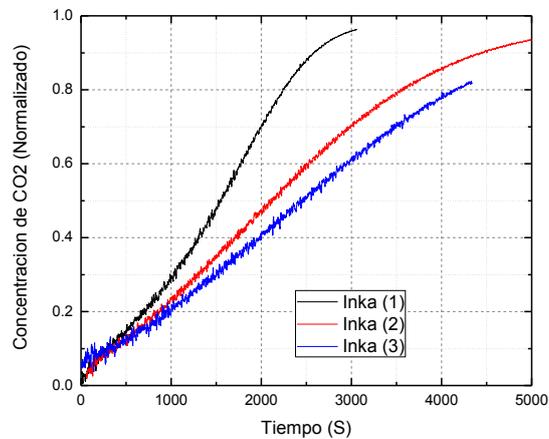
Gráfica 8. Gráfica de probetas de Pasta de Cemento Nacional en los diferentes procesos de primera (1), segunda (2) y tercera (3) carbonatación.



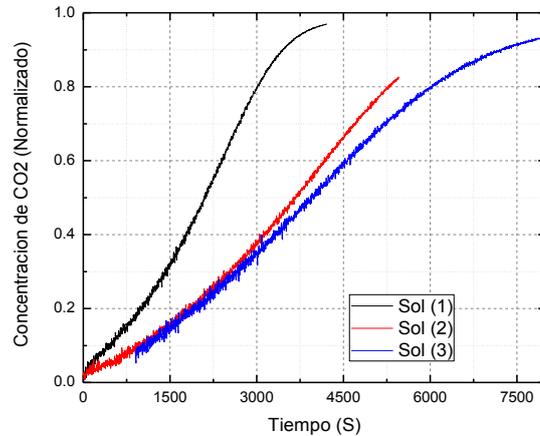
Gráfica 9. Gráfica de probetas de Pasta de Cemento Andino en los diferentes procesos de primera (1), segunda (2) y tercera (3) carbonatación.



Gráfica 10. Gráfica de probetas de Pasta de Cemento Apu en los diferentes procesos de primera (1), segunda (2) y tercera (3) carbonatación



Gráfica 11. Gráfica de probetas de Pasta de Cemento Inka en los diferentes procesos de primera (1), segunda (2) y tercera (3) carbonatación.

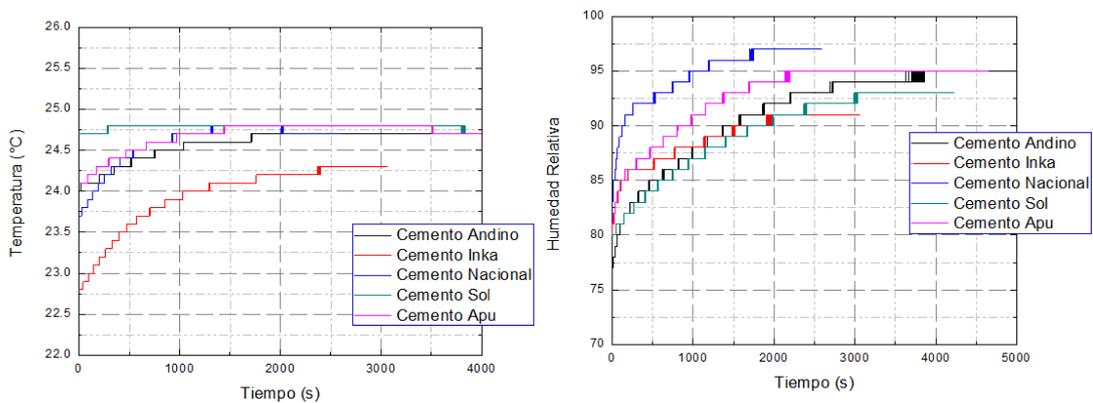


Gráfica 12. Gráfica de probetas de Pasta de Cemento Sol en los diferentes procesos de primera (1), segunda (2) y tercera (3) carbonatación.

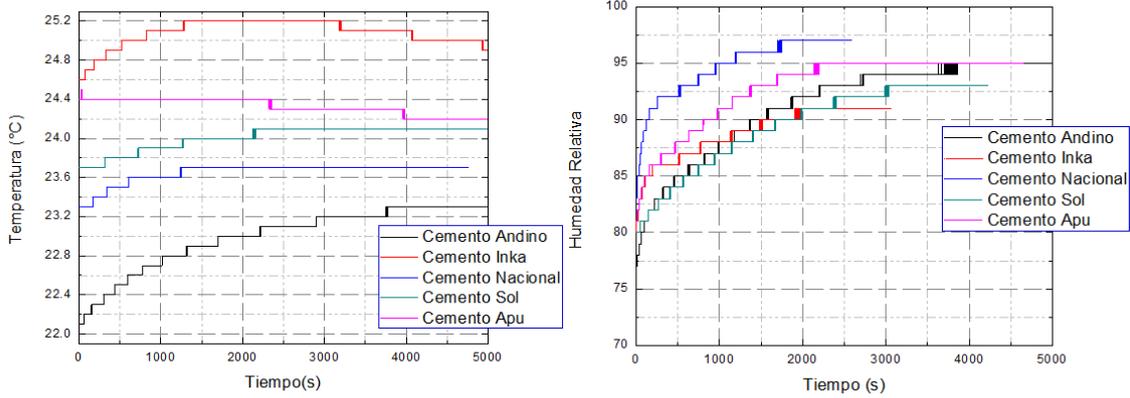
Al comparar los procesos de carbonatación se evidencia una relación directa entre el tiempo de absorción del CO₂ con el número de carbonataciones que tienen las probetas para cada tipo de cemento. Lo ocurrido evidencia un aumento de la saturación de poros a medida que aumenta la concentración de CO₂ al interior de las probetas.

- **Gráficas de Temperatura y Humedad Relativa en el Proceso de Carbonatación por cada tipo de Cemento**

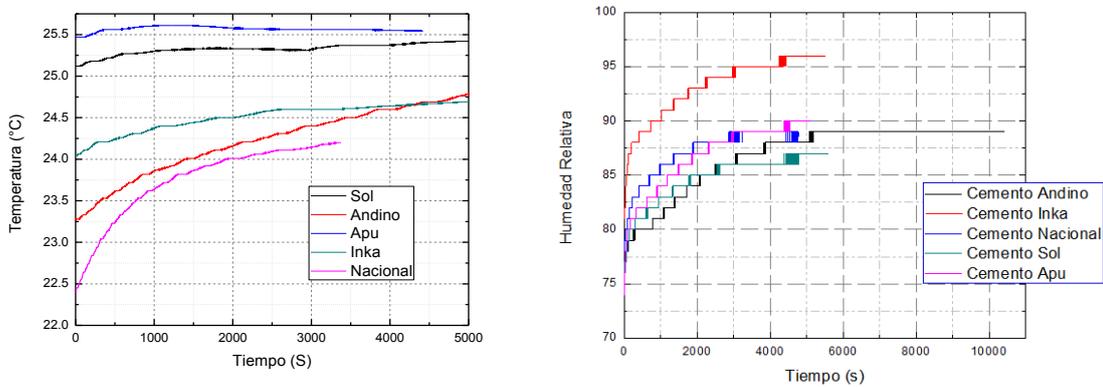
Se expone el comportamiento de la temperatura y humedad relativa en el proceso de la primera, segunda y tercera carbonatación a continuación:



Gráfica 13. Las gráficas corresponden a la primera carbonatación donde el de la izquierda representa la toma de datos de la temperatura vs tiempo, mientras que el de la derecha representa HR vs tiempo.



Gráfica 14. Las gráficas corresponden a la segunda carbonatación donde el de la izquierda representa la toma de datos de la temperatura vs tiempo, mientras que el de la derecha representa HR vs tiempo.



Gráfica 15. Las gráficas corresponden a la tercera carbonatación donde el de la izquierda representa la toma de datos de la temperatura vs tiempo, mientras que el de la derecha representa HR vs tiempo.

Lo expuesto muestra un aumento de la temperatura ocurrido por la liberación de calor que genera la reacción de carbonatación (reacción exotérmica). Por parte de la humedad relativa el aumento ocurre por la liberación de agua en forma de vapor que genera la reacción de carbonatación.

- **Datos de Masa por cada tipo de Cemento en cada Proceso de Carbonatación**

Las masas correspondientes de pasta de cemento con diferentes tipos de cemento se presentan a continuación y corresponden a las muestras de las gráficas 5,6 y 7 antes y después de cada proceso de carbonatación (estas muestras no presentaron curado por ello no se menciona la medición de sus masas en este proceso).

Se comenzó a medir las masas luego del secado de las probetas y termino dicha medida en el proceso de la tercera carbonatación, los valores correspondientes de las probetas 1, 2 y 3 son:

4. Resultados y Discusiones

Tabla 3. Se presentan las masas de cada probeta variando el tipo de cemento luego del secado.

	Inka (Kg)	Nacional (Kg)	Apu (Kg)	Sol (Kg)	Andino (Kg)
1°	0,646	0,559	0,581	0,583	0,553
2°	0,604	0,656	0,660	0,641	0,639
3°	0,658	0,685	0,640	0,675	0,623

Tabla 4. Resultados de las masas de cada probeta variando el tipo de cemento luego de la primera carbonatación.

	Inka (Kg)	Nacional (Kg)	Apu (Kg)	Sol (Kg)	Andino (Kg)
1°	0,647	0,561	0,582	0,584	0,554
2°	0,605	0,657	0,661	0,642	0,640
3°	0,659	0,686	0,641	0,676	0,624

Tabla 5. Resultados de las masas de cada probeta variando el tipo de cemento luego de la segunda carbonatación.

	Inka (Kg)	Nacional (Kg)	Apu (Kg)	Sol (Kg)	Andino (Kg)
1°	0,648	0,562	0,583	0,585	0,555
2°	0,606	0,658	0,662	0,643	0,641
3°	0,660	0,687	0,642	0,677	0,625

Tabla 6. Resultados de las masas de cada probeta variando el tipo de cemento luego de la tercera carbonatación.

	Inka (Kg)	Nacional (Kg)	Apu (Kg)	Sol (Kg)	Andino (Kg)
1°	0,649	0,563	0,584	0,586	0,556
2°	0,607	0,659	0,663	0,644	0,642
3°	0,661	0,688	0,643	0,678	0,626

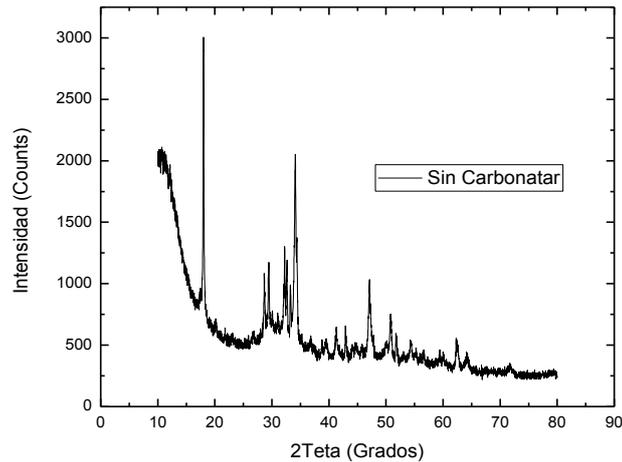
Las masas de cada probeta aumentan en un 1g por cada proceso de carbonatación la razón de esto se explica analizando la reacción de la carbonatación que nos indica que a pesar de perder masa por la libera de agua la cantidad de masa de CO₂ que gana en las reacciones es mayor.

La incertidumbre en la medición de las masas para cada tipo de probeta es de $\pm 0,001$ kg.

- **Gráficas de DRX de Probetas de Cemento Inka sin y con Carbonatación**

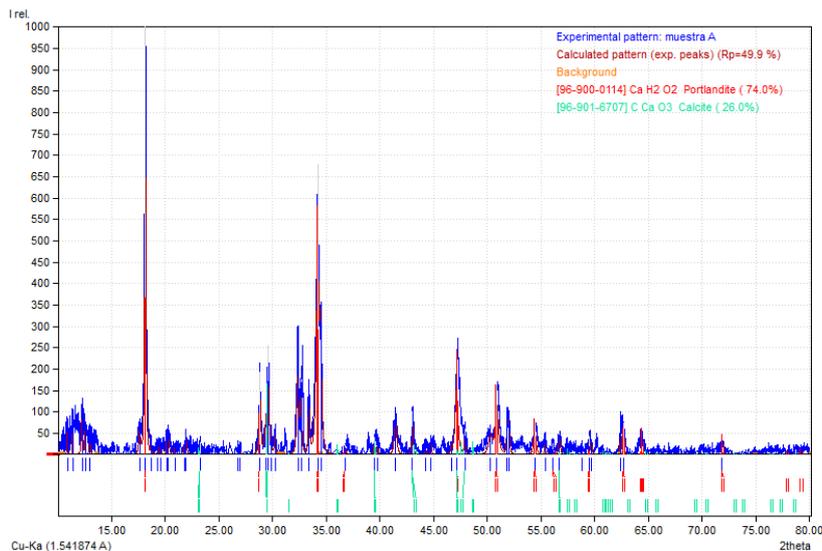
Las gráficas de DRX de las probetas de pasta de cemento Inka antes de carbonatar y luego del proceso de la tercera carbonatación son presentadas a continuación:

La primera medición fue tomada luego del proceso de secado. La gráfica obtenida fue:



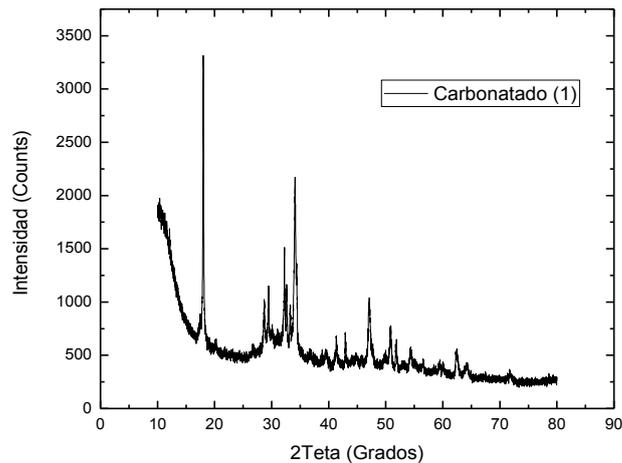
Gráfica 16. Gráfica de DRX del cemento Inka en pasta de cemento en el proceso después del curado.

La gráfica de DRX del cemento Inka sin carbonatar se normalizo y se indexo mediante las tablas proporcionadas por Crystallography Open Database. La gráfica es:



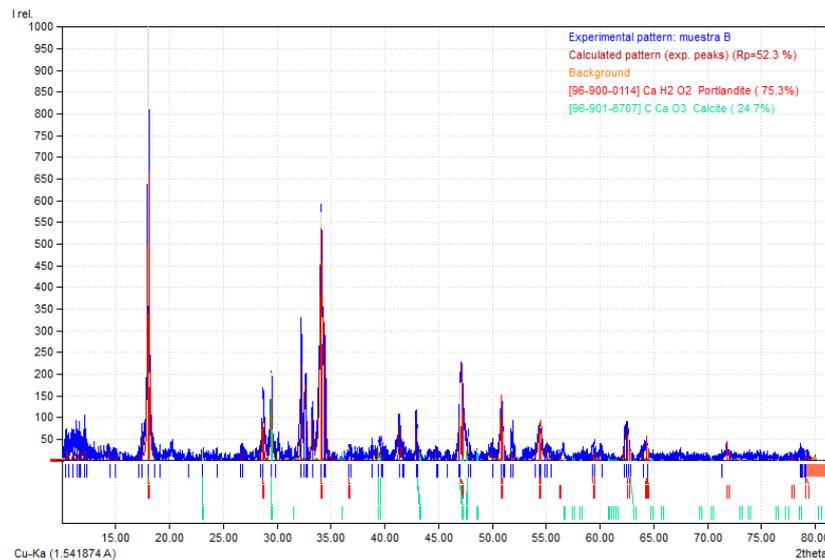
Gráfica 17. La gráfica corresponde a la muestra de pasta de cemento Inka antes de la carbonatación.

Para la segunda medición se tuvo que esperar el término de la tercera carbonatación donde su gráfica obtenida fue:



Gráfica 18. Gráfica de DRX del cemento Inka en pasta de cemento después de la tercera carbonatación.

La gráfica de DRX del cemento Inka carbonatada se normalizo y se indexo mediante las tablas proporcionadas por Crystallography Open Database. La gráfica es:



Gráfica 19. La gráfica corresponde a la muestra de pasta de cemento Inka después de la carbonatación.

De las gráficas 17 y 19 se encuentran parámetros como las dimensiones de la celda unitaria, sistema cristalino y densidad. Los valores de estos parámetros se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados de los parámetros cristalinos y la red cristalina para la portlandita y la calcita.

4. Resultados y Discusiones

	Portlandita					Calcita				
	Celda unitaria "a" (Å)	Celda unitaria "c" (Å)	I/Ic	Calc. Densidad g/cm ³	Sistema cristalino	Celda unitaria "a" (Å)	Celda unitaria "c" (Å)	I/Ic	Calc. Densidad g/cm ³	Sistema cristalino
C. Inka sin carbonatar	3.5844	4.8962	3.53	2.258	trigonal (hexagonal axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)
C. Inka carbonado (1)	3.5844	4.8962	3.53	2.258	trigonal (hexagonal axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)

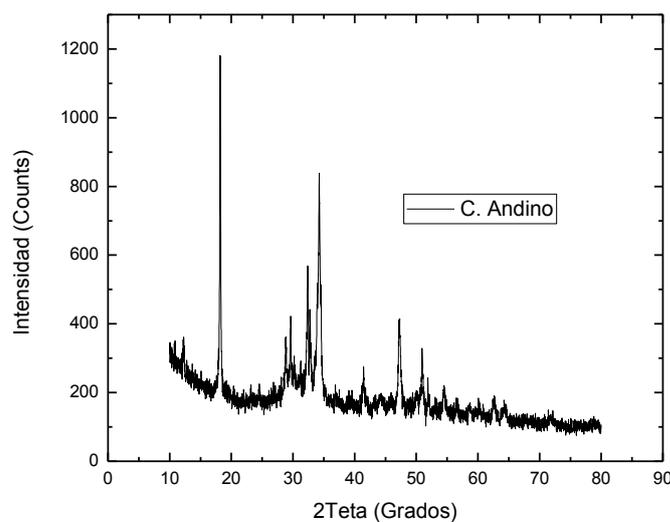
Las gráficas de DRX indexadas mostraron dos compuestos principales en las pasta de cemento las cuales son la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) cuyos picos principales en 2θ son $18,0^\circ$, $28,7^\circ$, $34,1^\circ$, $47,1^\circ$, $50,8^\circ$ y $54,4^\circ$; y la calcita (CaCO_3) donde los picos principales en 2θ son $23,1^\circ$, $29,5^\circ$, $36,0^\circ$, $39,4^\circ$, $43,2^\circ$, $47,6^\circ$, $48,6^\circ$ y $57,4^\circ$.

La comparación de las gráficas nos permite relacionar la disminución de la altura de picos de la portlandita con el aumento de absorción de CO_2 en las muestras, esto ocurre ya que las reacciones presentes en la carbonatación implican la conversión de portlandita en calcita.

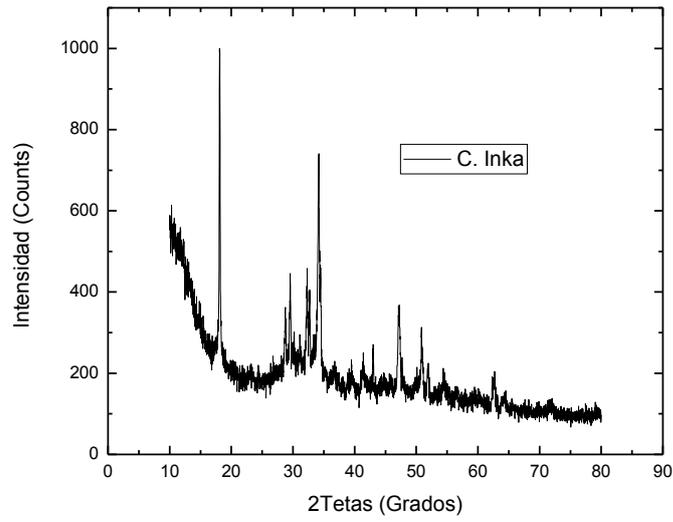
Con el proceso de indexación encontramos las fases de la portlandita y calcita las cuales son hexagonal.

- **Gráficas de DRX para cada tipo de Cemento**

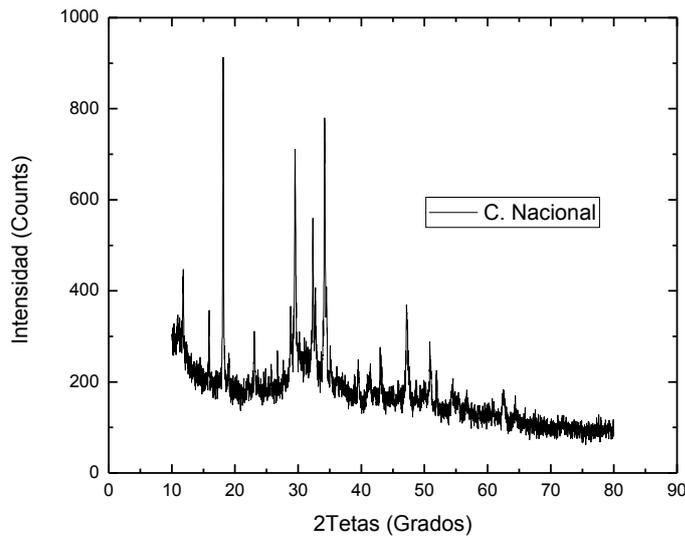
Las gráficas de DRX de las probetas de pasta de cemento variando el tipo de cemento luego del proceso de la tercera carbonatación son presentadas a continuación:



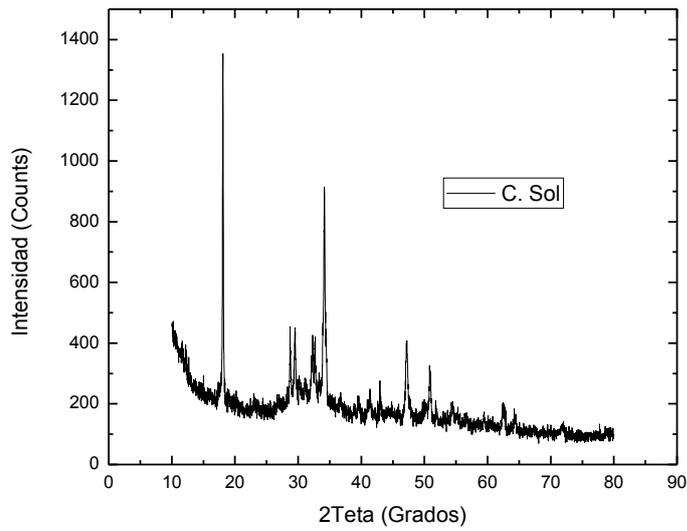
Gráfica 20. Gráfica de DRX del cemento Andino en pasta de cemento después de la tercera carbonatación.



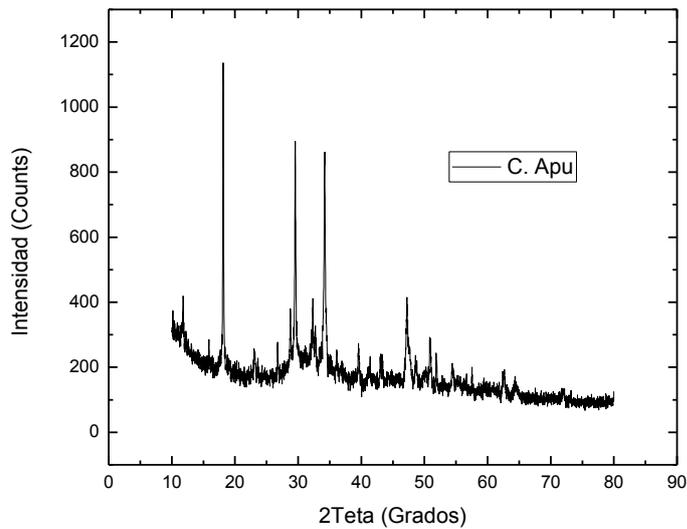
Gráfica 21. Gráfica de DRX del cemento Inka en pasta de cemento después de la tercera carbonatación.



Gráfica 22. Gráfica de DRX del cemento Nacional en pasta de cemento después de la tercera carbonatación.

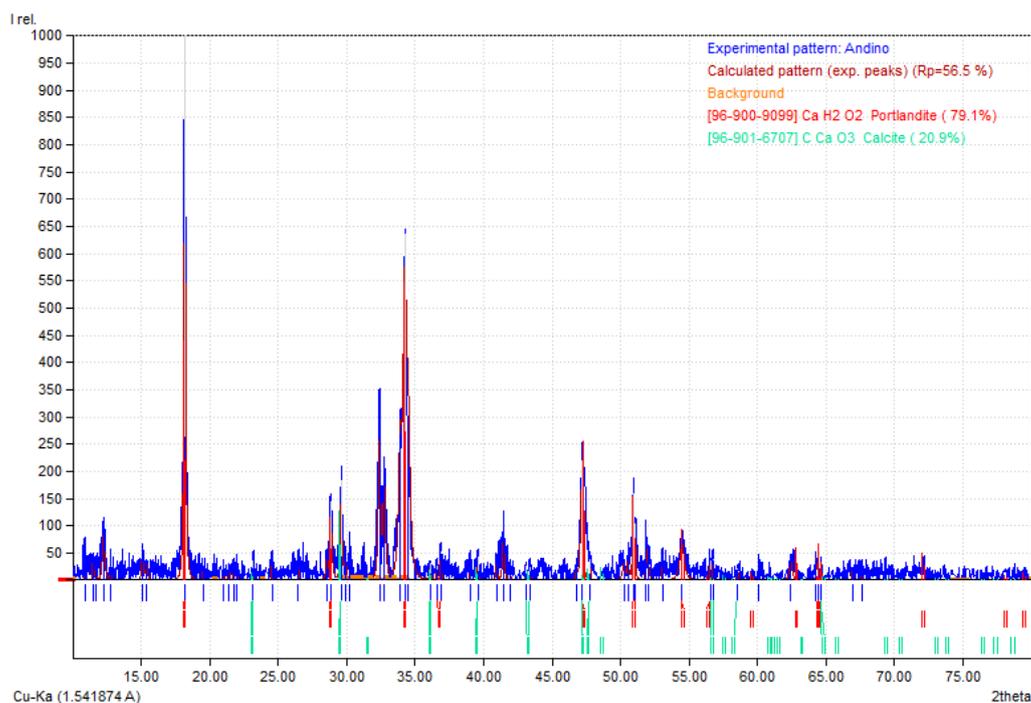


Gráfica 23. Gráfica de DRX del cemento Sol en Pasta de Cemento después de la tercera carbonatación.



Gráfica 24. Gráfica de DRX del cemento Apu en pasta de cemento después de la tercera carbonatación.

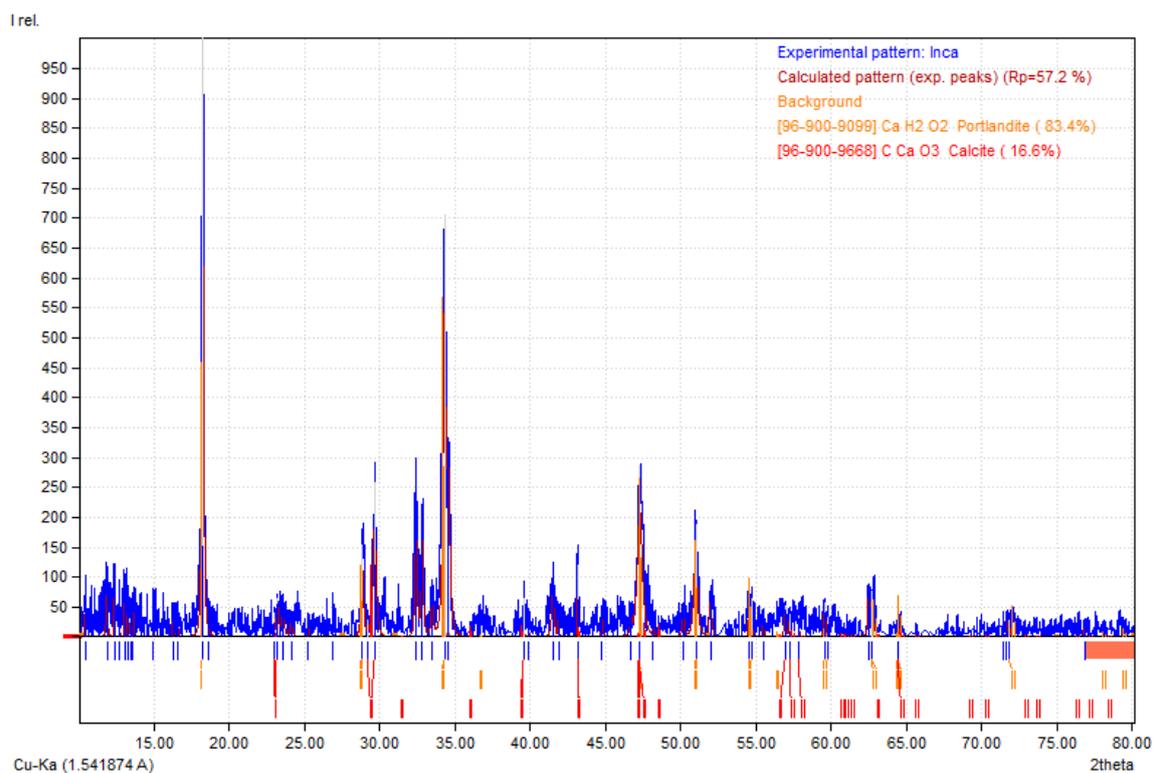
Las gráficas de DRX de las probetas de pasta cemento carbonatadas se normalizo y se indexo mediante las tablas proporcionadas por Crystallography Open Database. Las gráficas son:



Gráfica 25. La gráfica corresponde a la muestra de pasta de cemento Andino después de la carbonatación.

Tabla 8. Resultados de picos principales en 2θ , distancias interplanares e índices de Miller para la Portlandita y Calcita del cemento Andino.

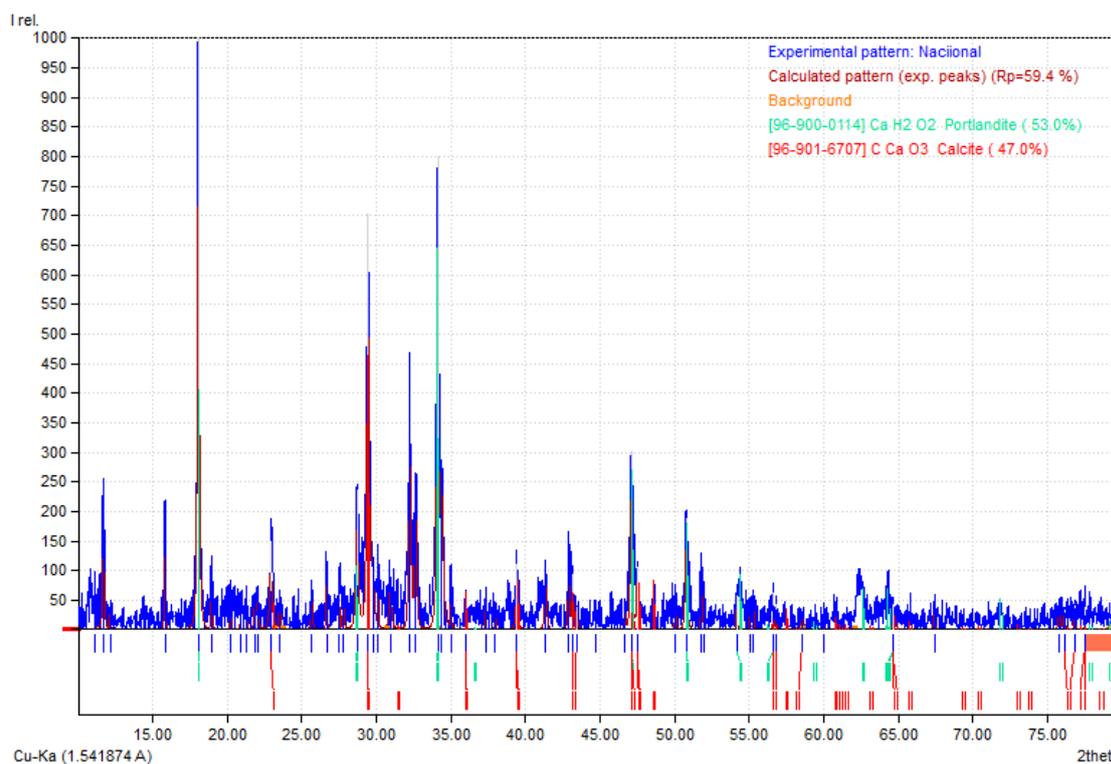
Portlandita	2theta [°]	d [Å]	h k l	Calcita	2theta [°]	d [Å]	h k l
1	18,2	4,8753	0 0 1	1	23,15	3,8428	1 0 2
2	28,53	3,1289	1 0 0	2	29,61	3,0168	1 0 4
3	28,86	3,0941	1 0 0	3	36,12	2,4871	1 1 0
4	34,26	2,6174	1 0 1	4	39,6	2,2758	1 1 3
5	36,61	2,4549	0 0 2	5	43,09	2,0994	2 0 2
6	47,17	1,9269	1 0 2	6	43,42	2,0839	2 0 2
7	50,96	1,7922	1 1 0	7	47,17	1,9269	2 0 4
8	54,47	1,6845	1 1 1	8	47,8	1,903	1 0 8
9	56,55	1,6274	0 0 3	9	56,55	1,6274	2 1 1
10	62,44	1,4874	2 0 1	10	56,74	1,6224	2 1 2
11	64,28	1,4492	1 1 2	11	58,53	1,577	1 0 10
12	64,39	1,4469	1 0 3	12	64,63	1,4421	3 0 0



Gráfica 26. La gráfica corresponde a la muestra de pasta de cemento Inka después de la carbonatación.

Tabla 9. Resultados de picos principales en 2θ , distancias interplanares e índices de Miller para la Portlandita y Calcita del cemento Inka.

Portlandita	2theta [°]	d [Å]	h k l	Calcita	2theta [°]	d [Å]	h k l
1	18,23	4,8669	0 0 1	1	23	3,8665	1 0 2
2	28,83	3,0968	1 0 0	2	23,2	3,8344	1 0 2
3	34,28	2,6156	1 0 1	3	29,22	3,0564	1 0 4
4	47,27	1,9229	1 0 2	4	29,66	3,0122	1 0 4
5	50,98	1,7914	1 1 0	5	39,58	2,2771	1 1 3
6	54,52	1,6833	1 1 1	6	43,13	2,0976	2 0 2
7	59,56	1,5523	2 0 0	7	47,27	1,9229	2 0 4
8	62,66	1,4828	2 0 1	8	56,91	1,618	2 1 1
9	64,44	1,4458	1 0 3	9	57,22	1,61	2 1 2
10	71,81	1,3146	2 0 2	10	57,86	1,5937	2 1 2
				11	64,44	1,4458	3 0 0
				12	76,82	1,2408	2 2 0

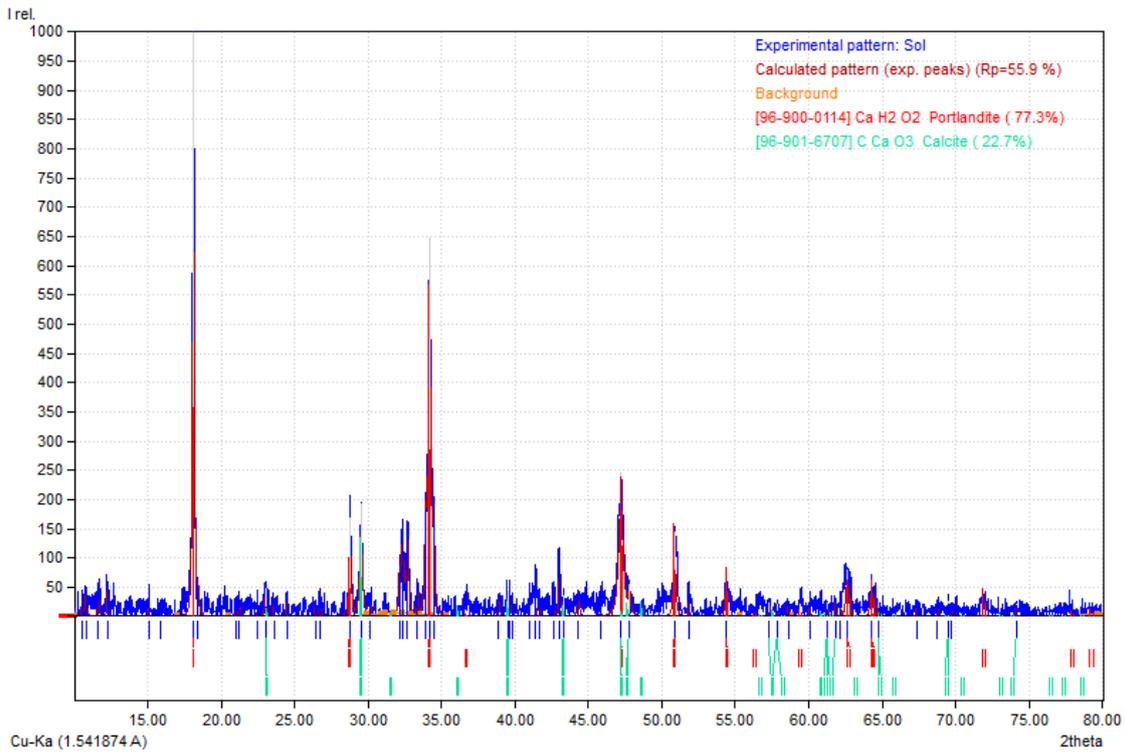


Gráfica 27. La gráfica corresponde a la muestra de pasta de cemento Nacional después de la carbonatación.

Tabla 10. Resultados de picos principales en 2θ , distancias interplanares e índices de Miller para la Portlandita y Calcita del cemento Nacional.

Portlandita	2theta [°]	d [Å]	h k l	Calcita	2theta [°]	d [Å]	h k l
1	18,06	4,9129	0 0 1	1	22,93	3,8788	1 0 2
2	28,71	3,1096	1 0 0	2	29,44	3,034	1 0 4
3	34,11	2,6282	1 0 1	3	36,02	2,4932	1 1 0
4	47,1	1,9294	1 0 2	4	39,43	2,2853	1 1 3
5	50,78	1,7979	1 1 0	5	43,17	2,0955	2 0 2
6	54,18	1,6929	1 1 1	6	43,42	2,0843	2 0 2
7	56,61	1,626	0 0 3	7	47,1	1,9294	2 0 4
8	64,68	1,4412	1 0 3	8	47,49	1,9144	1 0 8
				9	56,61	1,626	2 1 1
				10	56,8	1,6208	2 1 1
				11	58,58	1,5758	1 0 10
				12	64,68	1,4412	3 0 0

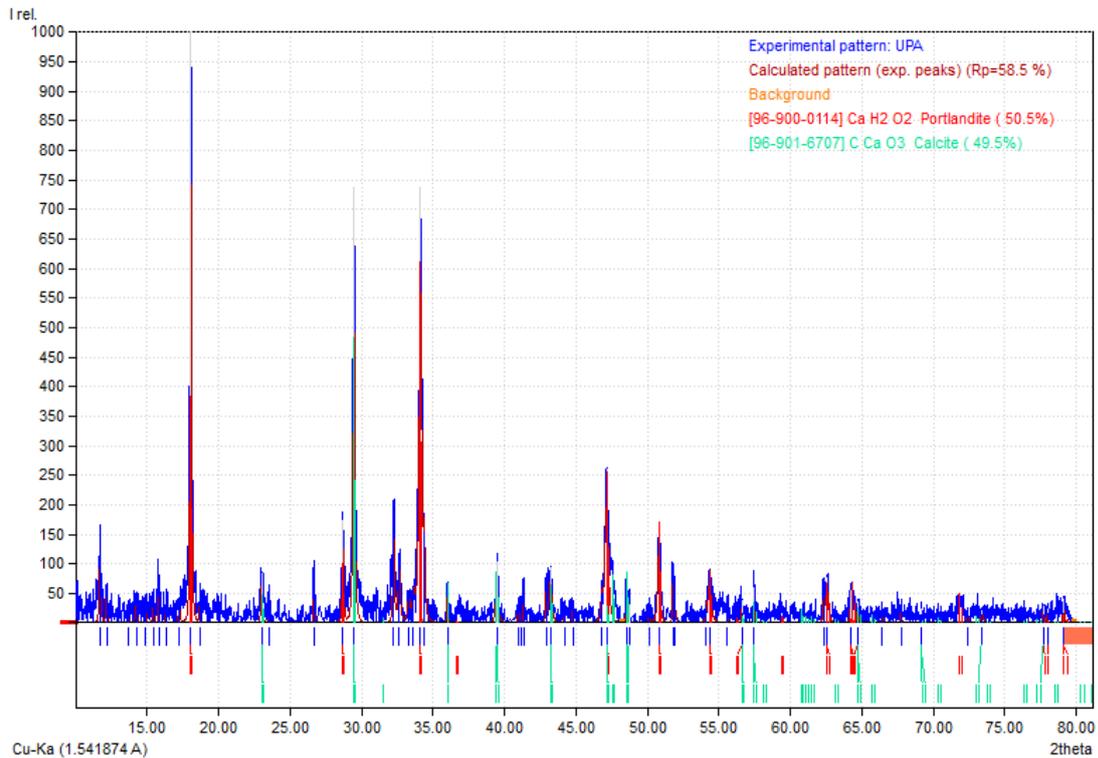
4. Resultados y Discusiones



Gráfica 28. La gráfica corresponde a las muestras de pasta de cemento Sol después de la carbonatación.

Tabla 11. Resultados de picos principales en 2θ , distancias interplanares e índices de Miller para la Portlandita y Calcita del cemento So006C.

Portlandita	2theta [°]	d [Å]	hkl	Calcita	2theta [°]	d [Å]	hkl
1	18,13	4,8937	0 0 1	1	23,01	3,8651	1 0 2
2	28,78	3,1021	1 0 0	2	29,53	3,0247	1 0 4
3	34,19	2,6223	1 0 1	3	39,5	2,2816	1 1 3
4	47,22	1,9247	1 0 2	4	43,29	2,0901	2 0 2
5	50,86	1,7952	1 1 0	5	47,22	1,9247	2 0 4
6	54,33	1,6886	1 1 1	6	47,8	1,903	1 0 8
7	62,61	1,4836	2 0 1	7	57,33	1,6072	2 1 2
8	64,28	1,4491	1 1 2	8	57,9	1,5927	2 1 2
9	64,44	1,4458	1 0 3	9	61,29	1,5124	2 0 8
10	71,81	1,3146	2 0 2	10	61,8	1,5013	1 1 9
				11	64,72	1,4403	3 0 0
				12	69,52	1,3521	2 1 7



Gráfica 29. La gráfica corresponde a las muestras de pasta de cemento Apu después de la carbonatación.

Tabla 12. Resultados de picos principales en 2θ , distancias interplanares e índices de Miller para la Portlandita y Calcita del cemento Apu.

Portlandita	2theta [°]	d [Å]	h k l	Calcita	2theta [°]	d [Å]	h k l
1	18,08	4,9077	0 0 1	1	23,01	3,8653	1 0 2
2	28,71	3,1091	1 0 0	2	29,48	3,0304	1 0 4
3	34,13	2,6269	1 0 1	3	36,03	2,4927	1 1 0
4	47,15	1,9274	1 0 2	4	39,48	2,2826	1 1 3
5	50,8	1,7973	1 1 0	5	43,22	2,0933	2 0 2
6	54,35	1,6881	1 1 1	6	47,15	1,9274	2 0 4
7	56,6	1,626	0 0 3	7	48,54	1,8754	1 1 6
8	62,57	1,4846	2 0 1	8	48,73	1,8687	1 1 6
9	64,23	1,4501	1 1 2	9	56,6	1,626	2 1 1
10	64,72	1,4403	1 0 3	10	57,47	1,6036	2 1 2
11	77,69	1,2291	0 0 4	11	64,72	1,4403	3 0 0
12	77,99	1,2252	0 0 4	12	69,19	1,3578	2 1 7

De las gráficas 25, 26, 27, 28 y 29 se encuentran parámetros tales como las dimensiones de la celda unitaria, sistema cristalino y densidad. Los valores de estos parámetros se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Resultados de los parámetros cristalinos y la red cristalina para la portlandita y la calcita.

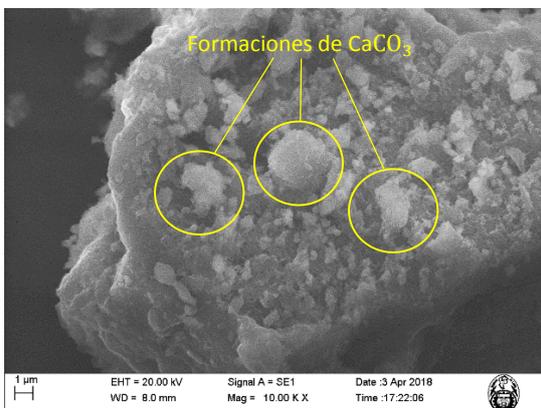
4. Resultados y Discusiones

	Portlandita					Calcita				
	Celda unitaria "a" (Å)	Celda unitaria "c" (Å)	I/Ic	Calc. Densidad g/cm ³	Sistema cristalino	Celda unitaria "a" (Å)	Celda unitaria "c" (Å)	I/Ic	Calc. Densidad g/cm ³	Sistema cristalino
C. Andino	3.5844	4.8962	3.53	2.258	trigonal (hexagona 1 axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)
C. Nacional	3.5925	4.9050	3.83	2.244	trigonal (hexagona 1 axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)
C. Inka	3.5925	4.9050	3.83	2.258	trigonal (hexagona 1 axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)
C. Apu	3.5925	4.9050	3.83	2.244	trigonal (hexagona 1 axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)
C. Sol	3.5925	4.9050	3.83	2.244	trigonal (hexagona 1 axes)	4.9844	17.0376	3.10	2.720	trigonal (hexagonal axes)

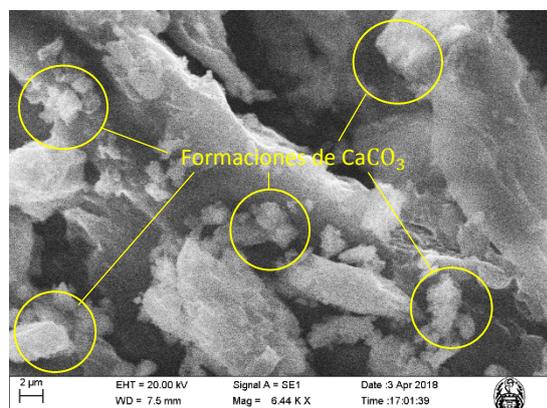
En estas gráficas se encontraron parámetros tales como la fase cristalina la cual es hexagonal, las dimensiones de la celda unitaria entre otros.

- **Gráficas SEM de Probetas de Pasta de Cemento Sol**

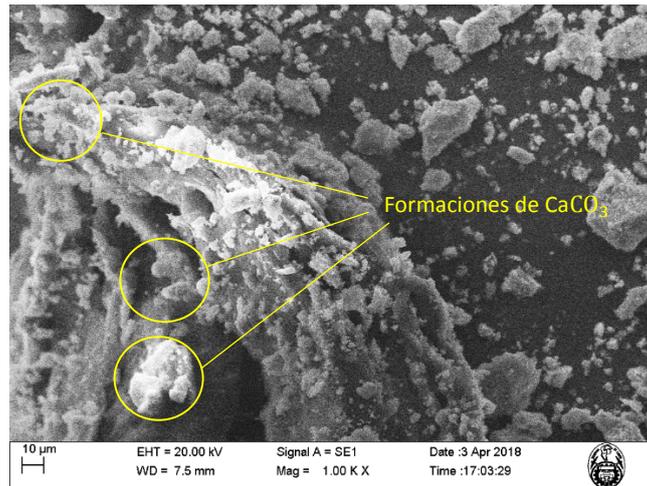
Mediante las imágenes SEM se resalta la formación de CaCO_3 ocurrido por el proceso de carbonatación que tuvieron las probetas de pasta de cemento sol luego del proceso de la tercera carbonatación en tres zonas de la muestra. Las gráficas de SEM son:



a)



b)



c)

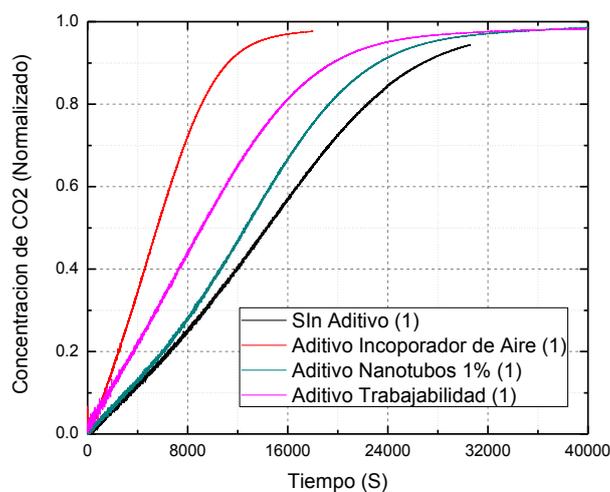
Gráfica 30. a) Morfología de pasta de cemento sol con un aumento a 10000X. b) Imagen SEM con un aumento a 6440X. c) Imagen SEM con un aumento a 1000X.

Las imágenes SEM presentan cúmulos, estos cúmulos al ser comparadas con trabajos previos de microscopía [74] dan como resultado la presencia de CaCO_3 cuyo tamaño aproximadamente es 3 a 4 μm . Adicionalmente, se observa en las imágenes SEM que las muestras no están completamente carbonatadas ya que existen ciertas zonas que aún no presenta cúmulos a pesar de haber tenido tres procesos de carbonatación seguida una de otra.

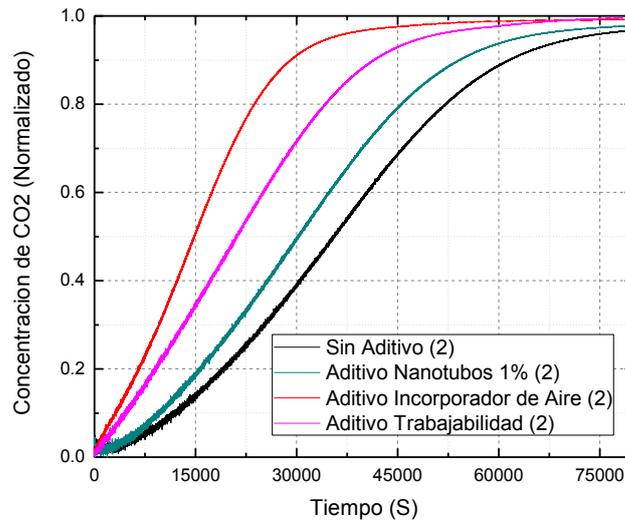
1.2 Probetas de Pastas de Cemento Sol con Aditivos

• Gráficas de Carbonatación

Los datos obtenidos del primer y segundo proceso de carbonatación donde se graficaron la concentración de CO_2 de las probetas vs el tiempo fue:



Gráfica 31. Gráfica del cemento sol en pasta de cemento con diversos aditivos en la primera carbonatación.



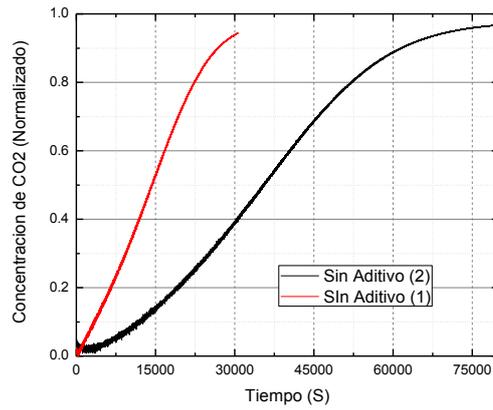
Gráfica 32. Gráfica del cemento sol en pasta de cemento con Diversos Aditivos en la segunda carbonatación.

Los aditivos tales como incorporador de aire y mejoramiento en la trabajabilidad tanto de la primera como segunda carbonatación no proporcionan un aumento en el tiempo de absorción de CO₂ en los procesos sino por el contrario disminuye el tiempo de absorción. Esto se debe para el caso del aditivo incorporador de aire porque con este aditivo se generan microburbujas las cuales producen que el material sea más poroso, por su parte el aditivo de trabajabilidad tiene el efecto de la pérdida de agua al momento de secado proporcionando una menor reacción de hidratación generando mayores imperfecciones que traerá como consecuencia que las moléculas de CO₂ ingresen con mayor facilidad al interior de la probeta.

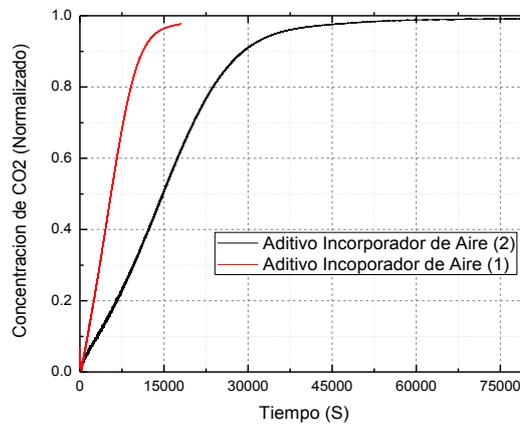
Para el caso los CNT al 1% en ambos procesos de carbonatación tampoco generan un aumento en el tiempo de absorción de CO₂, todo esto comparado a las muestras sin aditivo.

- **Gráficas Comparativas para los Procesos de Primera y Segunda**

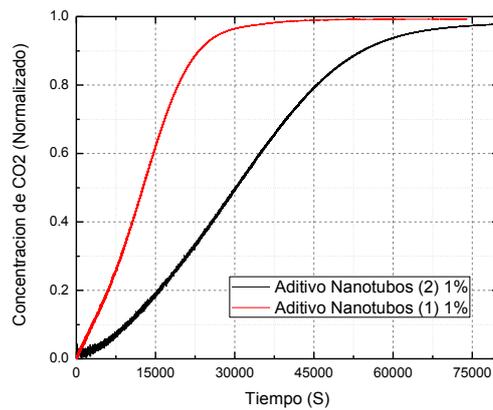
Se tienen las siguientes gráficas separadas por cada tipo de aditivo en las cuales se compara la concentración de CO₂ de las probetas en los procesos de la primera y segunda carbonatación que se realizaron en las gráficas 31 y 32. Las gráficas obtenidas fueron:



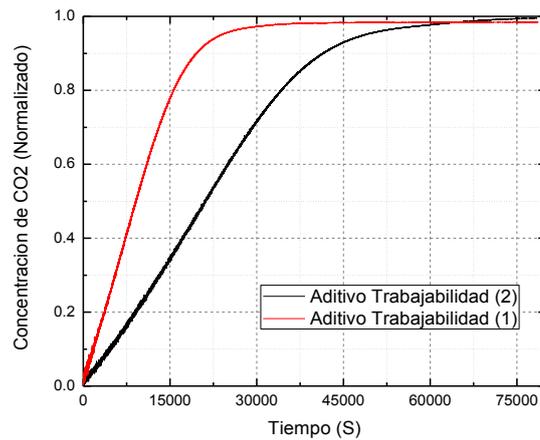
Gráfica 33. Gráfica del cemento Sol Sin Aditivo en la Primera (1) y Segunda (2) Carbonatación.



Gráfica 34. Gráfica del cemento Sol con Aditivo de Incorporado de Aire en la Primera (1) y Segunda (2) Carbonatación.



Gráfica 35. Gráfica del cemento Sol con Aditivo de Nanotubos al 1% en la Primera (1) y Segunda (2) Carbonatación.

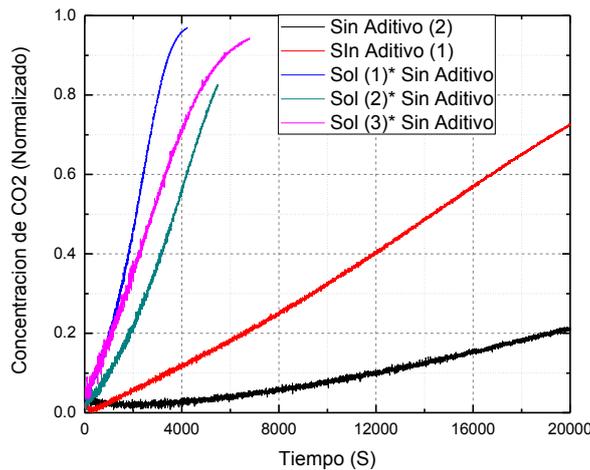


Gráfica 36. Gráfica del cemento Sol con Aditivo de Trabajabilidad en la Primera (1) y Segunda (2) Carbonatación.

Al comparar los procesos de carbonatación se evidencia una relación directa entre el tiempo de absorción del CO₂ con el número de carbonataciones que tienen las probetas de cemento para cada tipo de aditivo. Lo ocurrido evidencia un aumento de la saturación de poros a medida que aumenta la concentración de CO₂ al interior de las probetas.

- **Gráfica Comparativa entre los Procesos de Primera, Segunda y Tercera Carbonatación de Probetas con Cemento Sol Curadas y no Curadas**

Se tiene la siguiente gráfica que compara la concentración de CO₂ de las probetas para los procesos de la primera, segunda y tercera carbonatación de probetas sin el proceso de curado con los procesos de primera y segunda carbonatación de las probetas con el proceso de curado en 28 días de las gráficas 5, 6, 7, 31 y 32. La gráfica obtenida fue:



Gráfica 37. Gráfica del cemento sol sin aditivo y curado 28 días con la primera (1) y segunda (2) carbonatación; cemento Sol sin Aditivos y sin el proceso de curado con la Primera (1)*, Segunda (2)* y tercera (3)* Carbonatación.

La gráfica resalta información la cual indica que las muestras curadas en 28 días tienen un tiempo de absorción del CO₂ mayor al de las muestras sin curado. La razón de lo sucedido es que las muestras al ser curadas reducen sus poros generando una mayor impermeabilidad en el concreto a diferencia de las muestras que no se curaron las cuales tienen una mayor cantidad de poros generando una menor impermeabilidad al CO₂.

- **Datos de Masa por cada tipo de Aditivo en cada Proceso de Carbonatación**

Las masas de pasta de cemento sol son expuestas en las tablas 14, 15, 16 y 17 correspondientes a cada proceso desde su fabricación hasta después de cada proceso de carbonatación.

Tabla 14. Se presentan las masas de tres probetas por cada tipo de aditivo.

	Sin Aditivo (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,565	0,613	0,581	0,646
2°	0,567	0,612	0,581	0,642
3°	0,567	0,626	0,580	0,641

Tabla 15. Resultados de masas de /cada probeta luego del proceso de curado.

	Sin Aditivo (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,605	0,632	0,621	0,666
2°	0,607	0,632	0,621	0,662
3°	0,607	0,635	0,620	0,661

Tabla 16. Resultados de las masas de cada probeta luego de la primera carbonatación.

	Sin Aditivo (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,606	0,633	0,622	0,667
2°	0,608	0,633	0,622	0,663
3°	0,608	0,636	0,621	0,662

Tabla 17. Resultados de las masas de cada probeta luego de la segunda carbonatación.

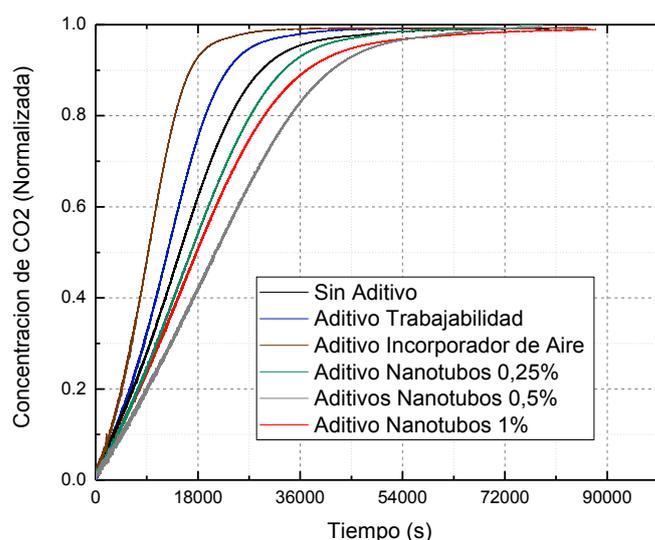
	Sin Aditivo (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,607	0,634	0,623	0,668
2°	0,609	0,634	0,623	0,664
3°	0,609	0,637	0,622	0,663

La incertidumbre en la medición de las masas para cada tipo de probeta es de $\pm 0,001$ kg.

1.3 Probetas de Mortero de Cemento Sol con Aditivos

- **Gráficas de Carbonatación**

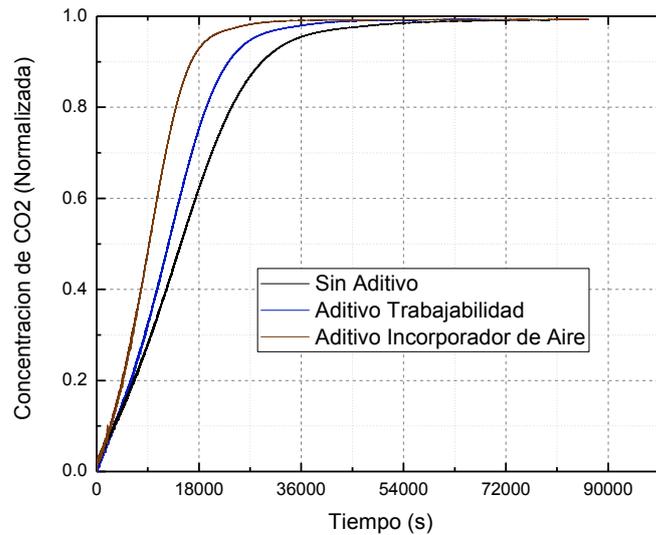
Los datos expresados en la gráfica, de la concentración de CO₂ en los morteros con cemento sol para diversos aditivos preparados como se menciona en el procedimiento, fue de la siguiente manera:



Gráfica 38. Gráfica de Mortero con diversos tipos de Aditivos

- **Gráfica Comparativa entre Aditivos Convencionales**

La siguiente gráfica corresponde a la concentración de CO₂ de las probetas con diferentes tipos de aditivos de la gráfica 38. La gráfica obtenida fue:

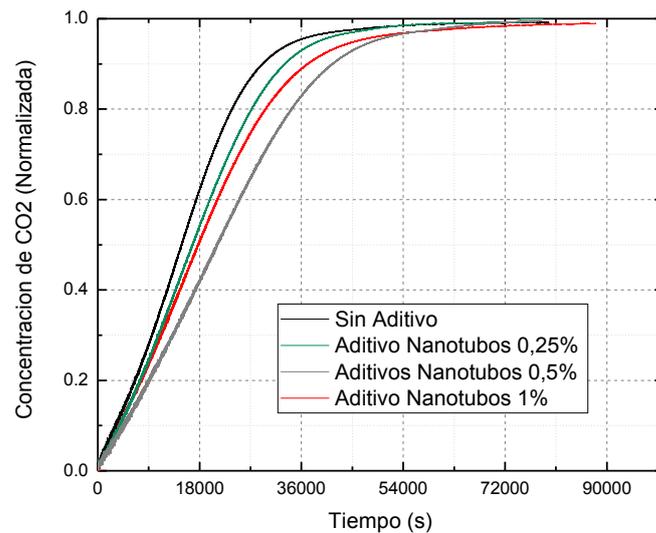


Gráfica 39. Gráfica de Mortero con aditivos convencionales

Se resalta del grafico que el aditivo incorporador de aire disminuye el tiempo de absorción del CO₂ seguido por el aditivo de trabajabilidad haciéndolos más permeable. Lo anteriormente mencionado conlleva a relacionar de manera directa al tiempo de absorción del CO₂ de cada probeta de mortero de la gráfica 38 con sus equivalentes probetas de pasta de cemento sol con sus aditivos correspondientes de las gráficas 31 y 32.

- **Gráfica Comparativa entre la Variación del Porcentaje de CTN**

La gráfica a continuación corresponde a la concentración de CO₂ de las probetas con diferentes concentraciones de CNT de la gráfica 38. La gráfica obtenida fue:



Gráfica 40. Gráfica de Mortero con diferentes porcentajes de Nanotubos.

El resultado de aumentar el porcentaje de CNT genera una saturación en las probetas donde el límite de los CNT es en aproximadamente el 0,5%, esto ocurre debido a que los CNT se adhieren a las grietas (microporos existentes en las muestras de cemento) y a medida que se aumenten llegaran a generar acumulaciones de estos últimos en las microfisuras que producirán nuevas grietas permitiendo una mayor permeabilidad de CO₂ en la muestra.

Al comparar lo ocurrido con las pastas de cemento sol al 1% de CNT con los morteros de cemento sol al 1% se deduce que sobrepasaron el límite que debe agregarse dicho compuesto ya que no existe un aumento máximo sino una reducción del tiempo de absorción de CO₂. Por otro lado existe una diferencia en las curvas de absorción entre las probetas de pasta y mortero al 1%, siendo esta diferencia en caso de las pastas de 1% en CNT un menor tiempo de absorción comparado a las pastas sin aditivo caso contrario ocurre con los morteros que fueron aditivados con CNT al 1% que tienen un mayor tiempo de absorción comparado a los morteros sin aditivo, la razón de esto es porque en el caso de la pasta la concentración de CNT es mayor siendo 6,5g de los 650g que representa solo el cemento a comparación del mortero siendo 2,6g de los 260g de cemento sumados a los 715g de arena.

• **Datos de Masa por cada tipo de Aditivo en cada Proceso de Carbonatación**

Las masas presentadas en las tablas 18, 19 y 20 corresponden a las muestras de mortero con cemento sol correspondiente a cada proceso desde su fabricación hasta después de cada proceso de carbonatación.

Tabla 18. Se presentan las masas de cada probeta variando el tipo de aditivo.

	Sin Aditivo (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	CNT 0.25% (Kg)	CNT 0.5% (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,276	0,266	0,239	0,276	0,275	0,276
2°	0,275	0,266	0,239	0,275	0,274	0,277
3°	0,276	0,264	0,242	0,274	0,274	0,276

Tabla 19. Resultados de las masas de cada probeta variando el tipo aditivo luego del proceso de curado.

	Sin Aditivo (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	CNT 0.25% (Kg)	CNT 0.5% (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,291	0,281	0,254	0,291	0,290	0,291
2°	0,290	0,281	0,254	0,290	0,289	0,292
3°	0,291	0,279	0,257	0,289	0,289	0,291

Tabla 20. Resultados de las masas de cada probeta variando el tipo de aditivo luego de la primera carbonatación.

	Sin Aditivo (Kg)	Trabajabilidad (Kg)	Incorporador de Aire (Kg)	CNT 0.25% (Kg)	CNT 0.5% (Kg)	CNT 1% (Kg)
1°	0,292	0,282	0,255	0,292	0,291	0,292
2°	0,291	0,282	0,255	0,291	0,290	0,293
3°	0,292	0,279	0,258	0,290	0,290	0,292

La incertidumbre en la medición de las masas para cada tipo de probeta es de $\pm 0,001$ kg.

- **Densidad de morteros**

La norma ASTM C109/C109M-2012 permite elaborar los cubos con moldes rígidos de metal cuya dimensión es 5cm aproximadamente por lado. Luego de medirse las dimensiones con una regla se puede determinar el volumen y por consecuencia determinar las densidades que están ordenadas en la siguiente tabla:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Tabla 21. Los valores de la densidad hallados para cada probeta de mortero con diferentes aditivos.

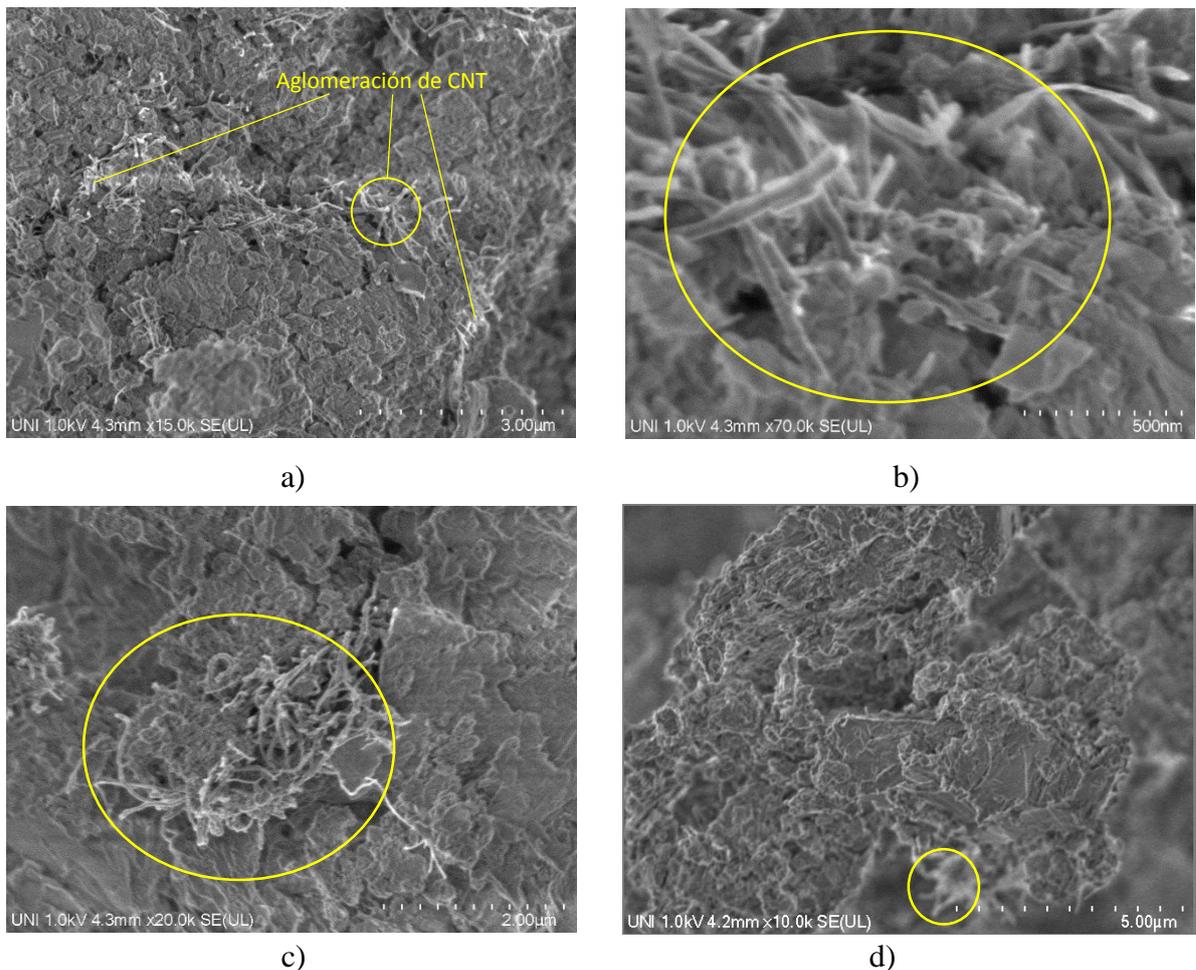
	Densidad 1° ($\frac{g}{cm^3}$)	Densidad 2° ($\frac{g}{cm^3}$)	Densidad 3° ($\frac{g}{cm^3}$)	Densidad promedio ($\frac{g}{cm^3}$)
Sin aditivo	2,33	2,32	2,33	2,33
Trabajabilidad	2,26	2,26	2,26	2,26
Incorporador de Aire	2,25	2,25	2,23	2,24
CNT 0,25%	2,33	2,32	2,31	2,32
CNT 0,5%	2,32	2,31	2,31	2,31
CNT 1 %	2,34	2,34	2,33	2,33

Realizando el cálculo de densidades se pueden encontrar que las densidades de las muestras con aditivo incorporador de aire son bajas a diferencia de las otras muestras. Esto confirma que los aditivos incorporador de aire genera burbujas de aire en el interior de la muestra que en el secado generaran más poros que los habituales permitiendo que sean más permeables.

La densidad de las muestras con aditivo de trabajabilidad también son menores a las otras muestras, aunque en menor medida que los de incorporador de aire. Estos aditivos disminuyen la cantidad de agua en las muestras mediante el proceso de sangrado (el sangrado ocurre en el proceso de secado y es la segregación de una parte del agua de la mezcla que tiende a elevarse en la superficie de la muestra) para un mejoramiento en la plasticidad.

- **Gráficas SEM de una Probeta con CNT al 1%**

Las imágenes SEM permitieron conocer la morfología de las probetas de mortero con CNT al 1% sin el proceso de carbonatación en tres diferentes zonas a, b y d. Las gráficas de SEM son:



Gráfica 41. a) Morfología del mortero con CNT al 1% a escala 3µm. b) Imagen SEM con un acercamiento en la zona resaltada en "a" a escala 500nm. c) Imagen SEM a escala de 2µm. d) Imagen SEM a escala de 5µm.

Las imágenes SEM presentan cúmulos y un poco dispersión de los CNT que se producen al momento de su preparación generando de esta manera un aumento de imperfecciones que ayudaran a que el material sea más permeable y frágil.

- **Ensayos de Comprensión**

El equipo TONI TECHNIK realizó los ensayos de compresión en cubos de mortero dando como resultado los siguientes datos:

Tabla 22. La tabla expone la fuerza máxima de compresión para tres probetas con la misma concentración de CNT.

	Sin Aditivo	0,25%	0,5%	1%
Probeta 1	115,15 kN	148,70 kN	152,47 kN	174,47 kN
Probeta 2	145,85 kN	157,17 kN	166,45 kN	167,46 kN
Probeta 3	133,50 kN	157,83 kN	166,42 kN	171,02 kN
promedio	131,5 kN	157,57 kN	161,78 kN	170,67 kN

Donde la incertidumbre en las mediciones para cada probeta fue $\pm 0.01\text{kN}$.

Para el caso de la presión máxima se tuvo que calcular las dimensiones de los cubos de morteros. Los datos son mostrados en la tabla 23:

Tabla 23. La tabla muestra las dimensiones de las probetas donde H es la altura y A, B son los lados de la base.

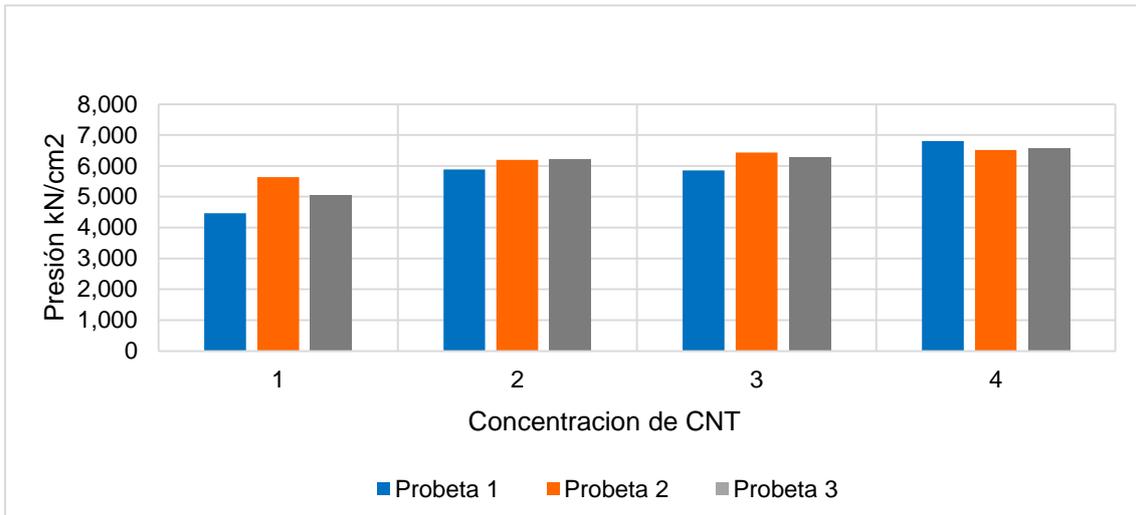
		Sin Aditivo	0,25%	0,5%	1%
1	H	50,45 mm	50,65 mm	50,90 mm	50,55 mm
	A	51,00 mm	50,05 mm	51,30 mm	50,80 mm
	B	50,55 mm	50,55 mm	50,80 mm	50,55 mm
2	H	50,40 mm	50,50 mm	50,75 mm	50,60 mm
	A	51,10 mm	50,35 mm	51,00 mm	50,90 mm
	B	50,60 mm	50,40 mm	50,75 mm	50,50 mm
3	H	50,50 mm	50,45 mm	50,60 mm	51,05 mm
	A	50,55 mm	50,40 mm	51,85 mm	51,65 mm
	b	50,50 mm	50,50 mm	51,10 mm	50,55 mm

Donde la incertidumbre en las mediciones para cada probeta fue ± 0.05 mm.

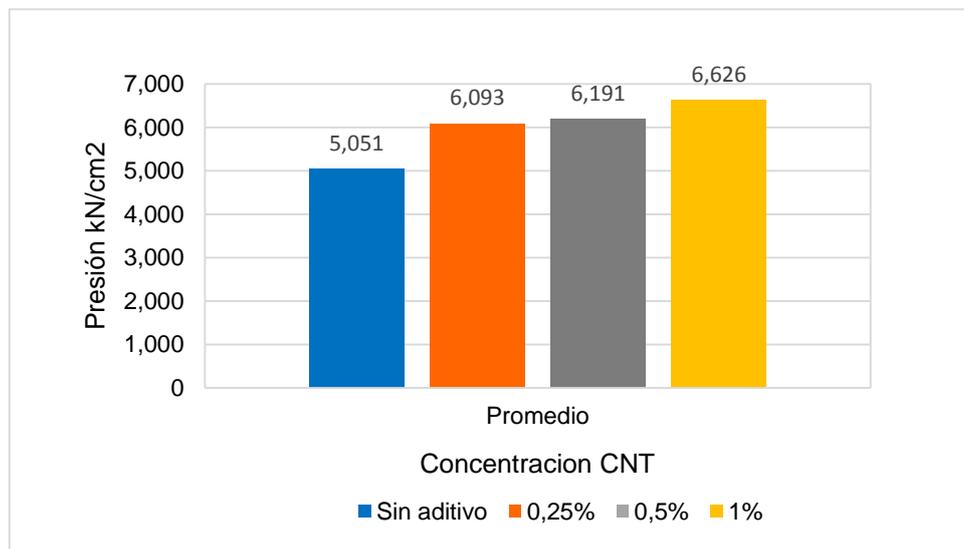
La presión máxima de compresión para cada muestra esta expresada en la siguiente tabla e histogramas para comparar los resultados:

Tabla 24. La tabla expone la presión máxima de compresión antes de la rotura en kN/cm^2 para tres probetas con la misma concentración de CNT.

kN/cm^2	Sin (1) Aditivo	0,25% (2)	0,5% (3)	1% (4)
Probeta 1	4,471	5,889	5,850	6,801
Probeta 2	5,640	6,190	6,437	6,514
Probeta 3	5,043	6,201	6,287	6,563
Promedio	5,051	6,093	6,191	6,626



a)



b)

Gráfica 42. a) “1” son las probetas sin aditivo, “2” con aditivo CNT al 0,25%, “3” las con 0,5% y “4” con 1% de CNT. b) El histograma compara los promedios de presión de cada concentración de CNT del histograma “a”.

El histograma presentado muestra como las probetas aumentan su presión a la rotura a medida que se aumenta el porcentaje de CNT siendo el máximo que se consiguió con la concentración al 1% llegando a un 30% mayor que las probetas sin aditivo, esto sucede a pesar que las muestras con el 1% de CNT tienen una mayor cantidad de poros e imperfecciones. La relación encontrada depende directamente de las uniones entre las estructuras cristalinas formadas del cemento y los CNT, pero inversamente de las imperfección, poros y fisuras siendo la unión de los CNT con las estructuras las más importante y fuertes para el caso de las pruebas de comprensión, lo último puede explicarse porque los CNT tienen fuerzas de tensión y compresión elevadas.

1.4 Probetas de Pasta de Cemento Sol sin y con CNT al 1%.

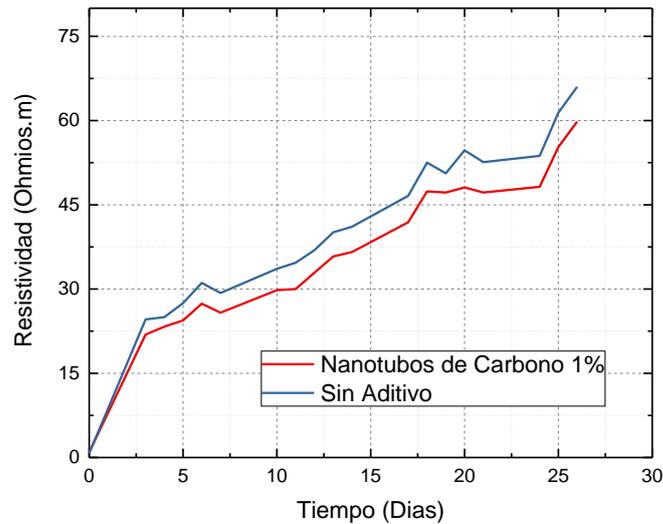
- Pruebas de la Resistividad

En esta sección se presentan los resultados de la resistividad vs tiempo de las probetas cilíndricas 5cmx10cm. Los datos se presentan a continuación:

Tabla 25. Se presentan los datos de la resistividad ($\Omega.m$) tomadas cada día.

Tiempo (Días)	Resistividad (Ohmios.m) Sin Aditivo	Resistividad (Ohmios.m) Aditivo CNT al 1%
0	0,745	0,975
3	21,9	24,6
4	23,3	25
5	24,4	27,5
6	27,4	31,1
7	25,8	29,3
10	29,8	33,6
11	30	34,7
12	32,9	36,9
13	35,8	40,1
14	36,6	41,1
17	41,9	46,6
18	47,4	52,5
19	47,2	50,6
20	48,1	54,7
21	47,2	52,6
24	48,2	53,7
25	55,3	61,4
26	59,8	66

Los datos de la resistividad de probetas de pasta de cemento sol son llevados a una gráfica resistividad vs tiempo para ser analizada.



Gráfica 43. Se presenta la gráfica de la resistividad ($\Omega.m$) en función del tiempo (días).

La resistividad es una propiedad que depende de manera inversa con la porosidad y también otros factores. Para las mediciones de la resistividad las probetas tuvieron iguales condiciones de elaboración y medición por tal motivo el único parámetro que cambio fue la adición de CNT por lo tanto se deduce de lo anterior que la probeta con aditivo de CNT al 1% tiene mayor cantidad poros e imperfecciones, esto confirmar lo encontrado en las imágenes SEM y las pruebas de carbonatación.

Los CNT con los que se preparó las probetas no son conductores ya que son nanotubos de carbono de paredes múltiples y la ficha técnica nos indica que su conductividad es de $10^4 S/m$ lo que corresponde a un semiconductor, el cual no genera cambios en la resistividad de la probeta por ser semiconductor y estar en concentraciones del 1%.

2. Análisis Estadístico

Los resultados en una medición solo son aproximaciones o estimaciones que deben ser acompañadas por su incertidumbre.

La incertidumbre de una prueba se determina al aplicar la ley de propagación de incertidumbres a un modelo definido. Las incertidumbres pueden ser de tipo A y tipo B.

Las incertidumbres del tipo A se considera que son debidas a la repetitividad de la variable y las de tipo B son debido al instrumento y se pueden obtener de certificados de calibración. Para encontrar la incertidumbre se debe aplicar:

$$u_{\text{Total}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Donde una vez hallado la incertidumbre total puede encontrarse la incertidumbre relativa, que será:

$$u_{Relativa} = \frac{u_{Total}}{u_{Experimental}}$$

Siendo *u tipo A*: desviación estándar de los datos experimentales y *u tipo B*: del certificado de calibración.

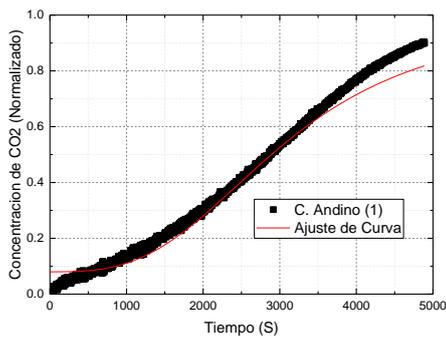
Por último, se usará el método de propagación de errores mediante derivadas parciales para conseguir las incertidumbres de las magnitudes físicas que se requiera.

2.1 Pasta de cemento Variando el Tipo de Cemento

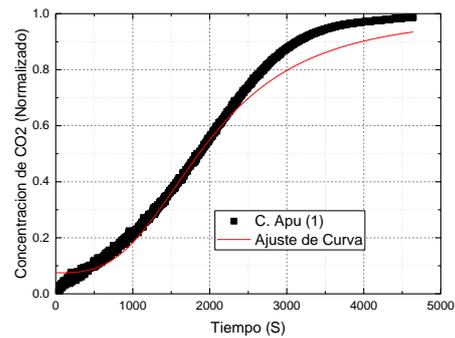
- Gráficas de Carbonatación

Con las gráficas obtenidas en el proceso de carbonatación, se pasa a ajustar dichas curvas para el caso de las gráficas 5, 6 y 7 mediante la función:

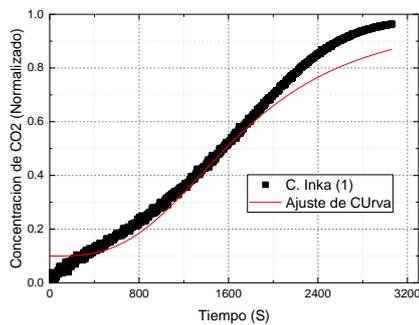
$$\text{Concentraci3n de CO}_2 = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{t}{x_0}\right)^p}$$



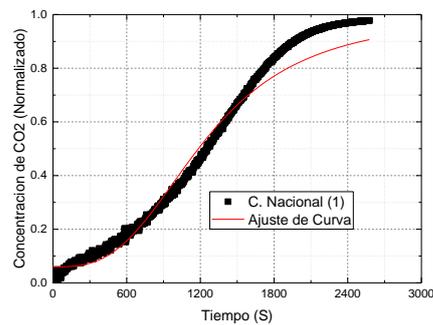
a)



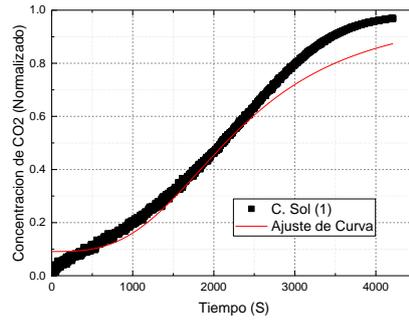
b)



c)

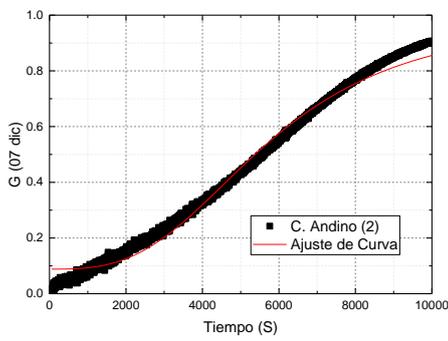


d)

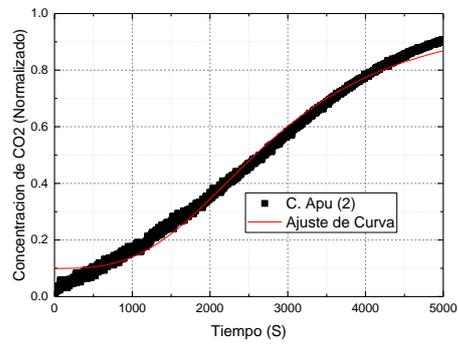


e)

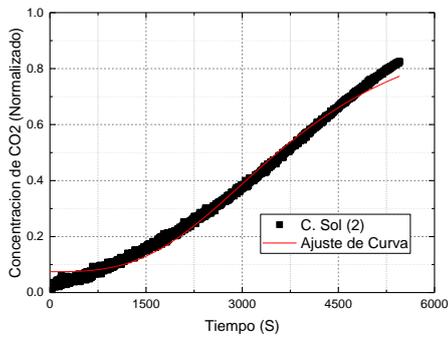
Gráfica 44. Estas gráficas corresponden a las muestras de pasta de cemento con diferente tipo cemento y su ajuste de curva en el proceso de la primera carbonatación.



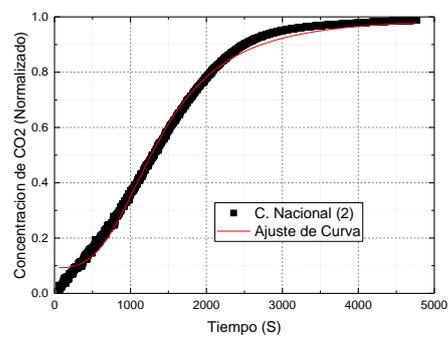
a)



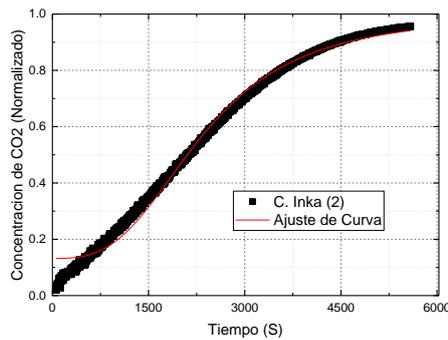
b)



c)

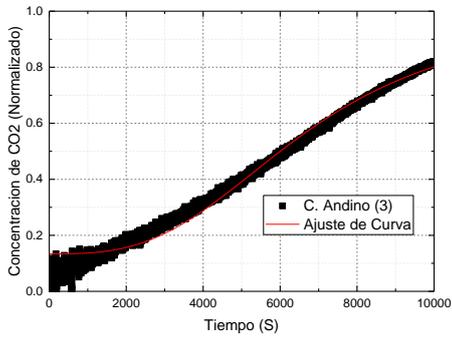


d)

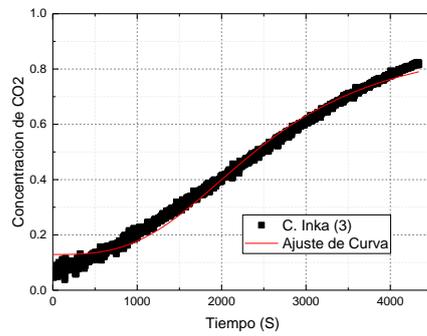


e)

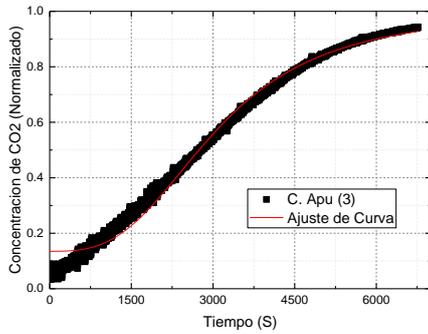
Gráfica 45. Estas gráficas corresponden a las muestras de pasta de cemento con diferente tipo cemento y su ajuste de curva en el proceso de la segunda carbonatación.



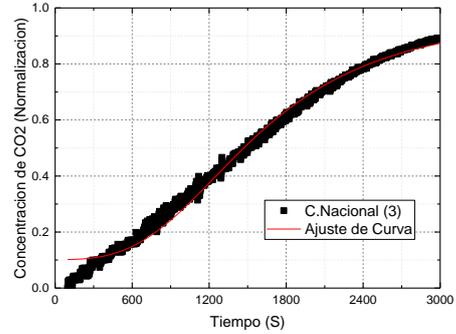
a)



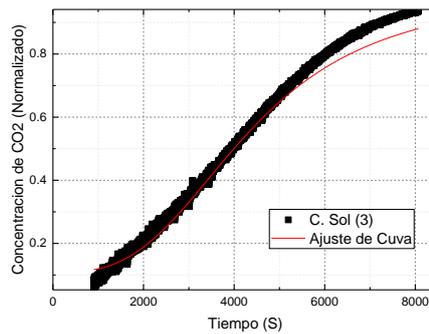
b)



c)



d)



e)

Gráfica 46. Estas gráficas corresponden a las muestras de pasta de cemento con diferente tipo cemento y su ajuste de curva en el proceso de la tercera carbonatación.

Tabla 26. Valores de las constantes A_2 , A_1 , x_0 y p , y sus parámetros estadísticos del ajuste de curva.

	A_1	A_2	x_0	p	Estadística
--	-------	-------	-------	-----	-------------

4. Resultados y Discusiones

	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error	Reduced Chi-Sqr	Coefficiente de Determinación
C. Andino (1)	0.07986	0.00109	1	0.0035	3063.89888	11.38988	3	0	0.00155	0.98053
C. sol (1)	0.09116	0.00194	1	0.00424	2290.89292	12.50176	3	0	0.00381	0.9622
C. Apu (1)	0.07515	0.00171	1	0.00215	1964.23364	7.18937	3	0	0.00266	0.9771
C. Nacional (1)	0.05982	0.00226	1	0.00367	1235.20055	6.57451	3	0	0.00286	0.97481
C. Inka (1)	0.09946	0.00211	1	0.00481	1694.43917	10.36132	3	0	0.00331	0.96536
C. Andino (2)	0.08828	0.00058172	1	0.00129	5734.06168	9.38714	3	0	0.0008334	0.99009
C. Apu (2)	0.09955	0.00075064	1	0.00166	2776.76798	5.94564	3	0	0.00068913	0.99134
C. Sol (2)	0.07452	0.00060074	1	0.00256	3750.28418	9.00657	3	0	0.00055748	0.99085
C. Nacional (2)	0.09254	0.00087727	1	0.00057049	1360.5776	2.02113	3	0	0.00045914	0.99535
C. Inka (2)	0.13204	0.00077194	1	0.00092205	2331.84267	3.98438	3	0	0.00060848	0.99298
C. Andino (3)	0.13388	0.00048545	0.99847	0.0015	6654.11042	11.46978	3	0	0.0006682	0.98911
C. Inka (3)	0.12926	0.00074667	0.91308	0.00185	2476.21422	6.41992	3	0	0.00060164	0.98929
C. Apu (3)	0.1351	0.00071985	1	0.00102	3045.76351	5.28483	3	0	0.00072248	0.99139
C. Nacional (3)	0.10189	0.00102	0.98366	0.00176	1567.68242	4.05738	3	0	0.00062706	0.99188
C. Sol (3)	0.10894	0.00107	1	0.00174	4337.31933	10.86998	3	0	0.00119	0.98435

Los ajustes para estas gráficas mediante la función $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{x}{x_0})^p}$ son óptimos por la razón que los coeficientes de correlación están entre 0.98 a 0.99, también si se compara las curvas experimentales con las curvas ajustadas en cada gráfica se encuentra una similitud en sus comportamientos.

Se puede observar una relación directa entre un aumento de la impermeabilidad del CO_2 con un aumento en la constante x_0 , lo expuesto se fundamenta comparando las gráficas de carbonatación con los datos de x_0 .

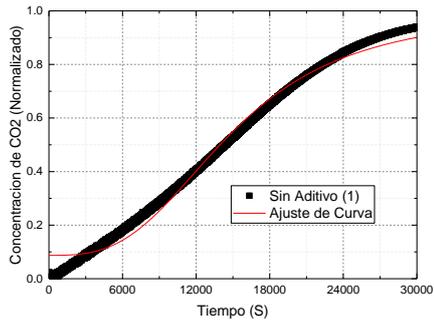
De las gráficas se resalta que para un mejor ajuste la cantidad de datos a tomar debe ser cuando la gráfica tenga una buena tendencia a su asíntota (A_2).

2.2 Probetas de Pastas de Cemento Sol Con Aditivo

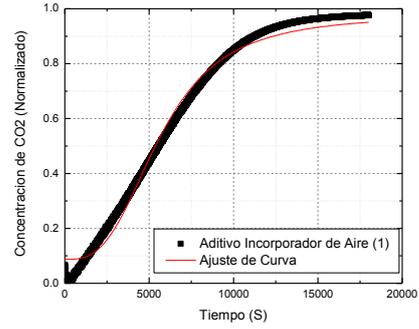
- **Gráficas de Carbonatación**

Se ajusta las curvas obtenidas en las gráficas 31 y 32 mediante la función:

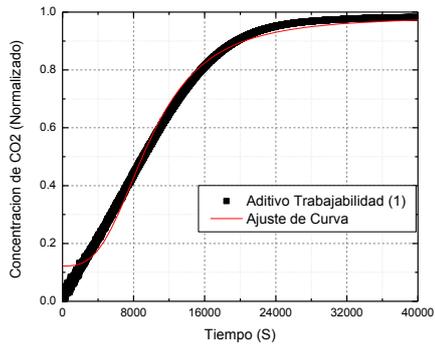
$$\text{Concentraci3n de } CO_2 = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{t}{x_0})^p}$$



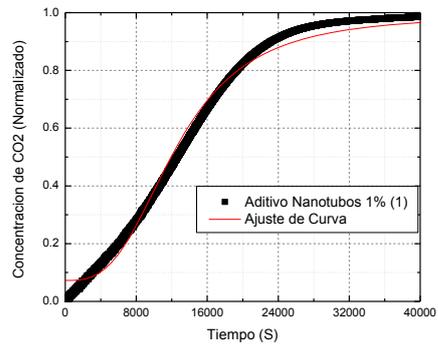
a)



b)

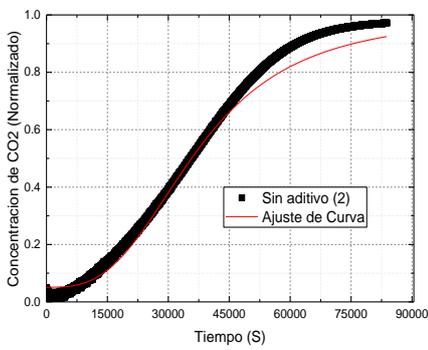


c)

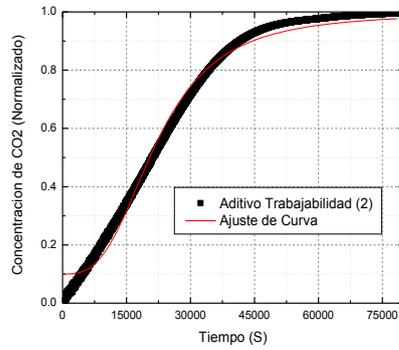


d)

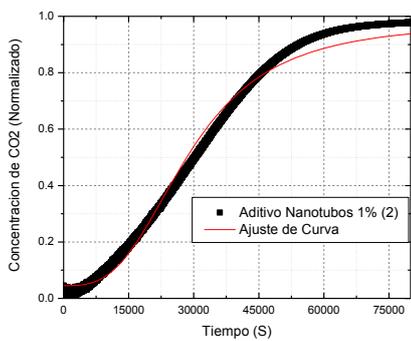
Gráfica 47. Estas gráficas corresponden a las muestras de pasta de cemento sol con diferente tipo de aditivo y su ajuste de curva en el proceso de la primera carbonatación.



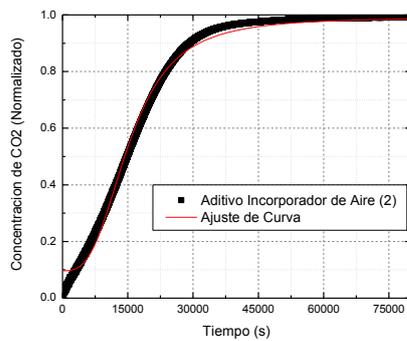
a)



b)



c)



d)

Gráfica 48. Estas gráficas corresponden a las muestras de pasta de cemento sol con diferente tipo de aditivo y su ajuste de curva en el proceso de la segunda carbonatación.

Tabla 27. Valores de las constantes A_2 , A_1 , x_0 y p , y sus parámetros estadísticos del ajuste de curva.

	A1		A2		x0		p		Estadística	
	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error	Reduced Chi-Sqr	Coefficiente de Determinación
Sin aditivo (1)	0.08733	3.55678E-4	1	5.94095E-4	14867.92652	12.98747	3	0	8.49267E-4	0.99084
Trabajabilidad (1)	0.12496	2.45806E-4	0.99188	7.65818E-5	9921.52819	3.7463	3	0	2.97813E-4	0.99499
Incorporador de Aire (1)	0.09421	4.79208E-4	1	3.88745E-4	5854.64914	5.19021	3	0	6.40726E-4	0.99368
CNT 1% (1)	0.07805	2.57025E-4	1	1.03865E-4	12870.73253	4.99049	3	0	4.19162E-4	0.99506
Sin aditivo (2)	0.05125	3.28236E-4	1	4.49514E-4	37012.13126	26.25964	3	0	0.00183	0.98427
Trabajabilidad (2)	0.10383	2.60096E-4	1	1.77043E-4	22394.40024	10.29444	3	0	7.29409E-4	0.99274
Incorporador de Aire (2)	0.10041	2.05833E-4	1	9.23512E-5	15564.31435	5.06042	3	0	3.23825E-4	0.99621
CNT 1% (2)	0.05943	2.91546E-4	1	3.02603E-4	31454.88086	17.85762	3	0	0.00125	0.98922

Su ajuste con la función $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{x}{x_0})^p}$ fue óptimo ya que los coeficientes de correlación son próximos a 1.

Se verifica que una mayor impermeabilidad del CO_2 y un aumento de la constante x_0 , están relacionados directamente

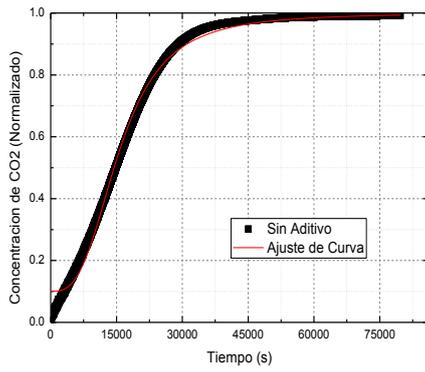
De las gráficas se resalta que para un mejor ajuste la cantidad de datos a tomar debe ser cuando la gráfica tenga una buena tendencia a su asíntota (A_2).

2.3 Muestras de Mortero de Cemento Sol con Aditivos

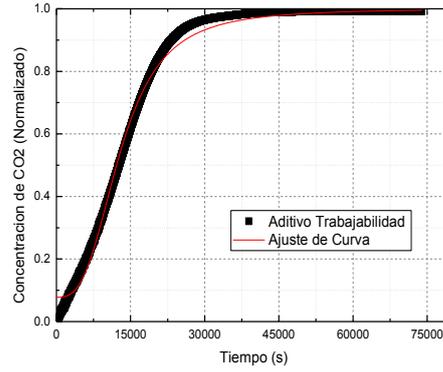
- Gráficas de Carbonatación

Se ajusta las curvas obtenidas en la gráfica 38 mediante la función:

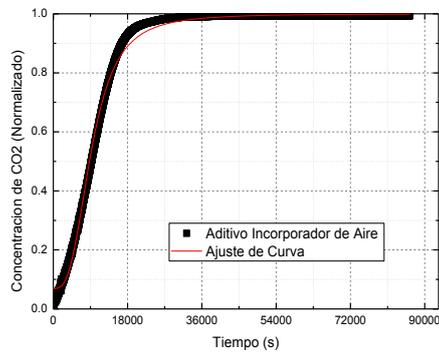
$$\text{Concentraci3n de } CO_2 = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{t}{x_0})^p}$$



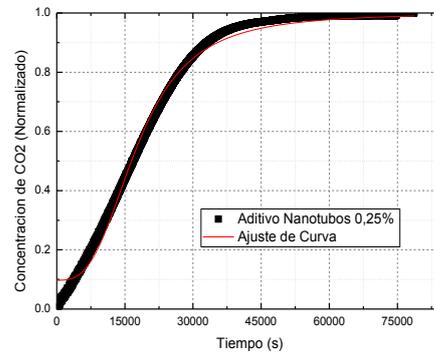
a)



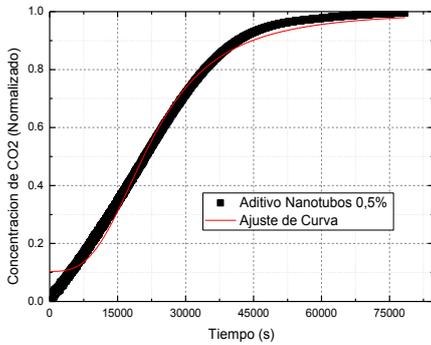
b)



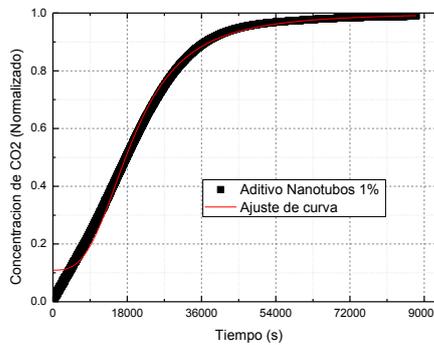
c)



d)



e)



f)

Gráfica 49. Estas gráficas corresponden a las muestras de mortero elaboradas con cemento sol variando el tipo de aditivo y su ajuste de curva en el proceso de la primera carbonatación.

Tabla 28. Valores de las constantes A_2 , A_1 , x_0 y p , y sus parámetros estadísticos del ajuste de curva.

	A1	A2	x_0	p	Estadística
--	----	----	-------	---	-------------

4. Resultados y Discusiones

	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error	Reduced Chi-Sqr	Coefficiente de Determinación
Sin aditivo	0.10041	2.05833E-4	1	9.23512E-5	15564.31435	5.06042	3	0	3.23825E-4	0.99621
Trabajabilidad	0.07805	2.57025E-4	1	1.03865E-4	12870.73253	4.99049	3	0	4.19162E-4	0.99506
Incorporador de Aire	0.06943	2.39417E-4	1	6.60289E-5	9213.48198	3.10719	3	0	2.63096E-4	0.99567
CNT 0,25%	0.09738	2.39245E-4	1	1.23325E-4	17670.05806	6.87215	3	0	4.93804E-4	0.9947
CNT 0,5%	0.10383	2.60096E-4	1	1.77043E-4	22394.39848	10.29444	3	0	7.29409E-4	0.99274
CNT 1%	0.10951	2.03817E-4	1	1.01672E-4	19140.98071	6.37728	3	0	3.88776E-4	0.99553

Para el caso de los morteros la función $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{x}{x_0})^p}$ también describe adecuadamente su comportamiento ya que los coeficientes de correlación son próximos a 1.

Los morteros también presentan una mayor impermeabilidad del CO_2 para mayores valores de la constante x_0 .

- **Densidad de Mortero**

La densidad puede calcularse mediante:

$$D = \frac{M}{V}$$

Donde ΔD es:

$$\Delta D = D \left(\frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta V}{V} \right)$$

Tabla 29. La incertidumbre de la densidad se encontró mediante los errores tipo A de la masa y volumen.

$\frac{g}{cm^3}$	ΔD 1°	ΔD 2°	ΔD 3°	ΔD promedio
Sin aditivo	0,079	0,079	0,079	0,079
Trabajabilidad	0,077	0,077	0,077	0,077
Incorporador de Aire	0,078	0,078	0,076	0,077
CNT 0,25%	0,079	0,079	0,078	0,079
CNT 0,5%	0,079	0,078	0,078	0,078
CNT 1 %	0,079	0,079	0,079	0,079

La incertidumbre de la densidad de tipo B es igual:

Tabla 30. La desviación estándar de las tres muestras permitió encontrar la incertidumbre tipo B.

$\frac{g}{cm^3}$	ΔD Tipo B
Sin aditivo	0,007
Trabajabilidad	0,002
Incorporador de Aire	0,014
CNT 0,25%	0,010
CNT 0,5%	0,007
CNT 1 %	0,010

La incertidumbre total es:

Tabla 31. La incertidumbre total fue hallada por las incertidumbres tipo A y tipo B.

$\frac{g}{cm^3}$	ΔD_{Total}
Sin aditivo	0,079
Trabajabilidad	0,077
Incorporador de Aire	0,078
CNT 0,25%	0,080
CNT 0,5%	0,078
CNT 1 %	0,080

Entonces, la incertidumbre relativa es:

Tabla 32. Los errores relativos son expresados en porcentajes para cada probeta de cemento Sol con diferente tipo de aditivo.

	$\Delta D_{Relativa}$
Sin aditivo	3,4%

Trabajabilidad	3,4%
Incorporador de Aire	3,5%
CNT 0,25%	3,4%
CNT 0,5%	3,3%
CNT 1 %	3,4%

• **Ensayos Mecánicos**

La presión puede calcularse mediante:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde ΔP es:

$$\Delta P = P \left(\frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta A}{A} \right)$$

Tabla 33. La incertidumbre de la presión se encontró mediante los errores tipo A de la fuerza y área.

kN/cm ²	Sin Aditivo	0,25%	0,5%	1%
Probeta 1	0,00039	0,00040	0,00040	0,00040
Probeta 2	0,00039	0,00040	0,00039	0,00040
Probeta 3	0,00038	0,00039	0,00039	0,00039
Promedio	0,00038	0,00039	0,00039	0,00039

La incertidumbre de la presión de tipo B es igual:

Tabla 34. La desviación estándar de las tres muestras permitió encontrar la incertidumbre tipo B.

$\frac{g}{cm^3}$	ΔP Tipo B
Sin aditivo	0,585
CNT 0,25%	0,177
CNT 0,5%	0,305
CNT 1 %	0,154

La incertidumbre total es:

Tabla 35. La incertidumbre total fue hallada por las incertidumbres tipo A y tipo B.

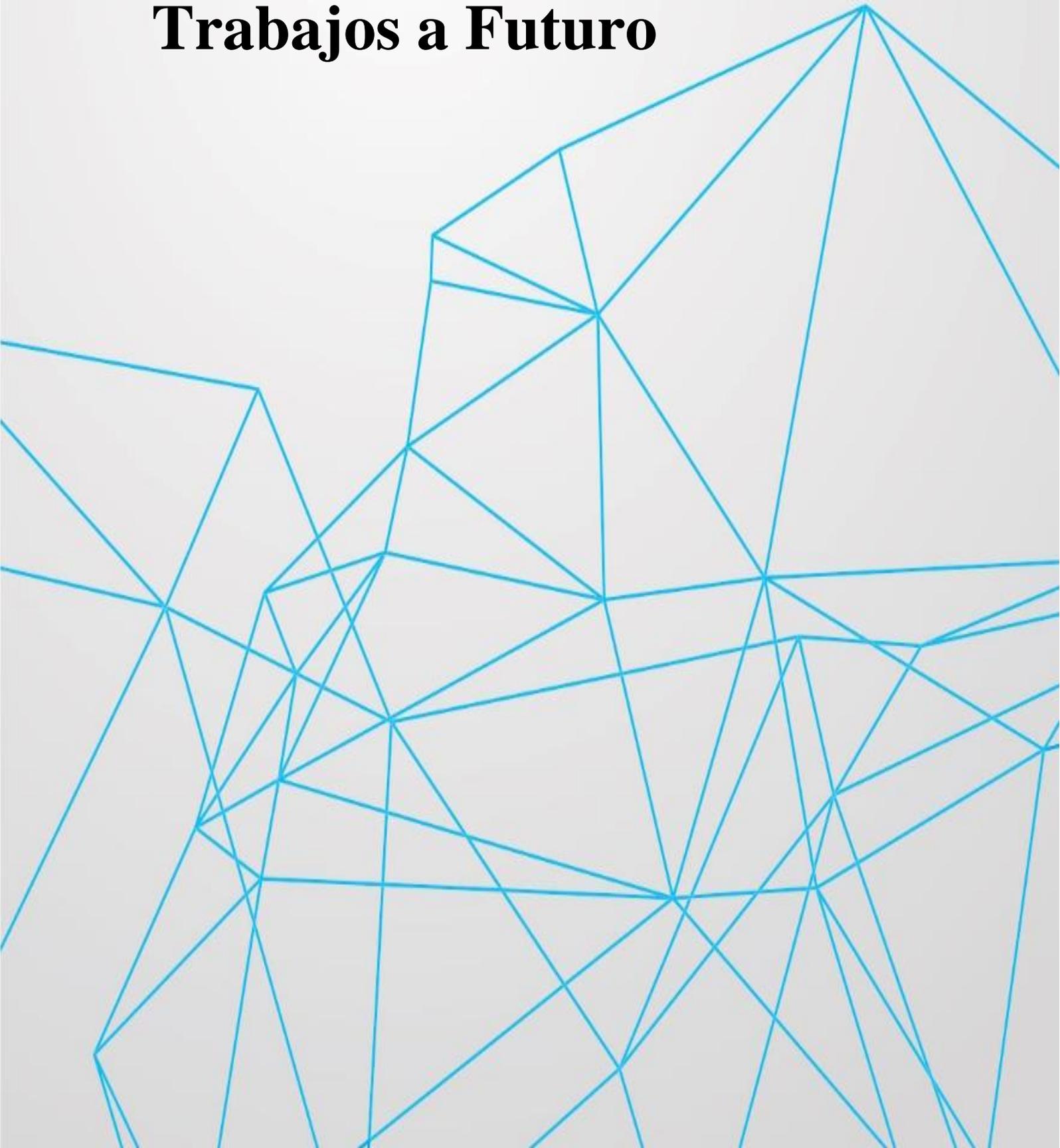
$\frac{g}{cm^3}$	ΔP_{Total}
Sin aditivo	0,59
CNT 0,25%	0,18
CNT 0,5%	0,31
CNT 1 %	0,16

Entonces, la incertidumbre relativa es:

Tabla 36. Los errores relativos son expresados en porcentajes para cada probeta de cemento Sol con diferente porcentaje de CNT.

	$\Delta P_{Relativa}$
Sin aditivo	11%
CNT 0,25%	3,0%
CNT 0,5%	5,0%
CNT 1 %	2,4%

Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos a Futuro



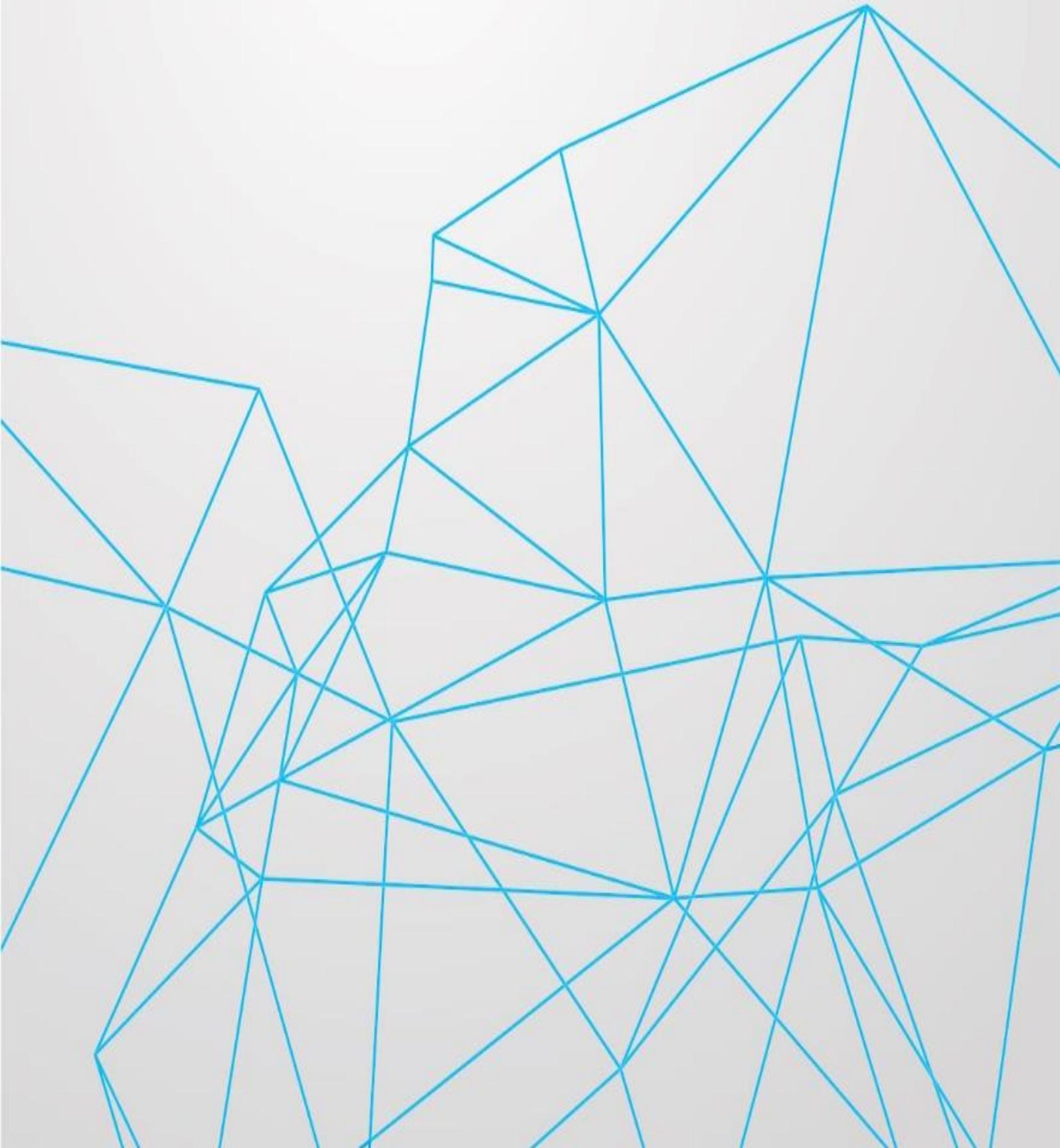
1. Conclusiones

- Se pudo preparar probetas con buenas aplicaciones, pero se concluye que debe mejorarse el proceso de preparación para encontrar un mejor método de dispersión de los CNT en el concreto.
- Se concluye que los poros tienen gran responsabilidad en la permeabilidad del CO₂ tanto en las pastas de cemento como morteros ya que si estos disminuyen aumentará la impermeabilidad y si aumenta la porosidad sucederá lo contrario.
- Los CNT tienen la capacidad de adherirse en las imperfecciones y su valor óptimo es aproximadamente el 0,5% en el cual se concluye que tanto para pasta de cemento como para morteros los CNT aumentan la impermeabilidad a diferencia de los aditivos convencionales con los que se trabajó los cuales la disminuyen.
- Se concluye del trabajo realizado que los efectos, donde las condiciones son las mismas, de los aditivos tanto en pastas de cemento como en morteros dan como resultado el mismo efecto.
- El ajuste encontrado para pasta de cemento, mortero con o sin aditivo es mediante la función $y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (\frac{x}{x_0})^p}$ ya que los coeficientes de correlación para todas las muestras son próximos a 1.
- Las probetas con CNT aumentan sus propiedades mecánicas a medida que se aumenta la concentración de CNT llegando a ser el 1% el porcentaje máximo el cual generó un aumento del 30% comparado con las probetas sin aditivo con lo que se concluye que las propiedades mecánicas de las probetas con CNT no dependen en gran medida de la porosidad sino de la unión de los CNT con las estructuras del concreto.
- Los compuestos encontrados en las pastas de cemento luego de la carbonatación son la portlandita y calcita donde su estructura cristalina en ambas es hexagonal.
- La resistividad depende inversamente a la porosidad de las probetas concluyendo de forma cualitativa que las pruebas eléctricas en probetas con CNT tienen mayor porosidad que las probetas sin aditivo.

2. Trabajos a Futuro

Los trabajos a futuro serán un mejoramiento en el proceso de fabricación de probetas con CNT para encontrar una mejor dispersión y aumentar el porcentaje de la misma. También se relacionará la resistividad eléctrica con la carbonatación por la dependencia que tienen ambos en la porosidad de probetas. Por otro lado, se debe relacionar las propiedades mecánicas y eléctricas mediante la propiedad de piezoresistencia que tienen los CNT esto traerá como consecuencia que los CNT se comporten como nano-sensores en el concreto.

Capítulo 6: Bibliografía



- [1] Paiva MC, Zhou B, Fernando KAS, Lin Y, Kennedy JM, Sun YP. Mechanical and morphological characterization of polymer carbon nanocomposites from functionalized carbon nanotubes. *Carbon* 2004; 42:2849–54.
- [2] Yang BY, Shi JH, Pramoda KP, Goh SH. Enhancement of the mechanical properties of polypropylene using polypropylene-grafted multiwalled carbon nanotubes. *Compos Sci Technol* 2008; 68:2490–7.
- [3] Moniruzzaman M, Winey KI. Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *Macromolecules* 2006; 39:5194205.
- [4] CMP-Cientifica _ 2003 CMP-Cientifica. <http://www.cmp-cientifica.com>.
- [5] <http://www.chema.com.pe/HT%20CHEMA%20PLAST%20V02.2018.pdf>
- [6] https://per.sika.com/content/peru/main/es/solutions_products/mercados_sika/sika-aditivos-concreto/02a001/02a001sa02/02a001sa02101.html
- [7] Pommer, K. and C. Pade, Guidelines- uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete. Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark. ISBN: 87 7756- 757- 9. 2005.
- [8] Taylor, H.F.W., *Cement chemistry*. Second edition. 1997, London: Thomas Telford.
- [9] ASTM C150 / C150M – 09. ESPECIFICACIÓN normalizada para Cemento Portland.
- [10] Nonat, A., The structure and stoichiometry of C- S- H. *Cement and Concrete Research*, 2004. 34(9): p. 1521- 1528.
- [11] Instrucción para la recepción de cementos RC- 08. Real Decreto 956/2008.
- [12] Michael S. Mamlouk, John P. Zaniewski. *Materiales para Ingeniería Civil*. Segunda Edición. 211-247.
- [13] https://conred.gob.gt/site/normas/NRD3/1_CEMENTO/2_NORMA_NTG_41003h4_ASTM_c109-c109m-11_b.pdf.
- [14] Venuat, M., Relation entre la carbonatation du beton et les phenomenes de corrosion des armatures du beton, in *Rencontres CEFRACOR 77*. 1977: Paris, France.
- [15] Pihlajavaara, S.E., Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste. *Materials and Structures*, 1968. 1(6): p. 521- 527.
- [16] Dewaele, P.J., E.J. Reardon, and R. Dayal, Permeability and porosity changes associated with cement grout carbonation. *Cement and Concrete Research*, 1991. 21(4): p. 441- 454.
- [17] Papadakis, V.G., C.G. Vayenas, and M.N. Fardis, Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *ACI Materials Journal*, 1991. 88(2): p. 186- 196.
- [18] Houst, Y.F. and F.H. Wittmann, Influence of porosity and water content the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. *Cement and Concrete Research*, 1994. 24(6): p. 1165- 1176.
- [19] Claisse, P.A., H. El- Sayad, and I.G. Shaaban, Permeability and pore volume of carbonated concrete. *ACI Materials Journal*, 1999. 96(3): p. 378- 381.
- [20] Johannesson, B. and P. Utgenannt, Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 2001. 31(6): p. 925- 931.
- [21] Gonen, T. and S. Yazicioglu, The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*, 2007. 21(5): p. 1040- 1045.
- [22] Fattuhi, N.I., Concrete carbonation as influenced by curing regime. *Cement and Concrete Research*, 1988. 18(3): p. 426- 430.
- [23] Dhir, R.K., P.C. Hewlett, and Y.N. Chan, Near- surface characteristics of concrete. Prediction of carbonation resistance. *Magazine of Concrete Research*, 1989. 41(148): p. 137- 143.

- [24] Ngala, V.T. and C.L. Page, Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1997. 27(7): p. 995- 1007.
- [25] Ho, D.W.S. and R.K. Lewis, Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*, 1987. 17(3): p. 489- 504.
- [26] Kobayashi, K. and Y. Uno, Influence of alkali on carbonation of concrete, part I. Preliminary tests with mortar specimens. *Cement and Concrete Research*, 1989. 19(5): p. 821- 826.
- [27] Verbeck, G.J., Carbonation of hydrated Portland cement. ASTM Special Technical Publication, 1958. 205: p. 17- 36.
- [28] Houst, Y.F. and F.H. Wittmann, Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. *Cement and Concrete Research*, 2002. 32(12): p. 1923- 1930.
- [29] Al- Kadhimi, T.K.H., et al., An accelerated carbonation procedure for studies on concrete. *Advances in Cement Research*, 1996. 8(30): p. 47- 59.
- [30] Sanjuán, M.A., C. Andrade, and M. Cheyrezy, Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research*, 2003. 15(4): p. 171- 180.
- [31] Castellote, M., et al., Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. *Materials and Structures*, 2009. 42(4): p. 515- 525.
- [32] Anstice, D.J., C.L. Page, and M.M. Page, The pore solution phase of carbonated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35(2): p. 377- 383.
- [33] UNE- EN 13295:2005. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación.
- [34] Yu MF, Lourie O, Dyer MJ, Moloni K, Kelly TF, Ruoff RS. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science* 2000; 287(5453):637–40.
- [35] Peng B, Locascio M, Zapol P, Li S, Mielke SL, Schatz GC, et al. Measurements of near-ultimate strength for multiwalled carbon nanotubes and irradiationinduced crosslinking improvements. *Nat Nanotechnol* 2008; 3(10):626–31.
- [36] Filleter T, Bernal R, Li S, Espinosa HD. Ultrahigh strength and stiffness in crosslinked hierarchical carbon nanotube bundles. *Adv Mater* 2011; 23(25):2855.
- [37] Ajayan PM. Nanotubes from carbon. *Chem Rev* 1999; 99:1787–99.
- [38] Salvétat J-P, Bonard J-M, Thomson NH, Kulik AJ, Forro L, Benoit W, et al. Mechanical properties of carbon nanotubes. *Appl Phys Mater Sci Process* 1999; 69:255–60.
- [39] Srivastava D, Wei C, Cho K. Nanomechanics of carbon nanotubes and composites. *Appl Mech Rev* 2003; 56:215–30.
- [40] Chang T-P, Shih J-Y, Yang K-M, Hsiao T-C. Material properties of Portland cement paste with nano-montmorillonite. *J Mater Sci* 2007; 42(17):7478–87.
- [41] Kuo W-Y, Huang J-S, Lin C-H. Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. *Cem Concr Res* 2006; 36(5):886–95.
- [42] Makar JM, Margeson J, Luh J. Carbon nanotube/cement composites – early results and potential applications. In: Banthia N, Uomoto T, Bentur A, Shah SP, editors, *Proceedings of 3rd international conference on construction materials: performance, innovations and structural implications*. Vancouver, BC August 22–24; 2005. P. 1–10.
- [43] <https://www.cheaptubes.com/product/helical-multi-walled-carbon-nanotubes/>
- [44] Pihlajavaara, S.E. and E. Pihlman, Effect of carbonation on microstructural properties of cement stone. *Cement and Concrete Research*, 1974. 4(2): p. 149- 154.
- [45] Ho, D.W.S. and R.K. Lewis, Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and*

- Concrete Research, 1987. 17(3): p. 489- 504.
- [46] Método de prueba estándar para pH de Químicamente limpiado o superficies de concretos grabados al agua fuerte. ASTM D4262 – 05 (2012).
- [47] www.pasco.com/file_downloads/DOWNLOADS_Manuals/languages/Spanish/PS-2110%20012-14330C-SP.pdf.
- [48] www.pasco.com/file_downloads/Downloads_Manuals/PASPORT-Humidity-Temp-Dew-Point-Sensor-Manual-PS-2124A.pdf.
- [49] B. Cullity, S. Stock, Elements of X-Ray Diffraction, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, (2001) 402– 404.
- [50] http://tudistribuidoronline.com/sites/default/files/especificaciones-tecnicas/chemamegaplast_ficha_tecnica.pdf
- [51] https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_318-05_Espanhol.pdf.
- [52] UNE 112- 011:1994. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.
- [53] UNE- EN 14630:2007. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína.
- [54] Rebolledo, N. R. Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco. Madrid, España: Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid 2010.
- [55] R Corral Higuera, S.P Arredondo-Rea, M.A Neri Flores, J.M Gómez-Soberón, J.L Almaral Sánchez, J.H Casterona González, A. Martínez Villafane, F. Almeraya Calderón. Chloride Ion Penetrability and Corrosion Behavior of Steel in Concrete with Sustainability Characteristics 2011.
- [56] <http://www.periodni.com/es/c.html>.
- [57] Joseph H. Koo, Polymer Nanocomposites, Department of Mechanical Engineering The University of Texas at Austin, Texas, USA (2006).
- [58] Gladys D.A. De Biasioli, Catalina D.S. DE Weitz, con el asesoramiento didactico de Beatriz B. De Diaz Sarubbi, "Química General e Inorgánica", 2d ed., kapelusz, Buenos Aires, Argentina, 1981.
- [59] Gonzalo Otero, Fullerenes from aromatic precursors by surface-catalysed cyclodehydrogenation, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC), Cantoblanco, 28049 Madrid, Spain (2008).
- [60] <http://www.uam.es/departamentos/ciencias/quimica/>.
- [61] Alcca Qispe Fernando, "Estructura y Síntesis de nanotubos de carbono", Lima, Peru, 2005. http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/Basic/alcca_qf/.
- [62] <http://www.jcrystal.com/>.
- [63] <http://mardolin.blogspot.com/2008/02/trabajo-nanotubos-de-carbono.html>.
- [64] <http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/diccionario/nanotubos.htm>.
- [65] <http://www.rediris.es/list/info/nanotubos.es.html>.
- [66] <http://www.periodni.com/es/c.html>.
- [67] Giovanni Alberto García Rodríguez, Yesid Gabriel Jarma Aliz, Diego Alejandro Pulido Olaya, David Eduardo Vargas Sarmiento, "Los Nanotubos De Carbono".
- [68] http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_elasticidad.
- [69] Andrea Eunice Rodas Morán, "Compilación Monográfica De Información Acerca De Un Proyecto De Desarrollo Científico Y Tecnológico De La Nanotecnología En Guatemala", Guatemala, 2008. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_8547.pdf.
- [70] Jianwei Che*, Tahir Cagin, and William A. Goddard III, "Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes" California, Estados Unidos, 2005. <http://www.nanodot.org/Conferences/MNT7/Papers/Che/index.html>.

- [71] E. Fages. Investigación de fibras de polipropileno aditivadas con nanopartículas de plata para la mejora de propiedades bioactivas en el sector textil, tesis doctorado, Universidad Politécnica De Valencia, (2013).
- [72] P. Ramos, J. Rodríguez, Nanoestructuras de ZnO-TiO₂ preparadas por Electrospinning: Influencia de los precursores en la morfología, estructura y actividad fotocatalítica, Grado titulación de maestro en ciencias con mención en física, Universidad Nacional De Ingeniería (2016).
- [73] Willian D. Callister, Jr., David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering – An Introduction*. 9 ed. 2013, United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 990.
- [74] Isabel Galan García, Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH, p: 62-67, Madrid 2011.
- [75] Arnon Chaipanich*, Thanongsak Nochaiya, Watcharapong Wongkeo and Pincha Torkittikul; Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites; 2009.
- [76] Steven H. Kosmatka, Diseño y Control de Mezcla de Concreto, Portland Cement Association (PCA), Chicago, EEUU 2004