



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO  
PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED  
MÚLTIPLE OXIDADOS (MWCNT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A  
MWCNT's PRÍSTINOS**

**Jazmin Aracelly Cardona Valdez**

Asesorado por la Inga. Marlene Susana Arrechea Alvarado, PhD

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO  
PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED  
MÚLTIPLE OXIDADOS (MWNCT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A  
MWCNT PRÍSTINOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JAZMIN ARACELLY CARDONA VALDEZ**

ASESORADO POR LA INGA. MARLENE SUSANA ARRECHEA ALVARADO,  
PHD

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera.
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE OXIDADOS (MWNCT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A MWCNT PRÍSTINOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 30 de enero de 2018.

**Jazmin Aracelly Cardona Valdez**

Guatemala, septiembre de 2019

Ingeniero  
Williams Guillermo Alvarez Mejia  
Director de Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Ingeniero Williams Alvarez:

Por medio de la presente **HAGO CONSTAR** que he revisado y aprobado el trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE OXIDADOS (MWCNT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A MWCNT's PRÍSTINOS”**, de la estudiante de Ingeniería Química **Jazmin Aracelly Cardona Valdez** quien se identifica con el carné **2013-14249** y **DPI 2729 37894 0101**.

Sin otro particular me suscribo a usted.

Atentamente,

*Marlene Susana Arrechea Alvarado*  
Ingeniera Química  
C. No. 1593  
M. S. N. T. Tecnología

Marlene Susana Arrechea Alvarado  
Ingeniero Químico  
Colegiado No. 1593



Guatemala, 21 de enero de 2020.  
Ref. EIQ.TG-IF.002.2020.

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **064-2017**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL**

Solicitado por el estudiante universitario: **Jazmin Arcelly Cardona Valdez**.  
Identificado con número de carné: **2729378940101**.  
Identificado con registro académico: **201314249**.  
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.  
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE OXIDADOS (MWCNT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A MWCNT's PRÍSTINOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Marlene Susana Arrechea Alvarado, profesional de la Ingeniería Química**

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



C.c.: archivo

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

Mercedes Esther Roquel Chávez  
Profesional de la Ingeniería Química  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación







Ref.EIQ.TG.010.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, de la estudiante, **JAZMIN ARACELLY CARDONA VALDEZ** titulado: **“EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE OXIDADOS (MWCNT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A MWCNT's PRÍSTINOS”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*“Id y Enseñad a Todos”*



Ing. Williams G. Álvarez Mejía; M.I.Q., M.U.I.E  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, marzo de 2020

Cc: Archivo  
WGAM/ale





Ref. DTG.105-2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO TIPO PORTLAND CON DIFERENTES DOSIS DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE OXIDADOS (MWCNT's OX) Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON RESPECTO A MWCNT's PRÍSTINOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Jazmin Aracelly Cardona Valdez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, marzo de 2020.

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser lo más importante en mi vida, no sería nada ni nadie sin su amor; por su gracia tengo este logro, a Él sea toda la gloria y la honra.
- Mis padres** Roberto Cardona y Gloris Valdez de Cardona, por su gran esfuerzo, paciencia y su infinito apoyo incondicional en cada etapa de mi carrera, su amor me ayudó a conseguir este logro.
- Mi hermana** Martha Cardona, por ser mi gran ejemplo de luchar por lo que quiero, por su amor, paciencia y apoyarme incondicionalmente en cada momento.
- Mis abuelos** Bruno Cardona, Martha de Cardona, Flavio Valdez y Raquel de Valdez, porque sus oraciones nunca faltaron ni su apoyo en este proceso.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser la institución que me dio este logro, por la formación que me brindaron, por cada experiencia y los conocimientos.

**Facultad de Ingeniería**

Por ser la principal fuente de enseñanza, por la responsabilidad que tienen con cada estudiante, por su dedicación y trabajo en hacernos crecer profesionalmente, por las instalaciones que nos prestan como un segundo hogar.

**Asesora Susana  
Arrechea**

Por su tiempo, apoyo, dedicación, esfuerzo en cada consejo y enseñanza que me compartió para esta etapa final de mi formación

**Cementos Progreso  
CETEC**

Por su total apoyo, por darme la oportunidad de realizar este proyecto que será de beneficio para ellos, también a todo el equipo del laboratorio físico y químico, por su apoyo incondicional en cada etapa del proyecto.

**Universidad del Valle  
de Guatemala**

Por el apoyo y oportunidad de utilizar sus equipos del laboratorio de análisis instrumental.

## **Mis amigos**

Por su apoyo y compañía en este camino, porque siempre han estado cuando más los he necesitado.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación .....	8
1.3. Determinación del problema.....	10
1.3.1. Definición .....	11
1.3.2. Delimitación .....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Nanotecnología .....	13
2.1.1. Historia de la nanotecnología .....	13
2.1.2. Nanopartículas.....	16
2.1.3. Nanotecnología en la construcción.....	17
2.2. Nanotubos de carbono .....	17
2.2.1. Formas alotrópicas del carbono.....	18
2.2.2. Estructura de los nanotubos de carbono .....	19
2.2.3. Tipos de nanotubos de carbono .....	19
2.2.4. Propiedades de nanotubos de carbono .....	20



2.3.	Cemento.....	22
2.4.	Funcionalización de nanotubos de carbono .....	23
2.4.1.	Funcionalización covalente .....	24
2.4.2.	Funcionalización no-covalente .....	24
2.4.3.	Oxidación de nanotubo de carbono.....	25
2.4.4.	Nanotubos en cemento tipo Portland .....	26
2.4.5.	Defectos o incertezas de los nanotubos de carbono .....	26
2.5.	Técnicas de caracterización.....	27
2.5.1.	Difracción de rayos X .....	27
2.5.1.1.	Proceso de rayos X .....	28
2.5.2.	Espectroscopia infrarroja.....	29
2.5.3.	Espectrometría Raman .....	31
2.5.4.	Análisis químico .....	32
2.5.4.1.	Análisis elemental .....	33
2.5.4.2.	Espectroscopia óptica atómica.....	33
2.5.5.	Análisis termogravimétrico .....	33
2.5.6.	Análisis del microscopio electrónico de barrido (SEM) .....	34
3.	METODOLOGÍA .....	37
3.1.	Variables .....	37
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	38
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	38
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	39
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	41
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	43
3.7.	Formato de toma de datos originales .....	48

3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	49
3.9.	Análisis estadístico .....	50
3.10.	Plan de análisis de los resultados .....	53
3.11.	Programas por utilizar en el análisis de los datos.....	53
4.	RESULTADOS .....	55
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES .....	65
	RECOMENDACIONES .....	67
	BIBLIOGRAFÍA .....	69
	APÉNDICES .....	75



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Tipos de nanotubos de carbono por estructura.....	20
2.	Tipos de funcionalización de nanotubos de carbono .....	25
3.	Característica de la técnicas de difracción de rayo X, electrones y neutrones .....	28
4.	Difractograma que corresponde a una muestra de nanotubos oxidados.....	29
5.	Tipos de vibraciones moleculares .....	30
6.	Espectros FT-IR de los NTC expuestos a un plasma de CO2 durante 15, 30 y 60min.....	31
7.	Tipos de vibraciones moleculares .....	35
8.	Espectros FT-IR de los MWNTC's-OX, expuestos por medio de pastilla de KBr .....	55
9.	Diagrama análisis termogravimétrico (TGA) de nanotubos de pared múltiple oxidados .....	56
10.	Comparación del análisis termogravimetrico entre los nanotubos de carbono de pared múltiple oxidados (MWNTC's OX) y nanotubos de carbono de pared múltiple prístinos .....	57
11.	Difractograma de nanotubos de carbono de pared múltiple oxidados (MWNTC's OX) y nanotubos de carbono de pared múltiple prístinos .....	57
12.	Resistencia mecánica (psi) de una mezcla de cemento UGC con dosificaciones de 0,01 %, 0,03 % y 0,05 % (m/m) de MWNTC's-OX, en comparación con una mezcla control.....	58



13.	Comparación de resistencia mecánica (psi) de una mezcla de cemento UGC con dosificaciones de 0,01 %, 0,03 % y 0,05 % (m/m) de MWNCT's-OX y MWNCT's-prístinos .....	59
14.	Comparación de resistencia mecánica en dosificación de 0,05 % (m/m) .....	60

## TABLAS

I.	Cronología de la nanotecnología .....	14
II.	Propiedades generales de nanotubos de carbono (A).....	21
III.	Propiedades generales de nanotubos de carbono (B).....	22
IV.	Variables independientes y variables dependientes .....	37
V.	Caracterización de nanotubos de carbono funcionalizados por con oxidación (espectroscopia infrarroja) .....	48
VI.	Caracterización de nanotubos de carbono funcionalizados por oxidación (análisis termogravimétrico).....	48
VII.	Caracterización de nanotubos de carbono funcionalizados por oxidación (análisis de difracción) .....	48
VIII.	Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento con diferentes dosificaciones.....	49
IX.	Número de tratamientos y número de repeticiones, para la caracterización de los nanotubos de carbono funcionalizados .....	50
X.	Número de tratamientos y número de repeticiones, para la evaluación de resistencia mecánica de la mezcla de cemento tipo Portland .....	51
XI.	Bandas de absorción en el espectro FTIR de los MWCNT's-OX .....	55
XII.	Moléculas formadas por átomos de nanotubo de carbono por medio de la pérdida de peso conforme a la temperatura .....	56

XIII.	Porcentaje mayor de resistencia que supera la mezcla de cemento UGC con dosificaciones de MWNTC´s .....	58
XIV.	Porcentaje mayor de resistencia que supera la mezcla de cemento UGC con dosificaciones de nanotubos de carbono .....	59
XV.	Análisis estadístico entre las resistencias que añaden la muestra con MWNTC´s-OX o MWNTC´s-prístinos .....	60



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido sulfúrico
<b>HNO<sub>4</sub></b>	Ácido peroxinitrico
<b>Blnk</b>	Blanco
<b>f</b>	Coeficiente de Fisher
<b>R</b>	Coeficiente de Pearson
<b>C</b>	Concentración
<b>Ctrl</b>	Control
<b>FT-IR</b>	Espectrometría infrarroja
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>X</b>	Media
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minutos
<b>M</b>	Muestra
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>NTC's</b>	Nanotubos de carbono
<b>MWNTC's</b>	Nanotubos de carbono múltiple capa
<b>SWNTC's</b>	Nanotubos de carbono simple capa
<b>N</b>	Newton
<b>O<sub>3</sub></b>	Oxígeno
<b>CO<sub>2</sub></b>	Óxido de carbono
<b>Pp</b>	Páginas



<b>KMnO<sub>4</sub></b>	Permanganato de potasio
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Peróxido de hidrógeno
<b>%</b>	Porcentaje
<b>R</b>	Repetición
<b>θ</b>	Teta
<b>T</b>	Temperatura
<b>σ</b>	Varianza

## GLOSARIO

<b>Aditivos</b>	Sustancia que se añade a una mezcla de cemento para aportarle un aumentar cualidades como durabilidad, trabajabilidad o resistencia.
<b>ASTM</b>	<i>American Society of Testing Materials.</i>
<b>Caracterización</b>	Estudio que se le realiza a la muestra con la que se trabajará, para observar o identificar estructura, composición o identidad de la muestra.
<b>Cemento</b>	Producto resultante de la mezcla de piedra caliza, sílice, magnesio, aluminio, flúor, trióxido de azufre y aditivos, el cual es utilizado como material para la construcción.
<b>Cemento tipo Portland</b>	Tipo de cemento más utilizado en la construcción por su fraguado, es un cemento hidráulico, capaz de aumentar su resistencia al colocar aditivos.
<b>CETEC CI+D</b>	Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

<b>Coloidal</b>	Sistema o dispersión, formado en dos o más fases, principalmente una continua, normalmente fluida y una dispersa en forma de partículas.
<b>CONCYTEC</b>	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
<b>Curado</b>	Proceso por el que pasa el cemento para realizar su tiempo de fraguado dando un aseguramiento de la hidratación y endurecimiento por medio de la temperatura y humedad.
<b>Fraguado</b>	Proceso final que se espera del cemento, el cual al mezclarse con agua se espera a que en un tiempo este empiece a endurecer.
<b>Funcionalización</b>	Modificación superficial o pretratamiento superficial, en el cual consiguen diferentes propiedades físicas o químicas.
<b>Funcionalización covalente</b>	Mejoramiento de propiedades en la formación de enlaces covalentes.
<b>Hidrofilicidad</b>	Tendencia a interactuar con el agua, es la facilidad de enlazarse temporalmente con el agua.
<b>Mortero</b>	Compuesto de conglomerantes inorgánicos, agregados finos y agua (mezcla de cemento con aditivos).

<b>Nanopartícula</b>	Partícula de tamaño calculada en nanómetros, con un amplio aporte y variedad de aplicaciones potenciales.
<b>NTG</b>	Normas técnicas guatemaltecas.
<b>Prístinos</b>	Materiales inalterados o puros, en este caso, son nanotubos sin ningún daño en su estructura.
<b>Resistencia mecánica</b>	Medición importante en el cemento que determina la capacidad de resistir a las fuerzas aplicadas.
<b>Sorción</b>	Retención de una sustancia por otra cuando estén en contacto. Como operaciones de absorción, adsorción o intercambio iónico.
<b>TGA</b>	Análisis de termogravimetría.
<b>XRD</b>	Análisis de difracción.



## RESUMEN

Se evaluó la resistencia mecánica de una mezcla de cemento tipo Portland, con nanotubos de carbono de pared múltiple oxidados (MWCNT's-OX) en dosificaciones de 0,01, 0,03 y 0,05 % (w/w). Se caracterizó la muestra de nanotubos de carbono utilizando las técnicas de espectrometría infrarroja (FTIR), termogravimetría (TGA) y análisis de difracción (XRD). El análisis de TGA determinó la estabilidad térmica de las muestras entre 25-1 000 °C y se analizó el grado de funcionalización de los MWNTC's-OX, a través una relación entre el porcentaje pérdida de masa y el peso molecular de los grupos, estableciendo una relación de un grupo hidroxilo (OH) por cada 3 326 átomos de carbono en la pared del nanotubo.

Por medio del análisis de difracción, se observó que la muestra de MWNTC's-OX tiene una intensidad máxima en el pico 002 en el número entero  $2\pi / CO$ , 25°. Esta intensidad se debe al tratamiento de oxidación, muestra así una ganancia de múltiples especies cristalinas.

Se realizó la evaluación de resistencia mecánica de las muestras de cemento a los 3, 7 y 28 días de edad de fraguado según la norma ASTM 41003, utilizando cinco muestreos en moldes de especímenes cúbicos formando morteros. Posteriormente, se evaluaron las propiedades de resistencia mecánica y con los datos obtenidos se realizaron gráficas de control para determinar los mayores valores para un análisis comparativo entre las resistencias mecánicas de cada mezcla.

Se concluye que los MWNTC's añaden más resistencia al cemento tipo Portland, pero en el análisis comparativo como resultado los MWNTC's-prístinos presentan hasta un 10,57 % más de resistencia que los MWCNT's-OX.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar la resistencia mecánica de cemento tipo Portland con diferentes dosis de MWCNT's-OX mediante una metodología tradicional y desarrollar un análisis comparativo con MWCNT's-prístinos.

### **Específicos**

1. Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los nanotubos de carbono funcionalizados por medio de las técnicas de espectrometría infrarroja (FT-IR), termogravimetría (TGA) y análisis de difracción (XRD).
2. Evaluar las propiedades mecánicas del cemento tipo portland al añadir nanotubos de carbono oxidados en una dosificación de 0,01, 0,03 y 0,05 %.
3. Determinar por medio de un análisis comparativo de resistencia mecánica entre una mezcla de cemento tipo portland con MWNCT's-OX y MWCNT's-prístinos sin funcionalizar.



## HIPÓTESIS

- Hipótesis conceptual

Determinar el efecto de resistencia mecánica en el cemento tipo Portland al agregar MWNTC's-OX o MWNTC's-prístinos en dosificaciones de 0,01, 0,03 y 0,05 % a 3, 7 y 28 días de curado.

- Hipótesis estadística

### Hipótesis nula

H0: los resultados de resistencia mecánica obtenidos por una mezcla de cemento tipo Portland (UGC) adicionados con MWCNT's-OX no varían significativamente con los de resistencia mecánica obtenidos por medio de una mezcla de cemento tipo Portland (UGC) adicionada con MWCNT's-prístinos.

$$H_0: X_{T_x} = X_{T_y} = 0$$

### Hipótesis alternativa

H1: los resultados de resistencia mecánica obtenidos por una mezcla de cemento tipo Portland (UGC) adicionados con MWCNT's-OX varían significativamente con los resultados de resistencia mecánica obtenidos por medio de una mezcla de cemento tipo Portland (UGC) adicionados con MWCNT's-prístinos.

$$H_1: X \neq X \neq 0$$

## INTRODUCCIÓN

Este estudio evalúa la resistencia mecánica de morteros de cemento tipo Portland con distintas dosis de nanotubos de carbono.

El cemento tipo Portland es una mezcla de hormigón de agua, áridos y fibras de acero. Este tipo de cemento es especial para utilizarlo en concreto general, para la construcción de edificios, estructuras industriales, condominios entre otros. El beneficio que tiene este tipo de mezcla es que genera más calor de hidratación a comparación de otros. Actualmente se investigan nuevos tipos de aditivos para mejorar la resistencia mecánica del cemento y para ello los nanomateriales han sido de gran interés para la comunidad científica.

Los nanotubos de carbono son de forma cilíndrica, existen diferentes tipos por su estructura en función a las capas de grafito que lo forman, pueden ser de SWNTC's o MWNTC's. Son sometidos a una síntesis de formación en donde se estudia la estructura, tipo, propiedades y purificación. Para el mejoramiento de sus propiedades se realizan funcionalizaciones que se encargan de modificar su estructura.

En este proyecto se utilizaron MWNTC's, los cuales fueron funcionalizados por medio de la metodología tradicional de síntesis con ácido sulfúrico y peróxido de sodio, obteniendo MWNTC's-OX. La oxidación rompe los enlaces del nanotubo de carbono formando enlaces covalentes. Se ha mostrado que este material es adherente a la muestra de cemento, esta funcionalización se realiza en las paredes del nanotubo de carbono, ayudando a incrementar la afinidad de nanoestructura con otros materiales y mejorar su reactividad química con otras moléculas.

---

<sup>1</sup> ARQHYS. 12. Tipos de cemento portland. *Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS*. <http://www.arqhys.com/arquitectura/tipos-cemento-portland.html>.

Dicha funcionalización se estudió por medio de técnicas de caracterización, aquí se utilizó espectroscopia infrarroja que se encarga de analizar la estructura del nanotubo en un estado vibracional emitiendo energía, obteniendo así el valor de la concentración de los grupos orgánicos formados sobre los nanotubos al ser funcionalizados.

Además, se emplearon técnicas de análisis termogravimétrico que implican:

Determinar la estabilidad térmica en función del peso de la muestra, se conoce teóricamente que la temperatura es inversamente proporcional al peso y directamente proporcional al diámetro del nanotubo funcionalizado. Con este análisis también se calculó el número de moléculas funcionalizadas por cada átomo de carbono. Así mismo, también se realizó el análisis de difracción el cual se encarga de observar la estructura y las fases en las que están compuestos los nanotubos.<sup>2</sup>

Al realizar la mezcla de cemento tipo Portland se agregaron dosificaciones de 0,01, 0,03 y 0,05 % de MWNTC´s-OX, estos nanotubos presentaron una mejor absorción de agua y una resistencia mayor. Se logró mejorar el valor de la resistencia mecánica, la cual se midió experimentalmente por medio del ensayo universal de 3, 7 y 28 días. Se utilizó cinco muestreos en moldes de especímenes cúbicos siguiendo los parámetros establecidos por la norma ASTM 41003.

Al obtener los resultados se realizó un análisis comparativo, en el cual se identifica que los MWNTC´s-OX presentan un fuerte comportamiento hidrofílico y no tienen la capacidad de crear refuerzos con puentes para evitar las grietas, por lo que los MWNTC´s prístinos sí presentan esa capacidad, por lo cual dan mayor resistencia.

---

<sup>2</sup> VIZUETE MEDRANO, María. Repositorio universitario institucional de recursos abiertos. *Diseño y síntesis de nanotubo de carbono y nanocuernos de carbono con aplicaciones optoelectrónicas*, <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/9151>.

La importancia en la calidad de los materiales de construcción corresponde a la responsabilidad de su utilización, son las cualidades que tiene un producto las cuales satisfacen las necesidades del cliente, la calidad puede ser medida conforme a los parámetros en la química y física del producto. En Cementos Progreso monitorean la calidad desde la producción del clinker colocando el valor del C3S como variable principal, para obtener la resistencia mecánica que ellos ofrecen a sus clientes.

Una empresa productora de cemento debe estar ligada al cumplimiento de las normas ASTM (*International American Society or Testing and Materials*), organización internacional que vela por el desarrollo de las normas aplicadas a la construcción, a las cuales están ligadas las normas NTG (norma técnica guatemalteca) que incluye la denominación propia de las normas guatemaltecas. Estas normas se utilizan para la innovación en investigaciones proyectos de desarrollo, tomando el cumplimiento en los sistemas de calidad y comprobación.



# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1. Antecedentes

Se han realizado los siguientes estudios en la temática de hormigón:

En enero de 2019 la editorial El Sevier publicó el artículo *Research progress on CNTs/CNFs-modified cement-based composites – A review*, escrito por Tao Shi, Zexin Li Hao Gong, Chunping Gu y Jian Guo. Esta investigación fue realizada en Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Universidad de Tecnología de Zhejiang, Hangzhou, China. El estudio consiste en analizar cómo mejora el cemento al adicionarle nanotubos de carbono (CNT) y nanofibras de carbono (CNF) los cuales están atrayendo una gran atención debido a la estructura única y las excelentes propiedades que contienen.

El estudio fue realizado a base de ensayos en los cuales se practicaron métodos de dispersión de los CNT y CNF, estos son llevados a compuestos basados en la recombinación con cemento. Se miden los cambios que realizan en la propiedad de durabilidad, conductividad térmica y la conductividad eléctrica aportada al cemento.

Como resultado se obtuvo que en resistencia a la presión y a la flexión se tiene un aumento del 20 %, también aumenta la conductividad térmica y eléctrica. Se analizó la eficacia de los CNT/CNF para acelerar la hidratación del cemento sin obtener hallazgos.

En conclusión, gran parte del material a base de cemento en el aspecto de microestructura, observa un buen comportamiento adhesivo entre CNT / CNF. Los CNT / CNF pueden llenar las grietas y poros en la matriz de cemento, dando como resultado una menor porosidad y material más denso. Por otra parte, la presencia de los CNT / CNF pueden transferir el estrés que actúa sobre ellos.

En febrero de 2019, *Indian Academy of Sciences*, publicó un estudio llamado *Influence of functionalized MWCNT on microstructure and mechanical properties of cement paste*, escrito por Mohammad Ali Mousavi y Ali Bahari, la cual fue desarrollada en Departamento de Física, Universidad de Mazandaran, Babolsar, Irán. Esta investigación se basó por los estudios sobre aplicaciones de nanotecnología en la industria de la construcción, están buscando una solución para reducir el uso de cemento y, por consiguiente, para reducir la emisión de contaminantes en el ambiente.

Por eso se realizó la investigación llevando a ensayos de resistencia mecánica y caracterización una mezcla de cemento con adición de MWCNT-OX en relaciones de 0, 0,025, 0,05, 0,1 y 0,2 (% en peso).

Se obtuvieron los resultados por medio de las propiedades mecánicas y microestructurales de la pasta de cemento endurecida mediante el uso de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD), polvo X, microscopio electrónico de barrido (SEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM). Los resultados muestran que la sustitución del cemento por el 0,05 % en peso del nanotubo de carbono funcionalizado, como la cantidad óptima, puede considerarse tanto para mejorar.

En diciembre de 2018, la editorial El Sevier publicó el artículo *Fracture toughness improvement of multi-wall carbon nanotubes/graphene sheets reinforced cement paste*, escrito por Jintao Liu, Jiali Fu, Tongyuan Ni, Yang Yang, los cuales realizaron el estudio en la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Universidad de Tecnología de Zhejiang, Hangzhou, China Laboratorio, clave de estructuras de ingeniería civil y tecnología de prevención y mitigación de desastres de la provincia de Zhejiang, Hangzhou, China. Este estudio se basa en el comportamiento de los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNTs) y grafeno al ser mezclados o adheridos a una pasta de cemento.

Se realizaron ensayos sobre la resistencia a la compresión y la fractura de la pasta de cemento. Con lo cual se obtuvo que la introducción de MWCNT y grafeno puede elevar las propiedades mecánicas de los compuestos. La resistencia a la fractura de la pasta de cemento se incrementó a 54,1 % y 42,6 % respectivamente con la adición de 0,05 % en peso de MWCNT (en peso de cemento). La energía de fractura fue promovida por un 37,0 % con la misma cantidad de grafeno. Con estos resultados pudieron concluir que se forma un efecto puente de los MWCNT, la alta resistencia de unión entre el grafeno y el cemento, también demostraron productos de hidratación, lo que permitió mejorar la transferencia de carga de manera eficiente.

En febrero de 2016 es publicado por la prensa de educación superior el artículo de investigación *Advanced cement based nanocomposites reinforced with MWCNTs and CNFs*, el estudio se realiza en Berlín por los investigadores Emmanuel E. GDOUTOS, Maria S. KONSTA-GDOUTOS, Panagiotis A. DANOGLIDIS, Surendra P. SHAHb. La investigación es sobre materiales cementados reforzados con nanotubos de carbono de múltiples paredes (MWCNT) y nanofibras de carbono (CNF), el estudio consiste en realizar



pruebas de resistencia del cemento, el módulo de Young, la resistencia a la flexión y la fractura que podrían ocasionar en el cemento.

El estudio se hizo con una mezcla de cemento de referencia sin ninguna adición, en comparación con mezclas de cementos reforzados con MWCNT y CNF, estos fueron exhibidos a estudios de propiedades. Como resultados se obtuvo que muestra mejora significativa la mezcla reforzada de cemento, en resistencia a la flexión, con lo que se obtiene un (106 %), módulo de Young un (95 %), tenacidad de flexión un (105 %), longitud de grieta efectiva (30 %).

En agosto de 2015, la Revista brasileña *Alconpat*, Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, publicó un estudio realizado por cuatro investigadores de diferentes universidades de Brasil, C. G. N. Marcondes Universidad Pontificia Católica de Paraná (PUCPR), P. Helene Universidad de São Paulo (USP), M. H. F. Medeiros y J. Marques Filho del Departamento de Construcción Civil, Universidad Federal de Paraná (UFPR). Publicaron resultados acerca de la funcionalidad y compatibilidad de los nanotubos de carbono en una mezcla de hormigón de cemento tipo Portland. Utilizando así un 0,30 % de nanotubos de carbono respecto de la mezcla de cemento, llegando a que la funcionalidad de los nanotubos de carbono es realizar enlaces entre C-H y de esta forma hidratar la mezcla necesitando una presencia mínima de agua.

En junio de 2011, CONCYTEC realiza un estudio de investigación plasmado en un artículo científico, realizado por Víctor J. Cruz Delgado, Carlos A. Ávila- Orta, Odilia Pérez Camacho, Maricela García Zamora, Víctor E., Comparán- Padilla y Franciso J. Medellín Rodríguez, llamado *Funcionalización de nanotubos de carbono para la preparación de nanocompuestos poliméricos*.

El objetivo de este estudio es analizar los métodos convencionales y no convencionales, para la funcionalización de nanoestructuras de carbono.

Para solucionar esta limitación se han desarrollado diferentes metodologías para modificar sus propiedades superficiales y mejorar la compatibilidad entre ambos componentes. Como resultado de este estudio existen diferentes tipos de funcionalización como covalente, no covalente, por métodos no convencionales, polimerización por plasma y polimerización de olefinas. Se concluye que el método de funcionalización covalente no compromete o daña la integridad de las nanopartículas.

En mayo del 2010, el ingeniero Josué Antonio Fernández Véliz en la Universidad de San Carlos de Guatemala de la Facultad de Ingeniería, realizó un estudio de Investigación de tesis para obtener el grado de ingeniero civil, llamado "Diseño y comparación de mezclas artesanales de concreto a base de cemento Portland tipo I, modificado con puzolana [Tipo I (PM)-ASTM C-595/C595M-09-] equivalente a las elaboradas a base de cemento portland [Tipo I-ASTM C150/M150-09-]. El objetivo consiste en realizar un análisis comparativo en dos mezclas de cemento tipo Portland para lograr determinar qué mezcla es más eficiente. El resultado de este estudio es que la mezcla de cemento tipo Portland tipo I (puro) (mezcla A) es considerable con mayor eficiencia ya que la resistencia es mayor a la mezcla de cemento B tipo Portland (PM).

En agosto de 2010, El servidor publicó un artículo realizado por un grupo de investigadores Kevin A. Wepasnick, Billy A. Smith, Kaitlin E. Schrote, Hannah K. Wilson, Stephen R. Diegelman, D. Howard Fairbrother de diferentes universidades de los Estados Unidos, realizaron el artículo para Carbon Paper, titulado *Surface and structural characterization of multi-walled carbón nanotubos following different oxidative treatments*. Se enfocaron en el estudio de diferentes

oxidantes para la funcionalización de nanotubos de carbono (MWNTC's), utilizaron seis metodologías  $\text{HNO}_4$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{O}_3$ .

Los resultados indican que en el caso de los oxidantes  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  se obtiene un alto grado de reproducibilidad en la distribución grupal, en el caso de  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  donde la fracción de cooh varió significativamente ( $54 \pm 15 \%$ ). En otras palabras, los oxidantes más agresivos producen una fracción más grande de grupos funcionales altamente oxidados, en línea con las expectativas de principios químicos básicos. En lo cual también concluyeron que la caracterización por IR no es una técnica efectiva para identificar la presencia o concentraciones de grupos funcionales en MWCNT's.

En septiembre de 2008 la ingeniera Bertha Maria Esparza Esparza en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí de la Facultad de Ciencias, realiza su estudio de investigación-tesis para obtener el grado de maestro en ciencias aplicadas, nombrado *Caracterización de nanotubos de carbono por difracción de rayos X, alta resolución (HR\_XRD)*.

El objetivo consiste en el empleo de la técnica de difracción de rayos X de alta resolución para la caracterización de nanotubos de carbono de una capa y múltiples capas. El resultado de este estudio es proponer un proceso de homogenización y una técnica de análisis en las propiedades estructurales de nanotubos para las aplicaciones industriales, trabajando con un lote completo de homogéneas características estructurales.

En mayo de 2008 la revista Redalyc realiza un estudio con un grupo de investigadores Balandrán Quintana René Renato, Romero Villegas Gabriel Iván, Mendoza Wilson Ana María y Sotelo Mundo Rogerio, llamado *Nanotubos de*

*carbono y bionanotecnología*. El objetivo de este artículo es caracterizar las propiedades de los nanotubos de carbono en las aplicaciones electrónicas, físicas y biológicas, obteniendo así información general de los nanotubos de carbono, como de su estructura, propiedades, síntesis y aplicaciones potenciales. El resultado es que los nanotubos de carbono son muy extensos en teoría, proporcionando así ocho tipos de funcionalizaciones los cuales son: halogenación, cicloadición, adición radical, adición electrolítica, ozonólisis, funcionalización mecanoquímica, activación de plasma e injerto de polímeros.

En enero de 2008, el ingeniero Luis Candelas Ramírez realizó un estudio en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de México: *El concreto masivo*. El objetivo era dar a conocer las características que tiene una mezcla de concreto de una forma sencilla y práctica, así como la forma de manejarlo y su comportamiento tanto en estado fresco como endurecido, los cuidados que se debe tener, las técnicas de pre-enfriamiento de insumos y concreto así como el post-enfriamiento del concreto endurecido y, por lo tanto, lograr estructuras de concreto masivo de mejor calidad en resistencia y durabilidad.

Se llegó a que una mezcla de concreto debe tener bajo calor de hidratación para ahorrarse costos. Asimismo, es necesaria la utilización de plastificantes y superplastificantes para disminuir la cantidad de agua que puede tener la mezcla, reducir un 50 % de la producción de calor del material empleando puzolanas.

En septiembre de 2007, se realizó un estudio de investigación en la Universidad Tecnológica de Pereira, publicado con el nombre de *Síntesis and functionalization of silicate and carbón nanotubes*, por los investigadores Luis Fernando Giraldo M. y Betty Lucy López. El objetivo de este estudio ha sido sintetizar mediante la descomposición química catalítica de nanotubos de

carbono múltiple pared, los cuales fueron caracterizados por TGA, TEM, FTIR, adsorción desorción de nitrógeno y XRD.

Se llegó a concluir que durante la descomposición liberan calor, la presencia de partículas metálicas dentro de los nanotubos de carbono ayuda a que la descomposición se dé a temprana edad. Los nanotubos de silicato se convierten en una alternativa interesante como materiales de soporte catalítico que involucren procesos a elevadas temperaturas, debido a su alta estabilidad térmica y a la par con los nanotubos de carbono, son susceptibles de ser funcionalizados para servir de agentes de refuerzo en matrices poliméricas, sensores o inmovilizadores de sustancias activas

## 1.2. Justificación

Según los antecedentes mencionados se observó la evolución que ha desarrollado la ciencia y la tecnología aplicadas de forma benefactora a diversas áreas en construcción como también en mezclas de cemento. “La nanotecnología es una ciencia que con el pasar del tiempo no deja de avanzar y dar mejores resultados aportando diferentes beneficios. Es una técnica que se aplica a nivel nanoescala, lo cual permite manipular a los átomos y moléculas.”<sup>3</sup>

“Los nanotubos de carbono, son nanopartículas de carbono que por el tamaño y forma tienen un uso muy común en el mejoramiento de productos tanto químico, biológico y físico”<sup>4</sup>. Así mismo, también mejora las propiedades físicas y químicas de los compuestos con los que se mezclan, dando como

---

<sup>3</sup> GONZÁLEZ VELÁSQUEZ, Viviana Jehová, *Nanomateriales de carbono, síntesis, funcionalización y aplicaciones*, Tesis Doctoral en Universidad Carlos III Madrid. p. 353.

<sup>4</sup> FLORÉZ, Laura, *Nanotubos de carbono, crece la oferta y baja precio*.  
[http://www.plastico.com/temas/Nanotubos-de-carbono,-crece-la-oferta-y-baja-el-precio + 3068695](http://www.plastico.com/temas/Nanotubos-de-carbono,-crece-la-oferta-y-baja-el-precio+3068695).

resultado una resistencia mayor, al tener una mejor estructura, obteniendo el uso necesitado por una empresa constructora.

Dado a la demanda que tiene una empresa cementera esta necesita de una innovación continua en sus productos para presentarle la mejor opción al cliente. La competencia que se genera en el mercado es el alimento diario de las innovaciones en las propiedades físicas y químicas de una mezcla de cemento, producir el mayor impacto genera aumento en los costos de producción y reducción de efecto de resistencia.

En el presente proyecto de investigación, se evaluó el efecto de resistencia mecánica de cemento tipo Portland por medio de una dosificación de 0,01, 0,03 y 0,05 % de nanotubos de carbono funcionalizados por medio de una oxidación utilizando ácido sulfúrico y peróxido de sodio. Se utilizaron nanotubos de carbono que han sido funcionalizados de forma covalente, la oxidación elimina carbono amorfo y las impurezas metálicas, la cual también romperá los enlaces que constituyen la nanoestructura de nanotubo de carbono y se formaron enlaces covalentes libres para ser adherentes con el cemento.

Esta afinidad de nanoestructura que se obtuvo con otros materiales y la mejora de su reactividad química con otras moléculas, provocaron la mejora de las propiedades físicas y químicas al mezclarse con cemento tipo Portland.

Antes de ser mezclado, los nanotubos funcionalizados, se realizaron pruebas cualitativas y cuantitativas utilizando técnicas de caracterización espectrometría infrarrojo, termogravimetría y análisis de difracción, obteniendo medidas absorbancia, concentración y temperatura de descomposición.

Posteriormente se mezcló con cemento tipo Portland y se realizaron evaluaciones de resistencia mecánica universal de 3, 7 y 28 días, con estos datos obtenidos se procedió a realizar gráficas de control para determinar los valores óptimos.

“Posteriormente se desarrolló un análisis comparativo entre el procedimiento de MWNTC’s oxidados y la metodología desarrollada previamente por medio de MWNTC’S,”<sup>5</sup> para evaluar el proceso que brinde mayor resistencia mecánica al cemento.

### **1.3. Determinación del problema**

Este trabajo de investigación trató una mezcla de cemento tipo Portland dando una mejora de resistencia mecánica, como en los antecedentes ya mencionados, ya que en la actualidad las empresas están ligadas a una innovación continua en sus productos, debido a que la competencia del mercado avanza día a día, por lo que la innovación de las mezclas de cemento se ha ido incrementando, utilizando diferentes métodos de aditivos en la mezcla.

Provocando elevación de costos, sin dar una resistencia o seguridad satisfactoria. El incremento de resistencia mecánica es influenciado por las variables tanto internas (aditivos, agua, agregados, mecanismos de hidratación, entre otros) como externas (temperatura, tiempo, ensayos) de una mezcla, por lo cual se busca una mezcla de cemento tipo Portland que incluya variables que incrementen dicha resistencia.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> POSADAS VILLADA, Ricardo Antonio. *Evaluación del efecto de compositas de nanotubos de carbono sobre la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland tipo I (PM)*. Protocolo de tesis de licenciatura en Universidad de San Carlos de Guatemala. p. 98.

<sup>6</sup> OSORIO, Jesús David. *Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión*. <http://blog.360gradosenconcreto.com/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/>.

### **1.3.1. Definición**

La empresa productora de cemento requiere de una propuesta de evaluación y estudio de una mezcla de cemento tipo Portland entre un análisis comparativo de una síntesis tradicional y uno no tradicional, para evaluar el proceso con mayor resistencia, cumpliendo así con la investigación e innovación de sus productos.

### **1.3.2. Delimitación**

Este proyecto de investigación se enfocó en evaluar la resistencia mecánica de una mezcla de cemento tipo Portland utilizando nanotubos de carbono previamente funcionalizados por el proceso de síntesis tradicional de oxidación con ácido sulfúrico y peróxido de sodio, dicha funcionalización fue dosificada en porcentajes de 0,01 %, 0,03 % y 0,05 %, evaluando el comportamiento o cambios de la mezcla de cemento.

La funcionalización fue evaluada por medio de análisis de caracterización que consistieron en realizar una etapa de técnicas de caracterización de espectrometría infrarroja, termogravimetría y análisis de difracción, tomando muestreos de la mezcla de los nanotubos funcionalizados. Durante ese tiempo se determinó las variables que indican que la funcionalización es correcta, tanta física que se observa por el cambio en la estructura y químico que se observa en la formación de grupos funcionales.

“La resistencia mecánica se evaluó por medio del ensayo universal de 3, 7, y 28 días, utilizando la metodología interna aprobada del uso de moldes de cubos de 1X1” de muestreo para cada dosificación. Es de suma importancia tener una hidratación completa, la temperatura del curado debe mantenerse



entre 23+/-2°C, con una humedad relativa del 95 % ;<sup>7</sup> para que la resistencia de la mezcla aumente. La medición a los 28 días indica la resistencia máxima a la que llega la muestra, en este caso se obtuvo con la dosificación de 0,05 % siendo esta de 5006,21 psi.

---

<sup>7</sup> OSORIO, Jesús David. *Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión*.  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/>.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Nanotecnología

“La nanotecnología es la ciencia que estudia el comportamiento de las partículas en nanoescala, corresponde a un factor  $10^{-9}$ , que aplicado a las unidades de longitud, corresponde a una mil millonésima parte de un metro ( $10^{-9}$  metros) es decir 1 nanómetro. La nanotecnología estudia la materia desde un nivel de resolución nanométrico, entre 1 y 100 nanómetros aprox. Estudiando la síntesis y manipulación de estos compuestos en nanoescala implementándolos en proyectos de investigación y en productos finales de diferentes empresas.”<sup>8</sup>

#### 2.1.1. Historia de la nanotecnología

Richard Feynman fue uno de los primeros pioneros en el campo de la Nanotecnología, en 1959, pronunció el discurso *There's Plenty of Room at the Bottom* (Hay mucho espacio ahí abajo) en el cual explica lo interesante que sería la manipulación de los átomos y moléculas por individual, diseñando y construyendo sistemas en nanoescala átomo por átomo (Feynman 1959).

En 1981 otro ingeniero físico estadounidense, Eric Drexler, basándose en la investigación de Feynman, publicó una revista tomando a más profundidad y más detalle lo descrito por Feynman, llamada *Proceedings of the National Academy of Sciences*, el artículo *Molecular engineering: An approach to the*

---

<sup>8</sup> MAUBERT, Marisela; SOTO, Laura; LEÓN, Ana María.; FLORES, Jorge. *Nanotubos de carbono. La era de la nanotecnología razón y palabra.* p. 68.

*development of general capabilities for molecular manipulation* “describe una máquina nanotecnológica con capacidad de autoreplicarse en el término de plaga gris, que explica lo que sucedería si un nanobot autoreplicante fuera liberado al ambiente.”<sup>9</sup>

Tabla I. **Cronología de la nanotecnología**

<b>Fecha</b>	<b>Acontecimiento</b>
Años 40	Von Neuman estudia la posibilidad de crear sistemas que se auto-reproducen como una forma de reducir costes.
1959	Richard Feynman habla por primera vez en una conferencia sobre el futuro de la investigación científica: A mi modo de ver, los principios de la Física no se pronuncian en contra de la posibilidad de maniobrar las cosas átomo por átomo.
1966	Se realiza la película <i>Viaje alucinante</i> que cuenta la travesía de unos científicos a través del cuerpo humano. Ellos reducen su tamaño al de una partícula y se introducen en el interior del cuerpo de un investigador para destrozarse el tumor que le está matando. Por primera vez en la historia, se considera esto como una verdadera posibilidad científica. La película es un gran éxito.
1985	Se descubren los <i>buckminsterfullerenes</i>
1986	Sir Harry Kroto gana el Premio Nobel por haber descubierto los fullerenos
1989	Se realiza la película "Cariño, encogí a los niños", una película que cuenta la historia de un científico que inventa una máquina que puede reducir el tamaño de las cosas utilizando láser.
1997	Se fabrica la guitarra más pequeña del mundo. Tiene el tamaño aproximadamente de una célula roja de sangre.
1998	Se logra convertir a un nanotubo de carbón en un nanolápiz que se puede utilizar para escribir.
2001	James Gimzewski entra en el libro de récords Guinness por haber inventado la calculadora más pequeña del mundo.
2003	Naomi Halas, Jennifer West, rebecca Drezek y Renata Pasqualin en la Universidad Rice desarrollan unas nanocápsulas de oro, que son sintonizadas de tamaño para absorber la luz infrarroja cercana. Esta investigación sirve para los diagnósticos y tratamientos del cáncer de mama sin biopsias invasivas.

<sup>9</sup> OSORIO, Jesús David. *Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión*. <http://blog.360gradosenconcreto.com/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/>.

Continuación de la tabla I.

2006	James Tour y sus colegas de la Universidad de Tice construyen un carro a nanoescala hecho de oligo, con ejes alquinilo y cuatro ruedas esféricas de fullereno C60. El carro se movía en una superficie de oro como resultado de las ruedas como se mueve un carro normal. A temperaturas superiores de 300°C se movía más rápido
2007	Angela Belcher y sus colegas en el MIT construyen una batería de iones de litio con un tipo común de virus que no son dañinos para el ser humano, usando un procedimiento de bajo costo y benigno para el medio ambiente.
2009	Nadrian Seeman y varios colegas de la Universidad de Nueva York crean varios dispositivos a nanoescala con un montaje robótico de ADN. Se trata de un proceso de creación de estructuras de ADN 3D utilizando secuencias sintéticas de cristales de ADN que pueden ser programados para auto-ensamble utilizando "extremos pegajosos" y la colocación en un orden y orientación conjunto. Es un avance con potenciales aplicaciones en la Nanoelectrónica. Otra creación de Seeman (con colegas de la Universidad de Nanjing de China) es una "línea de montaje de ADN." Por este trabajo, Seeman compartió el Premio Kavli de Nanociencia en 2010.
2010	IBM utiliza una punta de silicio que mide solo unos pocos nanómetros en su ápice (similar a las puntas utilizadas en microscopios de fuerza atómica) para cincelar el material de un sustrato y crear un mapa completo a nanoescala 3D del mundo -de un tamaño de una-milésima parte de un grano de sal y lo hizo en 2 minutos y 23 segundos. Esta actividad demuestra una metodología patrón poderosa para generar patrones y estructuras a nanoescala tan pequeñas como de un tamaño de 15 nanómetros con una gran reducción de costos. abriendo nuevas perspectivas para campos como la electrónica, la optoelectrónica y la medicina
2013	Investigadores de la Universidad de Stanford desarrollan el primer equipo de nanotubos de carbono.
2016	Desarrolló una pintura innovadora que incorpora nanohilos de un nanómetro de diámetro de un pigmento orgánico llamado DXP, y ésta se ha utilizado en algunos modelos de Fórmula 1 para mejorar la capacidad de discos duros. Asimismo, utilizaron técnicas de nanotecnología para diseñar la pista azul de atletismo de los Juegos Olímpicos de Río 2016, reforzándola con nanopartículas que mejoran tanto su antideslizamiento como su duración.
2018	Se realiza el estudio de la disipación del plasmón a través de grafeno, son responsables de la transmisión de señales ópticas a escala nanométrica. Se crea un gel jerárquicamente nanoestructurado aprovechando la energía solar para destilar agua a un ritmo récord de 18,23Lt/h. También se examina la eficacia de una vacuna de nanopartículas para combatir la gripe.

Fuente: MAUBERT, Marisela; SOTO, Laura; LEÓN, Ana María; FLORES, Jorge. *Nanotubos de carbono. La era de la nanotecnología razón y palabra.* p. 69.

### 2.1.2. Nanopartículas

Las nanopartículas junto con la nanotecnología, se encargan de la manipulación entre átomos y moléculas que han revolucionado todo el mercado con innovaciones que día a día hacen un gran avance tecnológico. La principal función de las nanopartículas es convertir más eficiente el producto final al que se quiere llegar, es decir, permite que los materiales sean menos densos, tengan mayor durabilidad, resistencia, produce menos contaminación al medio al ambiente, también incrementa los niveles de seguridad.

“Investigaciones realizadas en el área de nanotecnología y cemento han demostrado que algunas adiciones de nanocompuestos al cemento permiten modificaciones importantes en su microestructura lo que a su vez proporciona la producción de concretos más resistentes, menos porosos y más durables.”<sup>10</sup>

“La acción que produce una nanopartícula en una mezcla de cemento es compleja pudiendo destacarse tres acciones principales: la primera sería en mejor la hidratación del material; la segunda, como potencializar las reacciones de hidratación; y ayuda como material ultrafino de relleno de los nanoporos que se forman en la pasta de cemento, reduciéndose la porosidad capilar de la pasta de cemento e incrementándose su resistencia a la fisuración.”<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> MARCONDES, C. G. N.; MEDEIROS, M. H. F.; J. MARQUES, Filho. *Nanotubos de carbono en concreto de cemento tipo Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción del agua.* p. 114.

<sup>11</sup> CORNEJO, Laureano. *La nanotecnología y los materiales de construcción.*  
<http://nuevatecnologiasymateriales.com/lananotecnologia-y-los-materiales-de-construccion/>.

### **2.1.3. Nanotecnología en la construcción**

La nueva implementación de la nanotecnología en la construcción ha sido de gran utilidad, dado que la nanotecnología convierte el producto más eficiente. En la construcción se implementa específicamente en la elaboración de la mezcla de cemento, al realizar esta implementación se obtiene una mezcla más factible de manejar, más resistente, reduce la fisuración. En la actualidad existen varios estudios científicos realizados por diferentes universidades de varios países en donde utilizan nanopartículas en una mezcla de hormigón.

### **2.2. Nanotubos de carbono**

Los nanotubos de carbono son partículas de carbono en forma cilíndrica, las cuales tienen su diámetro en nanómetros. La principal función de los nanotubos de carbono es la relación que tienen entre superficie y volumen. Los nanotubos de carbonos están formados por un enlace de dos moléculas de carbono C-C, lo cual permite formar enlaces fuertes con el hidrógeno C-H,<sup>10</sup> al momento de ser utilizado en una mezcla.

Al observar los nanotubos de carbono desde el punto de vista estructural, existen dos tipos, los de pared simple, constituidos por una única hoja de grafeno enrollada sobre sí misma para formar un tubo cilíndrico, los cuales son más costosos y los de paredes múltiples, que comprenden un conjunto de nanotubos de carbono coaxiales, con varias hojas de grafeno enrolladas en forma de tubo, y que son, menos costosos.<sup>12</sup>

“Por la estructura que tienen un nanotubo de carbono forma una buena conductividad térmica, así mismo siendo estables térmicamente soportando una

---

<sup>12</sup> BALANDRAN QUINTANA, René Renato; ROMERO VILLEGAS, Gabriel Iván; MENDOZA, WILSON, Ana María; SOTELO MUNDO, Rogerio. *Nanotubos de carbono y bionanotecnología interciencia*. p. 336.

temperatura máxima de 750 °C en el aire.”<sup>13</sup> Al formar los nanotubos de carbono, se debe tener cuidado en el grosor que tenga la policapa, ya que, mientras más gruesa sea la estructura de su policapa pueden arrugarse y convertirse más blandos lo cual afecta en su rigidez, pero también ayuda a que sus deformaciones disipan mucha energía para aplicar en materiales al absorber choques.

“En la actualidad existen nano tubo unicapa y multicapa, debido a esto se ha observado que son los tubos multicapa los que tienen mayores aplicaciones. Los precios se han reducido entre 2 y 3 veces en los últimos 8 años. Algunos compuestos de nanotubos están disponibles por 50 dólares la libra.”<sup>14</sup>

### **2.2.1. Formas alotrópicas del carbono**

El átomo del carbono puede unirse entre sí y formar sustancias muy distintas por la estructura atómica que tiene, Existen cuatro tipos de formas alotrópicas del carbono.

- Tridimensional llamada diamante o grafito se construye una red tridimensional que se extiende a lo largo de todo un cristal siendo un el elemento más duro que existe en la naturaleza. El grafito puede utilizarse como lubricante, está compuesta por anillos hexagonales de átomos.
- Bidimensionales llamada grafeno, es una red bidimensional que se extiende a lo largo formando un grafeno.

---

<sup>13</sup> BALANDRAN QUINTANA, René Renato; ROMERO VILLEGAS, Gabriel Iván; MENDOZA, WILSON, Ana María; SOTELO MUNDO, Rogerio. *Nanotubos de carbono y bionanotecnología intercencia*. p. 336.

<sup>14</sup> FLORÉZ, Laura, *Nanotubos de carbono, crece la oferta y baja precio*. <http://www.plastico.com/temas/Nanotubos-de-carbono,-crece-la-oferta-y-baja-el-precio+3068695>.

- Monodimensionales llamados nanotubos estos están constituidos por una red hexagonal de carbono en forma cilíndrica.

### **2.2.2. Estructura de los nanotubos de carbono**

Los nanotubos de carbono presentan gran variedad de estructuras y de propiedades físicas, cabe destacar que son los mejores ejemplos en nanoestructuras, poseen una composición química y configuración atómica sencilla. Exhiben, posiblemente, la más vasta diversidad y riqueza en relación con sus estructuras y propiedades intrínsecas.

Los NTC presentan propiedades físicas distintas preparadas en condiciones diferentes, lo cual abre interesantes oportunidades en el campo de la nanotecnología, ya que es una forma de controlar sus propiedades eléctricas y mecánicas.

### **2.2.3. Tipos de nanotubos de carbono**

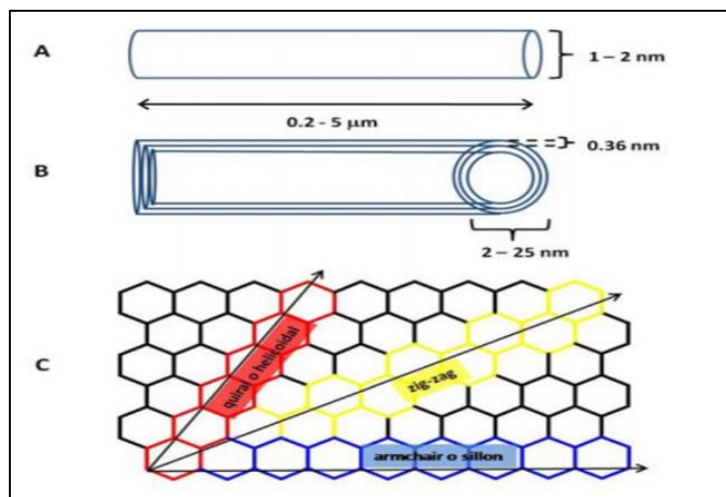
- Nanotubos de carbono de monocapa: consiste en estar compuesta por una sola capa bidimensional de grafeno, enrollada sobre sí misma en forma cilíndrica.
- Nanotubos de carbono de multicapa: está formada por varias láminas de grafeno concéntricas. Se trata de un nanotubo en cuyo interior hay otro nanotubo de un diámetro menor. En su interior hay otro con diámetro aún más menor y así sucesivamente. En resumen, son varios nanotubos concéntricos, de tamaño cada vez menor desde la periferia hasta el centro.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> ESPARZA ESPARZA, Bertra Maria. *Caracterización de nanotubo de carbono por difracción de rayo -x de alta resolución (hr-xrd)*. p. 118.



Figura 1. Tipos de nanotubos de carbono por estructura



Fuente: tipos de nanotubos de carbono por estructura.

<https://www.monografias.com/trabajos93/nanotubos-de-carbono/nanotubos-de-carbono.shtml>.

Consulta: 5 de octubre de 2018.

Los nanotubos y nanofibras de carbono “presentan propiedades morfológicas, mecánicas y electrónicas excepcionales, que permiten su aplicación en muchos campos que van desde una amplia gama de componentes electrónicos, al reforzamiento de materiales (conductividad eléctrica y resistencia mecánica), al almacenamiento de gases, de manera sobresaliente el hidrógeno, y a la utilización como soportes catalíticos.”<sup>16</sup>

#### 2.2.4. Propiedades de nanotubos de carbono

A continuación, se presenta en la tabla II, las propiedades generales de nanotubos de carbono.

<sup>16</sup> GADIOU, Saadallah; PIQUERO, David; PARMENTIER, Vix-Guterl C. *The Influence of textural properties on the adsorption of hydrogen on ordered nanostructured carbons. Microporous and Mesoporous Materials* 79. p. 128.

Tabla II. **Propiedades generales de nanotubos de carbono (A)**

Propiedades	NTC	Comparación
Diámetro	0,4-5nm	La litografía de haz electrónico puede crear líneas de 50nm de ancho.
Densidad	1,33-1,40g·cm <sup>-3</sup>	El aluminio tiene una densidad de 2,7g·cm <sup>-3</sup> .
Fuerza de tensión	45·10 <sup>12</sup> Pa	Las aleaciones de acero de alta resistencia se quiebran cuando se les aplica una fuerza de ~2·10 <sup>12</sup> Pa.
Resistencia	Pueden ser doblados en ángulos grandes y volver a su estado normal sin sufrir daño.	Los metales y las fibras de carbono se fracturan cuando se someten a esfuerzos similares.
Conductividad Eléctrica	Se estima en 1·10 <sup>12</sup> A·cm <sup>-2</sup> .	Los cables de Cu se funden a ~1·10 <sup>12</sup> A·cm <sup>-2</sup> .
Campo de emisión	Pueden activar fósforos de 1-3V si los electrodos están alejados en 1µm.	Las puntas de Mo requieren campos de 50-100 V·m <sup>-1</sup> y tienen tiempos de vida muy limitados.
Transmisión de calor	Se predice ser tan alto como 6 000W·m <sup>-1</sup> ·°K <sup>-1</sup> , a temperatura ambiente.	El diamante puro permite 3 320 W·m <sup>-1</sup> ·°K <sup>-1</sup> .
Estabilidad a la temperatura	Estable a >2800°C en vacío y a >750°C en aire.	Los cables en microchips se derriten entre 600 y 1 000 °C.
Costos	1g NTC cuesta 0,15USD.	1g Au cuesta 10 USD

Fuente: elaboración propia.

“Las propiedades generales de los NTC’s dependen principalmente de su tipo de estructura, es decir, del número de capas que poseen y la forma en la que está enrollado contando también el diámetro del nanotubo.”<sup>17</sup>

<sup>17</sup> MAUBERT, Marisela; SOTO, Laura; LEÓN, Ana María; FLORES, Jorge. *Nanotubos de carbono. La era de la nanotecnología razón y palabra*. p. 69.

Tabla III. **Propiedades generales de los nanotubos de carbono (B)**

<b>Propiedades</b>	<b>Características</b>	
Geométricas	Capas Diámetro Longitud	Una/ múltiples -1,4 nm a > 100nm -10
Mecánicas	Módulo de Young Densidad Fuerza tensil	-1x10 <sup>12</sup> Pa=1TPa (hierro 0,2 TPa) 1,33 -1,4 g/cm <sup>3</sup> 45x10 <sup>12</sup> Pa= 45GPa (Hierro 2GPa)
Térmicas	Conductividad térmica	6 600 W/m.K

Fuente: elaboración propia.

### 2.3. **Cemento**

El cemento es una mezcla de piedras calizas y arcillas con sus aditivos, formando así una sustancia compuesta de silicatos de calcio que al ponerse en contacto con el agua se forma en una pasta adhesiva para la construcción.

El proceso para la elaboración de cemento es muy interesante, dado que tiene varias fases. La primera fase es la clinckerización, aquí se mezcla la piedra caliza contiene CaO y arcillas que contiene SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, están son molidas, puede ser en un molino vertical o en un molino de bolas, a modo de realizar una mezcla completamente homogénea. A esta mezcla se le llama harina cruda, la cual es llevada a una torre de ciclones donde es precalentada por gases que son proporcionadas por un horno, en la torre de ciclones se realiza una descarbonatación.

Después pasa directamente al horno en donde se produce la clinckerización, la harina entra al horno en fase sólida a la mitad de distancia del horno, esta harina llega a su punto de sinterización entrelazando las partículas realizando una mezcla químicamente homogénea y, por último, es sometido a un enfriamiento donde se realiza la cristalización, formándose así las fases del

clinker que son C3S, C2S, C3A y C4AF, formando también módulos de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esta es la fase más importante de la elaboración del cemento.

La segunda fase de la elaboración de cemento es la molienda del clinker con aditivos como yeso, toba y caliza. Este proceso es llevado por molinos verticales y de bolas. La tercera fase de la elaboración de cemento es el empaque y despacho.

#### **2.4. Funcionalización de nanotubos de carbono**

La funcionalización de nanotubos de carbono es una técnica que se pueda agrupar en funcionalización no-covalente y covalente. Al funcionalizar nanotubos de carbono incrementa la afinidad de los tubos y mejorar su reactividad química con otras moléculas.

La cicloadición consiste en grupos funcionales unidos por diclorobencenos, nitrenos, radicales, fluroalquilo, grupos amino. Otro mecanismo es la ozonólisis que son grupos carboxilos, éster, cetona, aldehído y alcohol, la cual mediante este proceso se puede unir moléculas activas a las paredes y los extremos de los nanotubos, ampliando el espectro de reactividad química.

También el método de funcionalización mecanoquímica la cual consiste en la molienda en atmósferas reactivas produce NTCPM cortos con grupos amino, amida, tioles y mercaptonos o si es KOH en el caso de NTCP'S, en una superficie cubierta de grupos OH, la cual consiste en la generación de sitios de unión para otras moléculas y mayor solubilidad en agua para el caso de la molienda con KOH.

### **2.4.1. Funcionalización covalente**

Esta funcionalización incrementa la afinidad de este tipo de nanoestructuras con otros materiales, ya que, una vez incorporado el grupo funcional, es susceptible de ser transformado en otro grupo funcional a través de subsecuentes reacciones químicas.

“Por otro lado, se ha demostrado que para formar un enlace covalente se requiere la ruptura de enlaces en las paredes de los nanotubos bajo condiciones de reacción drásticas como las empleadas en la purificación mediante ácidos concentrados. Lo anterior puede causar daño permanente en las paredes del nanotubo y disminuir su desempeño en las aplicaciones en que sean utilizados.”<sup>18</sup>

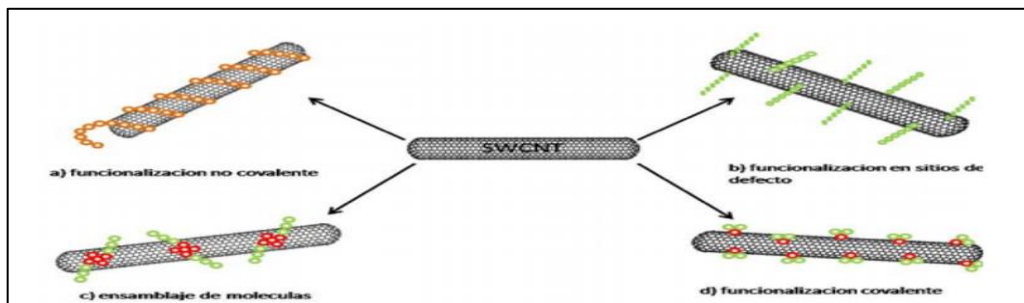
### **2.4.2. Funcionalización no-covalente**

La funcionalización no-covalente es un método en el cual se considera no destructivo, porque permite conservar intactas las propiedades intrínsecas de los nanotubos de carbono.

---

<sup>18</sup> CRUZ DELGADO, Víctor; ÁVILA ORTA, Carlos, *et. al. Funcionalización de nanotubos de carbono para la preparación de nanocompuestos poliméricos*, p. 692.

Figura 2. Tipos de funcionalización de nanotubos de carbono



Fuente: *Tipos de funcionalización de nanotubos de carbono.*

[https://www.researchgate.net/figure/Figura-14-Posibilidades-para-la-funcionalizacion-de-CNTs-a-funcionalizacion-en\\_fig1\\_283490887](https://www.researchgate.net/figure/Figura-14-Posibilidades-para-la-funcionalizacion-de-CNTs-a-funcionalizacion-en_fig1_283490887). Consulta: 22 de octubre de 2019.

### 2.4.3. Oxidación de nanotubo de carbono

La oxidación en un nanotubo de carbono sirve para una purificación total de la muestra, y en la estructura provoca un rompimiento entre sus enlaces, obteniendo así grupos carboxílicos a lo largo del nanotubo de carbono. Se han realizado varios estudios para la oxidación de nanotubos de carbono.

“Existen dos formas de oxidación por medio de gas oxidante o por medio de oxidación en fase líquida. La oxidación en fase líquida es un proceso de purificación en los nanotubos de carbono más económico y con facilidad en su empleo.”<sup>19</sup> Estos procedimientos tienen una amplia variedad de tratamientos como, por ejemplo, ácido nítrico, ácido sulfúrico,  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ , solución sulfúrica,  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{KMNO}_4$ , ácido sulfúrico/ agua oxigenada, con el fin de introducir grupos carboxilo y eliminar impurezas de carbón amorfo o grafito

<sup>19</sup> VIZUETE MEDRANO, María; *Diseño y síntesis de nanotubo de carbono y nanocuernos de carbono con aplicaciones optoelectrónicas.* p. 124.

#### **2.4.4. Nanotubos en cemento tipo Portland**

Actualmente existen gran variación en la clasificación del cemento tipo Portland conforme a las cualidades de resistencia y diferentes funciones que espera que se cumplan. En este caso se usará el cemento tipo Portland I, el cual es general, se pueden emplear para fines estructurales.

La historia del cemento tipo Portland comienza por primera vez en 1824 por el fabricante inglés de cemento Joseph Aspdin, debido a su parecido con la piedra de Portland, que era muy utilizada para la construcción en Inglaterra. La innovación que esta investigación generó de la piedra de Portland dio como resultado el primer cemento Portland moderno, hecho de piedra caliza y arcillas o pizarras, calentadas hasta convertirse en carbonilla (o escorias) y después triturada.<sup>20</sup>

“El cemento Portland es caracterizado por ser un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón.”<sup>21</sup> Esta mezcla es la más utilizada para la construcción, como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar una materia obteniendo mejoras en su resultado final al ser aplicado.

#### **2.4.5. Defectos o incertezas de los nanotubos de carbono**

“Las deformaciones en los nanotubos de carbono son provocadas por la elaboración de su estructura, como curvas y ensambladuras del nanotubo, son cambiados a un hexágono por un heptágono o un pentágono. Las deformaciones pueden llegar a ser tanto internas como externas; las

---

<sup>20</sup> Arqhys. *Tipos de cemento portland*. <http://www.arqhys.com/arquitectura/tipos-cemento-portland.html>. Consulta: 5 de octubre de 2018.

<sup>21</sup> BALANDRAN QUINTANA, René Renato, op. cit. p. 336.

propiedades generales de los nanotubos son cambiadas seriamente por estas deformaciones.<sup>22</sup>

Otra clase de defectos es causada por las impurezas que se provocan en el proceso del crecimiento, introduciendo fuerza de compresión o tensión y provocando deformaciones de la estructura tubular de los nanotubos; los compuestos o elementos que se pueden incorporar en la estructura de los nanotubos pueden ser partículas provenientes del catalizador, nanoestructuras y carbón amorfo.<sup>23</sup>

## 2.5. Técnicas de caracterización

En la actualidad se utilizan diferentes técnicas para encontrar la caracterización de una materia, de las cuales son técnicas son la difracción de rayos X, difracción de electrones ED difracción de neutrones ND, microscopias electrónicas de transmisión TEM y barrido SEM, espectroscopia Raman. De estas técnicas no todas son recomendadas dado a que no son muy convenientes por que los costos son muy elevados, se toma el riesgo que la muestra se dañe.<sup>24</sup>

### 2.5.1. Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, es alrededor de los 0,02 Å (1 Å = 10<sup>-10</sup> m). A partir del difractograma de Rayos X de las nanopartículas aisladas de la disolución, es posible determinar su tamaño medio basándonos en la expresión de DebyeScherrer:

$$d = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

---

<sup>22</sup> SAUTHIER, Gabriel; FRAXEDAS, Moreno-Manas. *Preparation and characterization of single-walled carbon nanotubes functionalized with amines*. p. 75.

<sup>23</sup> SRIVASTAVA, Deepak; MENON, Madhu; DARAIO, Jin; SADANADAN, Bindu; RAO, Apparao. *Phys. Vacancy-mediated mechanism of nitrogen substitution in carbon nanotubes*. <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.69>.

<sup>24</sup> KEITH BOWEN, Brian Tanner. *High Resolution X-ray Diffractometry and Topology*. p. 48.



Siendo  $d$ : diámetro medio de la nanopartícula;  $\lambda$ : longitud de onda de la fuente de Rayos X, en nm;  $\beta$ : anchura del pico de difracción en la mitad del máximo;  $\theta$ : ángulo de difracción.

### 2.5.1.1. Proceso de rayos X

Para realizar el proceso de rayos X en una materia se necesita un tubo de ensayo, el cual contiene en su interior un electrodo conocido como cátodo y ánodo. El cátodo es un filamento de átomo pesado que emite los electrones; y el ánodo es generalmente un bloque de cobre en el cual está inmerso el blanco. La utilización de rayos X comienza en la aplicación de una diferencia de voltaje entre los electrodos, la cual está entre 10 y 60 kV, esto provoca que los electrones que provienen del cátodo sean acelerados rápidamente hacia el ánodo (blanco). De este proceso el 1 % es rayos X y el 99 % es convertido en calor, dado a esto es necesario emplear un sistema de enfriamiento.<sup>25</sup>

Figura 3. **Característica de las técnicas de difracción de rayo X, electrones y neutrones**

Características	Electrones	Neutrones	Rayos X
Absorción	alto	muy bajo	Bajo
Penetración en la muestra	$< 1 \mu m$	$\sim cm$	$\sim mm$
Ensanchamiento medio (FWHM)	grados	arc segundos	arc segundos
Sensibilidad a deformaciones	$10^{-3}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$
Resolución espacial	$1 nm$	$30 \mu m$	$1 \mu m$
Daña a la muestra	si	no	no
Costo de empleo	alto	Muy alto	medio

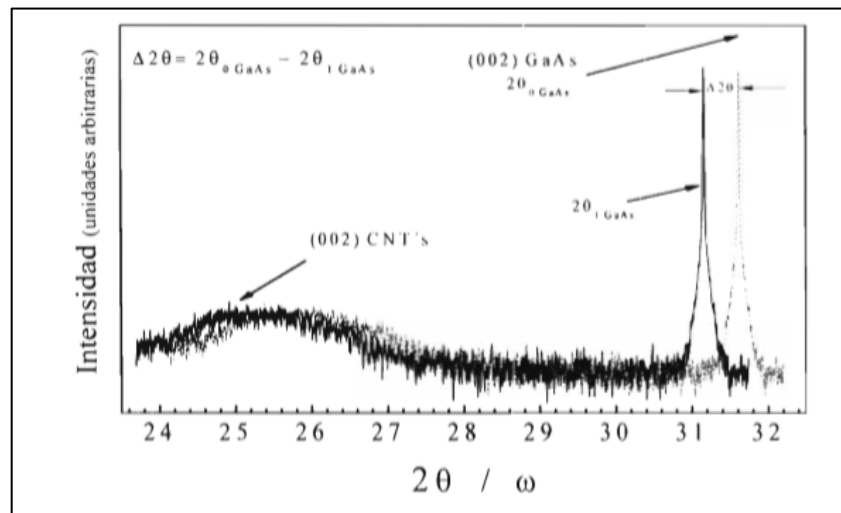
Fuente: *High Resolution X-ray Diffractometry and Topology*. D. Keith Bowen, Brian K. Tanner; Taylor & Francis p. 48.

Según un estudio que se realizó en México, en el cual funcionalizaron nanotubos de carbono de múltiple capa con un plasma de CO<sub>2</sub> obtuvieron como resultado en el análisis de difracción lo que se muestra en la figura 8, por

<sup>25</sup> MAUBERT, Marisela; SOTO, Laura; LEÓN, Ana María; FLORES, Jorge. *Nanotubos de carbono. La era de la nanotecnología razón y palabra*. p. 69.

lo que se espera tener estos resultados en el difractograma que se le tomarán a los nanotubos de carbono funcionalizados por medio de una oxidación.

Figura 4. **Difractograma que corresponde a una muestra de nanotubos oxidados**



Fuente: LORÁN JUANICO, José Antonio *Difractograma que corresponde a una muestra de nanotubos oxidados..* p. 45.

### 2.5.2. Espectroscopia infrarroja

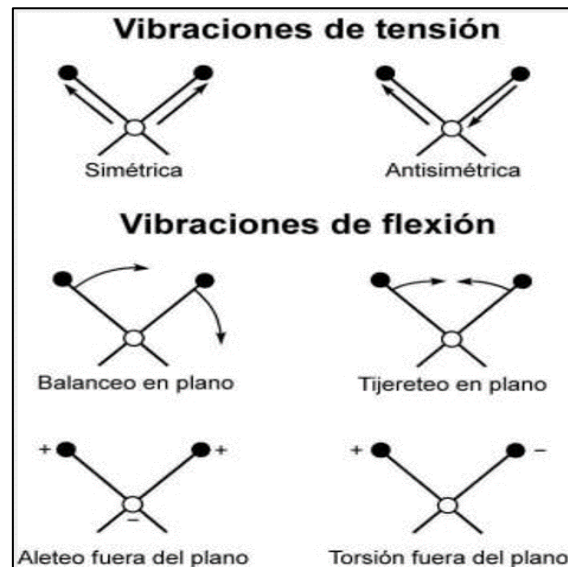
“La espectroscopia es una técnica que se basa en la vibración de las moléculas, de donde las moléculas absorberán la energía de un haz de luz infrarrojo que proporciona el equipo a utilizar, esta energía es la que provoca una transición vibracional en las moléculas.”<sup>26</sup>

Esta vibración producida se clasifica en dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión.

<sup>26</sup> RUBINSON, Judith. *Espectroscopia Infrarroja. Química analítica contemporánea.* p. 33.

- Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos.
- Las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces.

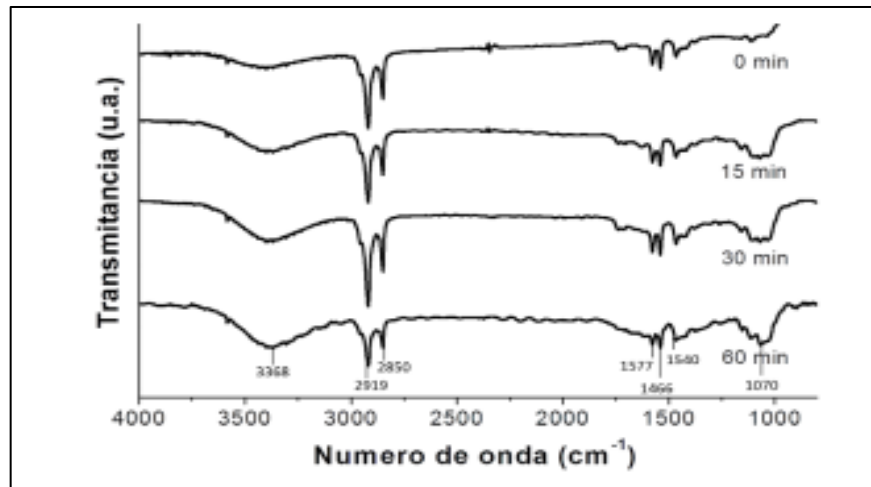
Figura 5. Tipos de vibraciones moleculares



Fuente: *Tipos de vibraciones moleculares*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-10-Tipos-de-vibraciones-moleculares-a-vibracion-de-tension-y-b-vibracion-de\\_fig5\\_312661313](https://www.researchgate.net/figure/Figura-10-Tipos-de-vibraciones-moleculares-a-vibracion-de-tension-y-b-vibracion-de_fig5_312661313). Consulta: 8 de octubre de 2018.

Según un estudio que se realizó en México, en el cual funcionalizaron nanotubos de carbono de múltiple capa con un plasma de CO<sub>2</sub> obtuvieron como resultado en el análisis infrarrojo lo que se muestra en la figura 10 por lo que se espera tener estos resultados en el espectograma que se le tomarán a los nanotubos de carbono funcionalizados.

Figura 6. **Espectros FT-IR de los NTC expuestos a un plasma de CO<sub>2</sub> durante 15, 30 y 60min**



Fuente: *espectros FT-IR de los NTC expuestos a un plasma de CO<sub>2</sub> durante 15, 30 y 60min.*  
<https://docplayer.es/93385539-Evaluacion-de-concentracion-de-gases-energeticos-obtenidos-del-reformado-de-gases-de-efecto-invernadero-por-plasma-luis-josimar-vences-reynoso.html>.

Consulta: 7 de noviembre de 2018.

### 2.5.3. Espectrometría Raman

“Esta técnica es la más utilizada para la caracterización de la nanoestructura que presenta el carbono, dado a que es un proceso de transición óptica entre puntos en la densidad de estados electrónica, el diámetro y semiconductores de la nanoestructura.”<sup>27</sup> Estudia las vibraciones y rotaciones que realiza el sistema; la dispersión de Raman de la luz monocromática, generalmente es un láser visible infrarrojo o ultravioleta.

<sup>27</sup> JONG, K.P. *Carbon-Nanofibers: Catalytic Synthesis and Applications. Catal. Review Sci. Eng.* p. 481.

El proceso se lleva a cabo cuando es iluminada con un haz de luz láser, la luz del punto iluminado se recibe con una lente y se envía a un monocromador. Las longitudes de onda cercanas a la línea del láser (debido a la dispersión Rayleigh elástica) se filtran hacia fuera y se dispersan sobre un detector que interpreta la intensidad y la longitud de onda. Generalmente se utiliza un láser de potencia de excitación con longitud de onda de 600 nm y 900 nm a potencia de unos cuantos milivatios para obtener picos característicos de nanotubos de carbono.<sup>28</sup>

Para determinar la calidad de las nanoestructuras de carbono está dado por la ecuación

$$Q = \frac{D}{G}$$

Donde:

- Q= es el parámetro de calidad Raman
- D= es la altura del pico del desorden, medida desde la referencia
- G =es la altura del gráfico medido desde la referencia

Los valores de Q se encuentran en un intervalo de 0,1 hasta 3,0 aproximadamente para nanotubos y nanofibras.

#### **2.5.4. Análisis químico**

A continuación, se describen las técnicas que se utilizan para el análisis químico.

---

<sup>28</sup> VERA ROMERO, Iván; ESTRADA JARAMILLOA, Melitón; MÉNDEZ VAZQUEZ, José; MARTÍNEZ REYES, José; ORTÍZ SORIANO, Agustina. *Perfiles de temperatura y análisis del potencial de eficiencia energética en una estufa de biomasa*. p. 10.

#### **2.5.4.1. Análisis elemental**

Esta técnica proporciona el contenido total presente de una muestra de naturaleza orgánica e inorgánica. Se basa en la combustión en ambiente de oxígeno puro, a una temperatura alta aproximadamente de 1000°C en la que consigue convertir la muestra en gases, una vez producidos estos gases se separan mediante una columna cromatográfica y se mide cada una de las cantidades de la muestra por medio de la conductividad térmica.<sup>29</sup>

#### **2.5.4.2. Espectroscopia óptica atómica**

Esta técnica proporciona los elementos presentes en la materia como su concentración. Por medio de un proceso llamado atomización se convierten en estado gaseoso, al aplicarle calor de forma electrotérmicamente se procede a tomar la medida de la concentración.

#### **2.5.5. Análisis termogravimétrico**

Esta técnica es caracterizada por ser una analítica y estudiar el comportamiento térmico de la materia, de esta forma se observan los cambios más importantes que pueden sufrir en las propiedades químicas de un compuesto. Con esta técnica se obtiene la temperatura de descomposición de la muestra. Así mismo, se observa la estabilidad térmica que obtiene.

A veces, “la prueba se desarrolla en una atmósfera combinada de 1 a 5 % de O<sub>2</sub> en N<sub>2</sub> o He para retrasar la oxidación. El equipo que utiliza esta técnica consta de una balanza de alta precisión con un recipiente cargado con la muestra, la muestra es colocada en un horno pequeño eléctricamente calentado, y tiene conectados termopares para medir la temperatura con precisión.”<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> HARRIS, Daniel. *Análisis químico cuantitativo*. p. 84.

<sup>30</sup> SRIVASTAVA, Deepak; MENON, Madhu; DARAIO, Jin; SADANADAN, Bindu; RAO, Apparao.

### 2.5.6. Análisis del microscopio electrónico de barrido (SEM)

“Es un análisis que se realiza por medio de un microscopio electrónico de barrido. Esta técnica de caracterización estudia la muestra en la cámara de vacío del MEB y retirar todo el aire que se encuentra dentro de ella. De manera inmediata se enciende el emisor de electrones para bombardear la muestra. Los electrones viajan a través del arreglo de lentes diseñados para obtener un haz convergente de electrones.”<sup>31</sup>

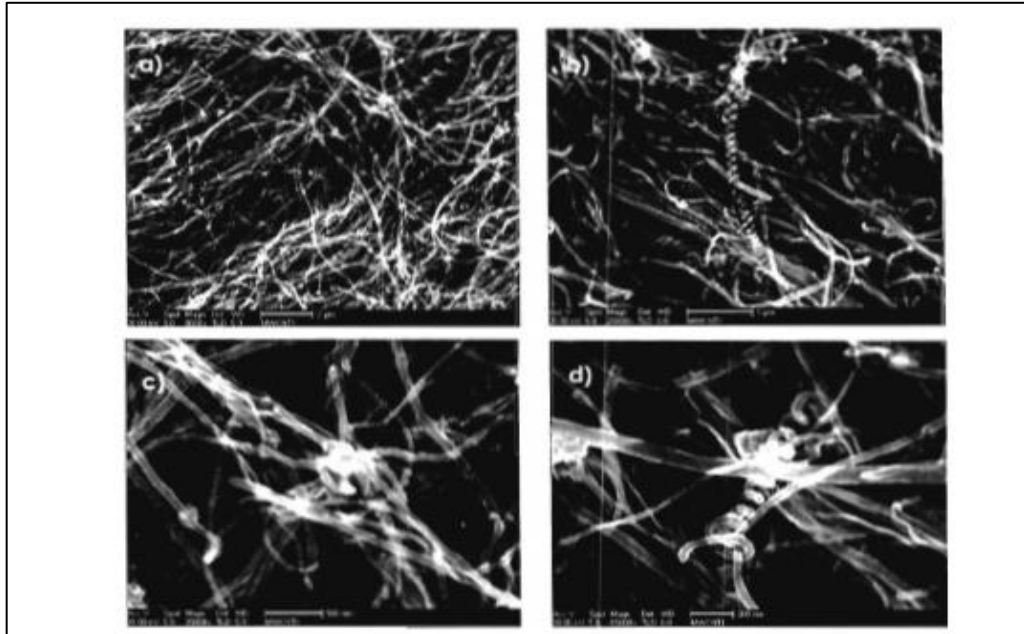
Las bobinas ubicadas bajo el arreglo de lentes dirigen al haz de electrones de izquierda a derecha y de arriba a abajo de tal forma que se realiza un barrido en toda la superficie de la muestra que se encuentra en la base de la cámara de vacío. Los electrones que golpean la muestra salen difractados hacia el detector. Este último capta esa señal y la manda a un procesador donde se convierte en imagen.

Según un estudio que se realizó en México, en el cual funcionalizaron nanotubos de carbono de múltiple capa con un plasma de CO<sub>2</sub> obtuvieron como resultado en el análisis infrarrojo lo que se muestra en la figura 10 por lo que se espera tener estos resultados en las imágenes del SEM.

---

<sup>31</sup> SRIVASTAVA, Deepak; MENON, Madhu; DARAIO, Jin; SADANADAN, Bindu; RAO, Apparao. *Phys. Vacancy-mediated mechanism of nitrogen substitution in carbon nanotubes*. <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.69>.

Figura 7. Tipos de vibraciones moleculares



Fuente: espectros FT-IR de los NTC expuestos a un plasma de CO<sub>2</sub> durante 15, 30 y 60min.  
<https://docplayer.es/93385539-Evaluacion-de-concentracion-de-gases-energeticos-obtenidos-del-reformado-de-gases-de-efecto-invernadero-por-plasma-luis-josimar-vences-reynoso.html>.

Consulta: 7 de noviembre de 2018.





### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

En la tabla IV, se presentan las variables independientes y las variables dependientes.

Tabla IV. **Variables independientes y variables dependientes**

Caracterización de MWNTC's-OX	
<b>Variables independientes</b>	<b>Variables dependientes</b>
Tamaño de la molécula	Longitud de onda
Diámetro del nanotubo	Masa
Humedad relativa del aire	Volumen
Tiempo	Concentración
Presión	Porcentaje de absorción
	Temperatura
Evaluación mecánica de la mezcla de cemento tipo portland con la adición de MWNTC's.	
<b>Variables independientes</b>	<b>Variables dependientes</b>
Presión	Proporción de cemento
Tiempo de curado	Proporción de arena
Temperatura de curado	Proporción de agua
Humedad relativa	Proporción de nanotubos funcionalizados
	Masa
	Volumen
	Diámetro de probetas

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación de campo de estudio**

Este estudio abarcó el campo de nanomateriales aplicados a matrices cementicias, mediante la utilización de nanotubos de carbono funcionalizados por medio de una síntesis tradicional, se realizó en un laboratorio de investigación y desarrollo que busca la calidad e innovación del cemento, la ubicación de este laboratorio es en el Centro Tecnológico del Concreto, (CETEC), Cementos Progreso.

El proyecto consistió en una evaluación de resistencia mecánica de una mezcla de cemento tipo portland mediante la adición de nanotubos de carbono oxidados utilizando una técnica de síntesis tradicional con ácido sulfúrico y peróxido de sodio.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Jazmin Aracelly Cardona Valdez
  
- Asesorado por: ingeniera química, PhD Marlene Susana Arrechea Alvarado.
  - Colegiada No. 1593
  
- Profesional de la empresa Cementos Progreso
  - Gerente del Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC). Lic. Luis Velásquez Coronado.

- Investigador del Centro Investigación y Desarrollo (CETEC). Licda. Carmela Barrientos.
- Análista de laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo (CETEC). Lic. Ricardo Posadas.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

- Equipo de protección personal
  - Botas de laboratorio
  - Bata
  - Mascarilla química
  - Filtros de gases orgánicos y gases ácidos
  - Guantes de neopreno
  - Lentes de protección
  - Guantes térmicos
  - Vestimenta no tallada
- Reactivos
  - Nanotubos de carbono multicapa de marca HWNANO al 90 % en pureza.
  - Arena marca sika.
  - Cemento tipo Portland (UGC) de Cementos Progreso.
  - Agua desmineralizada.
  - Aceite mineral.
  - Cloruro de sodio.
  - Azufre.

- Instrumentos de medición
  - Balanza analítica
  - Cronómetro
  - Metro
  - Probeta 100mL, 250mL y 500mL
  - Beacker varias capacidades
  - Pipetas 5mL y 10mL
  
- Equipo
  - Equipo de espectroscopia infrarrojo
  - Equipo difractómetro
  - Equipo de compresión
  - Vidrios de reloj
  - Mortero y pistilo
  - Cápsulas de porcelana
  - Plancha de agitación magnética
  - Equipo de ultrasonido de baja potencia
  - Horno eléctrico con humidificador
  - Molino de materia prima
  - Espátula
  - Soporte universal
  - Campana de extracción con entrada de gas inerte
  - Moldes especímenes cúbicos de 50mm o 2pulg
  - Barrilla compactadora
  - Martillo con cabeza de cuero o caucho
  - Cuchara
  - Mezcladora

- Tazón
- Paleta
- Mesa
- Molde de flujo
- Apisonador

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Se realizó la evaluación de resistencia mecánica de cemento mediante la adición dosificada de 0,01, 0,03 y 0,05 % de nanotubos de carbono de pared múltiple MWCNT funcionalizados en una reacción utilizando la técnica tradicional de síntesis con ácido sulfúrico y peróxido de sodio. Para verificar las propiedades físicas y químicas de los MWNCT-OX se necesita la utilización de técnicas de caracterización.

Esta caracterización se determinó conforme a:

- Absorción en función de la concentración
- Comportamiento de la masa conforme a la temperatura
- Técnica de espectrometría infrarroja (FT-IR)

El espectrómetro infrarrojo que se utilizó en la investigación es un modelo para transformadas de Fouriers 100 de Perkin Elmer con unidad de ATR, cuyo elemento enfocante es un diamante/ZnSe, en un rango de frecuencias de 650-4000 /cm y para el método de cápsulas de KBr en un rango de 450-7800 1/cm.

Esta técnica de caracterización se ejecutó por medio de un haz de luz, el cual se convierte en que el 1 % es de luz y el 99 % es de calor transferido a la

muestra, por dicha razón esta técnica se realizó utilizando un refrigerante. Este análisis se encargó de determinar la concentración de los grupos orgánicos formados sobre los nanotubos al estar funcionalizados, midiendo su absorbancia.

- Técnica de análisis de termogravimetría

Se utilizó el equipo de Mettler Toledo, TGA 1Start System. Esta técnica se encargó de caracterizar el comportamiento de una muestra con relación entre peso de masa conforme al aumento de temperatura.

- Técnica de difracción

Se realizó utilizando un difractómetro PANalytical Empyrean, el cual uno de los fenómenos físicos que se producen es interaccionar un haz de rayos X con una determinada longitud de onda, es alrededor de los 0,02 Å ( $\lambda = 10^{-10}$  m). El barrido durante 8 minutos ajustará el equipo entre los ángulos  $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ .

Se utiliza el software HighScore Plus (versión 4,5) para obtener los resultados. El equipo posee una lámpara de cobre con la que realiza el análisis a una longitud de onda correspondiente a 1,54060Å. A partir del difractograma de Rayos X de las nanopartículas aisladas de la disolución, es posible determinar su tamaño medio.

- Ensayo universal de evaluación de resistencia mecánica

Se utilizó la máquina de ensayo de resistencia a compresión del área Toni Technik ToniZEM 1547. Este ensayo se basó en una edad de la muestra de

28 días, la cual considera que el desarrollo de la resistencia mecánica ya está avanzado, utilizando moldes especímenes cúbicos cumpliendo con la norma COGUANOR NTG 41003- H4. Se realiza la adición a diferentes proporciones de 0,1, 0,3 y 0,5 % máxicas de MWNTC's a una mezcla de cemento.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

El estudio de este trabajo consiste en la evaluación de resistencia mecánica del cemento tipo Portland con la adición de los MWNTC's-OX. A continuación, se detallan las metodologías para realizar las mediciones.

La metodología se divide en los siguientes aspectos:

- Caracterización de los nanotubos de carbono funcionalizados

Se realizó la caracterización utilizando espectroscopia infrarroja (FT-IR), termogravimetría (TGA) y análisis de difracción (XRD) de una muestra de nanotubos de carbono de pared múltiple, sintetizados tradicionalmente por medio de una oxidación con ácido sulfúrico y peróxido de sodio. Esta muestra fue sintetizada por la doctora Susana Arrechea en su estadía corta de investigación en España, realizando un posdoctorado en la Universidad de Castilla-La Mancha, campus de excelencia internacional. Era necesario realizar esta caracterización para observar que la muestra obtenida fuera el producto esperado como nanotubos de carbono de múltiple capa totalmente oxidados.

- Espectroscopía infrarroja

Se colocó la mezcla en un rango de 0,5-1 mg en la punta del diamante, se hizo presión con la prensadora y se limpió el área removiendo el material



excedente. Para finalizar se limpió la punta del diamante con etanol y Kimwipes de Kimtech, reutilizando la mezcla que se colocó en el diamante.

“Con el fin de hacer medidas en una muestra, se transmitió un rayo monocromo de luz infrarroja a través de la muestra, y se registra la cantidad de energía absorbida. Repitiendo esta operación en un rango de longitudes de onda de interés (por lo general, 4 000-400  $\text{cm}^{-1}$ ) se puede construir un gráfico.”<sup>32</sup>

- Análisis termogravimétrico

El proceso de degradación térmica utilizando análisis termogravimétrico (TGA) determinó el cambio de la masa de la mezcla en función de la temperatura.

Se tomó una muestra sólida en un mortero y se trituró hasta tener una fineza de 200 mallas aproximadamente. Se utilizó la balanza de precisión para medir de la muestra triturada 50mg colocándolo en un crisol, seguidamente se toma la muestra y se colocó en el horno programado para una elevación de temperatura lineal de 30 °C-700 °C. Es deseable tener una cámara de reacción dentro del horno, la cual permite que el trabajo se lleve a cabo dentro de una amplia variedad de condiciones (atmósfera inerte, oxidante o reductora o sobre vacío).

---

<sup>32</sup> ESPARZA ESPARZA, Bertra Maria. Caracterización de nanotubo de Carbono por difracción de rayo -x de alta resolución (hr-xrd). <<https://es.scribd.com/document/404340863/Introduccion-a-los-nanomateriales-docx>>

- Análisis de difracción

Se prepara la muestra, teniendo una fineza entre 5-10, luego se colocó la muestra en el anillo para elaborar la pastilla, seguido de eso se colocó la placa encima del anillo para compresionar la muestra y se elaboró una pastilla sin deformaciones. Luego se introdujo cuidadosamente en el equipo y se procedió a leer los resultados en el difractograma.

- Dispersión de nanotubos de carbono

Primero se prepararon las dosis de nanotubo de carbono de 0,01, 0,03 y 0,05 %, se realizó un peso proporcional de nanotubos de carbono según cada dosis para el uso 121,5 ml de agua que sirvió para la elaboración de la pasta, seguido de eso se mezcló con 135 ml agua y 0,5 ml de glenium. Luego se introdujo en el equipo de ultrasonido 30 min, el tiempo de dispersión debe ser preciso y no se debe dejar reposar la muestra.

- Llenado de los moldes cúbicos

Se aplicó un recubrimiento delgado de un desencofrante a las caras interiores del molde. También aceites minerales utilizando un paño impregnado. Se secaron las caras del molde y la placa de base con un paño para quitarles cualquier exceso del desencofrante y para alcanzar un recubrimiento aún más delgado en las superficies interiores. Se comenzó a llenar los moldes de especímenes dentro de un tiempo total no mayor de 2 min y 30 s después de completar la mezcla inicial de la COGUANOR NTG 41003 h4 13/26. Se colocó una capa de la mezcla utilizando únicamente la mitad de la profundidad del molde, en todos los compartimientos del cubo.

Se apisonó el mortero en cada compartimiento cúbico, 32 veces en aproximadamente 10 s en 4 rondas, cada ronda debe ser en ángulos rectos respecto de las otras y debe consistir en ocho golpes adjuntos sobre la superficie del espécimen. Se introdujo la otra parte del molde hasta llenarlo, se pasa otra ronda de 32 veces en aproximadamente 10 s en 4 rondas. Se pasó una pala para nivelar la mezcla dejándola completamente plana. Se aplicó una pequeña cantidad de gelatina de petróleo a la superficie total de la cara del molde que estará en contacto con la placa de base. Se completó una ronda de ensayos sobre cada cemento en diferentes días. Se almacenaron y se ensayaron todos los especímenes como se prescribe en los numerales siguientes. Se ensayaron todos los cubos a la edad de 7 días.

- Almacenaje de los cubos

Inmediatamente, después de completar el modelo, se colocaron los especímenes de ensayo en un gabinete húmedo o cuarto húmedo. Todos los especímenes de ensayo, inmediatamente después del moldeo, deben mantenerse en sus moldes sobre placas de base en un gabinete húmedo o cuarto húmedo desde 20 a 72 h con sus superficies superiores expuestas al aire húmedo pero protegidas del goteo de agua.

Si los especímenes se remueven de los moldes antes de 24 h, se colocan sobre estantes del gabinete húmedo o cuarto húmedo hasta que tengan 24 h de edad. Luego, los especímenes, (excepto aquellos para ensayos de 24 h) se sumergen en agua saturada de cal, en tanques de almacenaje construidos de materiales no corrosivos. El agua de almacenaje debe conservarse limpia cambiándola cuando sea necesario.

- Evaluación de la resistencia mecánica

Se secó cada espécimen a una condición de superficie seca, y se les removió cualquier grano de arena suelta o incrustación de las caras que estuvieron en contacto con los bloques de apoyo de máquina de ensayo. Se controló la planicidad de estas caras aplicándoles una regla recta. Si hay una curva apreciable, se lija la cara o caras hasta conseguir superficies planas o se descarta el espécimen. Se debe hacer un control periódico del área de la sección transversal de los especímenes. Se aplicó la carga a las caras de espécimen que estuvieron en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde. Se colocó cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo. Se aplicó la velocidad de carga con una velocidad relativa de movimiento entre las platinas superior e inferior correspondiente a una carga sobre el espécimen con el rango de 900 a 1 800 N/s (200 a 400 lb/s).

Se mantuvo esta velocidad de movimiento designada de la platina durante la primera mitad de la aplicación de la carga máxima anticipada y no se hizo ningún ajuste en la velocidad de movimiento de la platina en la última mitad de aplicación de la carga especialmente mientras el cubo está fluyendo antes de la falla.

- Pruebas comparativas en propiedades mecánicas

Las pruebas en propiedades mecánicas del cemento tipo Portland con nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) oxidados y MWNCT sin funcionalizar utilizan los valores de resistencia, contenido de muestra, se realizó un análisis comparativo, obteniendo la eficiencia de la muestra por medio de una relación entra resistencia/contenido. Posterior a esos cálculos se obtuvo el resultado final de la mezcla de cemento más eficiente.

### 3.7. Formato de toma de datos originales

En las siguientes tablas se muestra la toma de datos originales.

Tabla V. **Caracterización de nanotubos de carbono funcionalizados por oxidación (espectroscopia infrarroja)**

Grupo funcional	Banda de absorción (cm <sup>-1</sup> )	Tipo de vibración
O-H	3 339	Estiramiento
C-H	2 958	Saturado
COOH	1 728	Puente de hidrógeno
C-O	1 017	Estiramiento
MWCNT-OH	676	Deformación

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Caracterización de nanotubos de carbono funcionalizados por oxidación (análisis termogravimétrico)**

Muestra	Flujo N2 mL/min	Rampa de temperatura	%NTC	% NTC perdido	Temperatura (°C)	Resultado de la ecuación
MWCNT	50	20	98,89	1,105	605	326,56
MWCNT-OH	50	20	98,47	1,53	605	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Caracterización de nanotubos de carbono funcionalizados por oxidación (análisis de difracción)**

Muestra	Cristalino	Fases encontradas	Observaciones
MWCNT		002	
MWCNT-OX	100	002	Se produce con mayor intensidad

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento con diferentes dosificaciones**

Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Peso (g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Psi	Edad
24/07/2018	R1	0,20 %	36	20,58	2 985	3
24/07/2018	R2	0,20 %	36,4	19,85	2 879	3
24/07/2018	R3	0,20 %	35,5	20,32	2 947	3
24/07/2018	R4	0,20 %	35,9	20,8	3 017	3
24/07/2018	R5	0,20 %	36,2	20,35	2 952	3
24/07/2018	R6	0,20 %	36,5	20,91	3 033	3
24/07/2018	R1	0,20 %	36,4	24,02	3 484	7
24/07/2018	R2	0,20 %	36,3	24,65	3 575	7
24/07/2018	R3	0,20 %	35,5	24,37	3 535	7
24/07/2018	R4	0,20 %	35,9	24,29	3 523	7
24/07/2018	R5	0,20 %	35,5	20,64	2 994	7
24/07/2018	R6	0,20 %	34,9	25,07	3 636	7
24/07/2018	R1	0,20 %	35,1	32,25	4 677	28
24/07/2018	R2	0,20 %	35,9	33,33	4 834	28
24/07/2018	R3	0,20 %	34,9	33,28	4 827	28
24/07/2018	R4	0,20 %	34,6	33,18	4 812	28
24/07/2018	R5	0,20 %	34,8	32,41	4 701	28
24/07/2018	R6	0,20 %	34,7	33,28	4 827	28

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Esta sección se encuentra de forma detallada en el área de apéndices, datos calculados, dado a que se utilizaron los formatos de toma de datos originales para la recopilación de información y obtener así los resultados.

### 3.9. Análisis estadístico

Este análisis se llevó a cabo únicamente para los resultados obtenidos de resistencia mecánica de ambas muestras de cemento tipo Portland con adición de MWNTC's-OX y con adición de MWNTC's-prístinos. Fueron evaluadas a 3, 7 y 28 días de edad de curado, con dosificaciones de 0,01, 0,03y 0,05 % de cada muestra de nanotubos de carbono.

Debido a la diferencia de condiciones en los ensayos que se realizaron, se tuvo que mantener cuidadosamente el ordenamiento y clasificación de los datos, por lo que se realizó la comparación entre las muestras de cemento MWNTC's-OX y MWNTC's-prístinos a modo que sea una con otra.

Por ejemplo, se analizó la muestra de un curado a la edad de 3 días con la dosificación de 0,01 % y se comparó la media de ambas muestras, se analizó la muestra de un curado a la edad de 3 días con la dosificación de 0,03 % y se comparó la media de ambas muestras. Se analizó la muestra de un curado a la edad de 3 días con la dosificación de 0,05 % y se comparó la media de ambas muestras. Del mismo modo se hizo el análisis para las demás edades de curado 7 y 28 días.

Tabla IX. **Número de tratamientos y número de repeticiones, para la caracterización de los nanotubos de carbono funcionalizados**

Niveles	Muestra 1	Número de niveles:	3
Número de tratamientos		4	
Número de repeticiones		3	
Total de unidades experimentales		12	

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Número de tratamientos y número de repeticiones, para la evaluación de resistencia mecánica de la mezcla de cemento tipo Portland**

Niveles:	Muestra 1 Muestra 2 Muestra 3 Muestra 4 Muestra 5 Muestra 6	Número de niveles:	3
Número de tratamientos		3	
Número de repeticiones		18	
Total de unidades experimentales		54	

Fuente: elaboración propia.

- Análisis de la varianza ANOVA

En estadística, análisis de varianza ANOVA es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados. El análisis de varianza sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Típicamente, el análisis de varianza se utiliza para asociar una probabilidad a la conclusión de que la media de un grupo de puntuaciones es distinta de la media de otro grupo de puntuaciones.

- Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de valores  $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i\}$  de una variable  $x$  viene determinada por la suma de dichos valores, dividida por el



número de la muestra (n), representada matemáticamente de la siguiente forma:

$$\underline{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{n} \quad \text{[Ecuación no. 2]}$$

- Medidas de dispersión

Describen la cantidad de dispersión, o variabilidad que se encuentra entre los datos. El agrupamiento entre los datos indica una dispersión baja y viceversa.

- Varianza

Es la media de las desviaciones ( $\mu$ ) al cuadrado respecto de la media aritmética ( $\mu_p$ ) de una distribución estadística.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu - \mu_i)^2}{n-1}} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

- Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

- Coeficiente de Pearson

Para calcular el coeficiente de Pearson y su potencia cuadrada se hace uso del programa Microsoft Excel 2007 utilizando la fórmula PEARSON Y POTENCIA respectivamente.

- Cálculo de  $f$  y  $f$  crítica

Para calcular el factor  $f$  y  $f$  crítica se hace uso del programa Microsoft Excel realizando un análisis de varianza de un factor.

### **3.10. Plan de análisis de los resultados**

El análisis de los resultados cuantificables se realizará utilizando herramientas gráficas, para realizar la comparación de las características dimensionales analizadas para la mezcla de cemento tipo Portland con una dosificación de 0,01, 0,03 y 0,05 % de nanotubos funcionalizados, en el tiempo estipulado de medición.

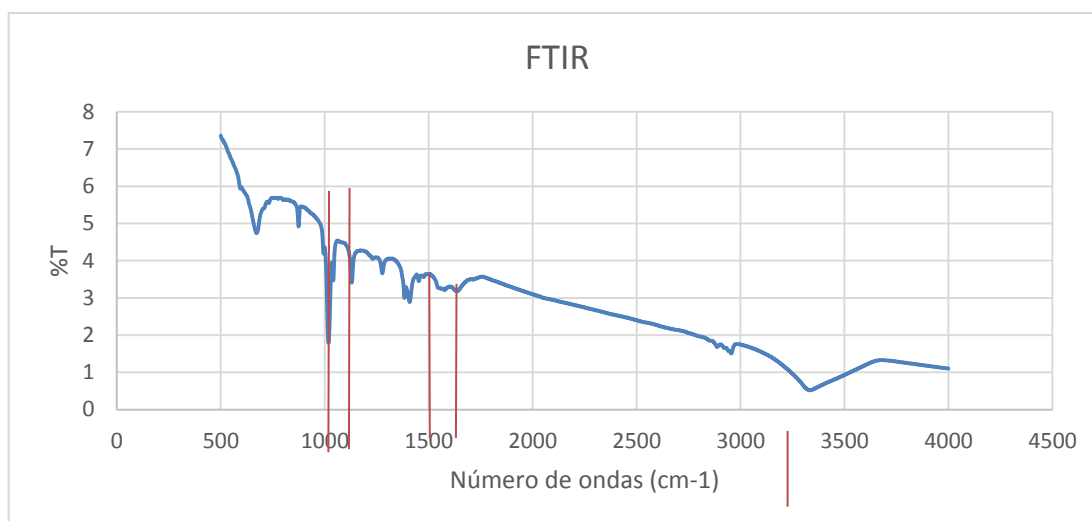
### **3.11. Programas por utilizar en el análisis de los datos**

- Microsoft Word 2013, por utilizar en la redacción e interpretación de resultados.
- Microsoft Excel 2013, por utilizar para la realización de tablas y análisis de varianza.
- Qtiplot, por utilizar para la realización de gráficos.



## 4. RESULTADOS

Figura 8. Espectros FT-IR de los MWNCT's-OX, expuestos por medio de pastilla de KBr



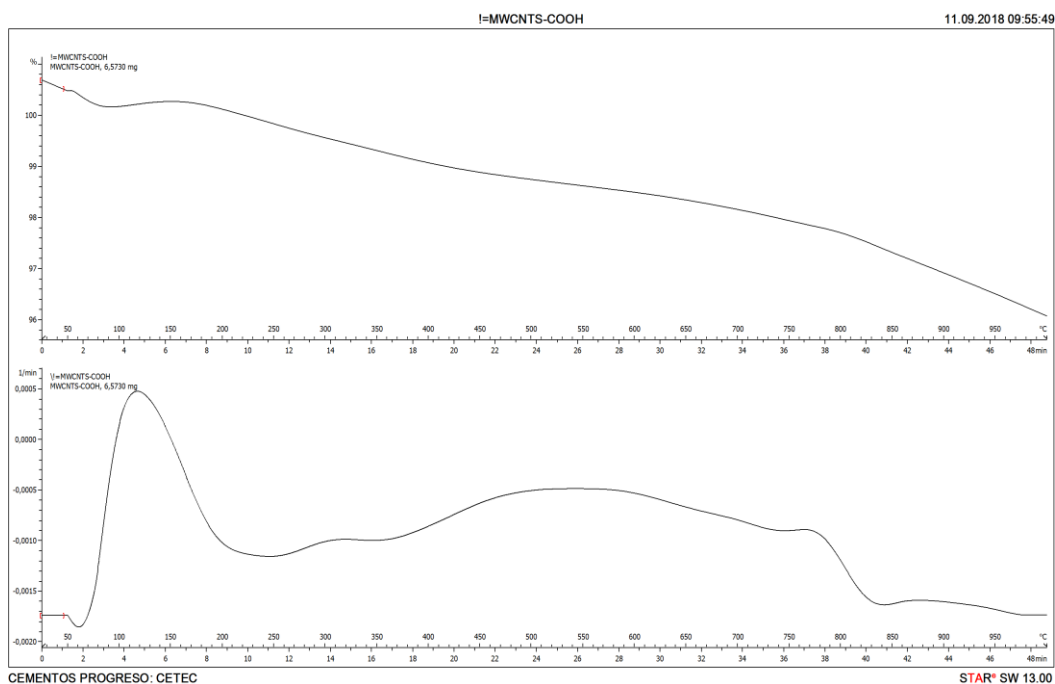
Fuente: datos experimentales obtenidos en el laboratorio de Análisis instrumental de la Universidad de Valle de Guatemala.

Tabla XI. Bandas de absorción en el espectro FTIR de los MWCNT's-OX

Grupo funcional	Banda de absorción (cm <sup>-1</sup> )	Tipo de vibración
O-H	3 339,000	Estiramiento
C-H	2 958,000	Saturado
COOH	1 728,000	Puente de hidrógeno
C-O	1 017,000	Estiramiento
MWCNT-OH	676,000	Deformación

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Diagrama análisis termogravimétrico (TGA) de nanotubos de pared múltiple oxidados**



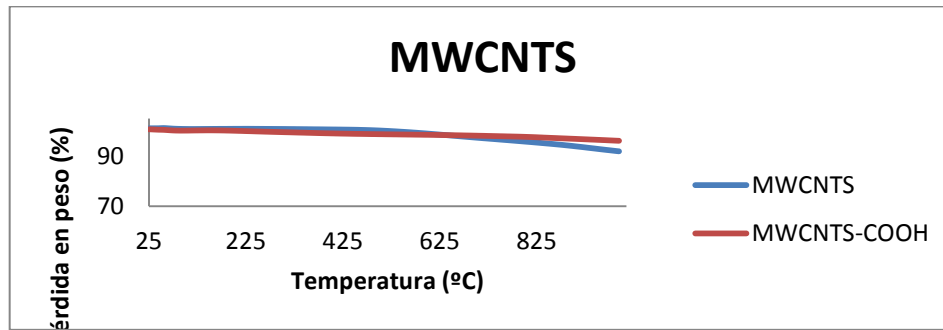
Fuente: datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Tabla XII. **Moléculas formadas por átomos de nanotubo de carbono por medio de la pérdida de peso conforme a la temperatura**

Muestra	Flujo N2 mL/min	Rampa de temperatura (°C)	% NTC	% NTC perdido	Temperatura (°C)	Resultado de la ecuación
MWCNT	50,000	20,000	98,895	1,109	605,000	326,564
MWCNT-OH	50,000	20,000	98,465	1,534	605,000	

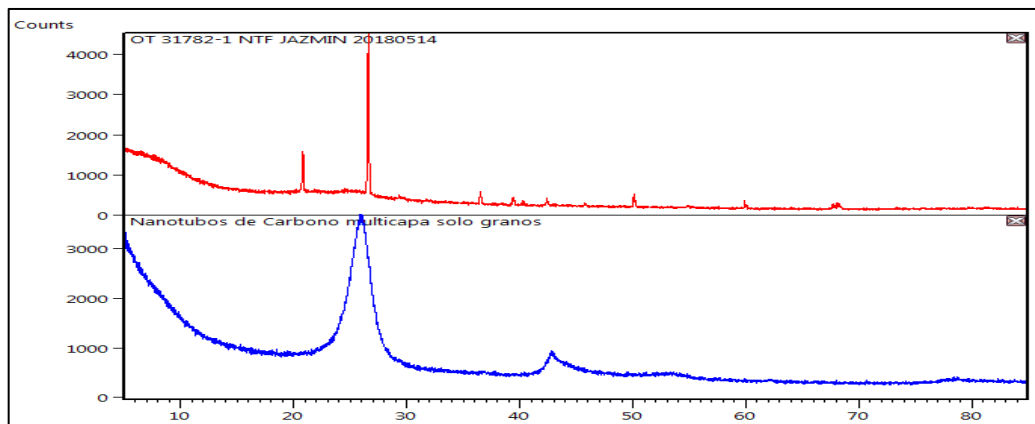
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Comparación del análisis termogravimétrico entre los nanotubos de carbono de pared múltiple oxidados (MWNTC's OX) y nanotubos de carbono de pared múltiple prístinos**



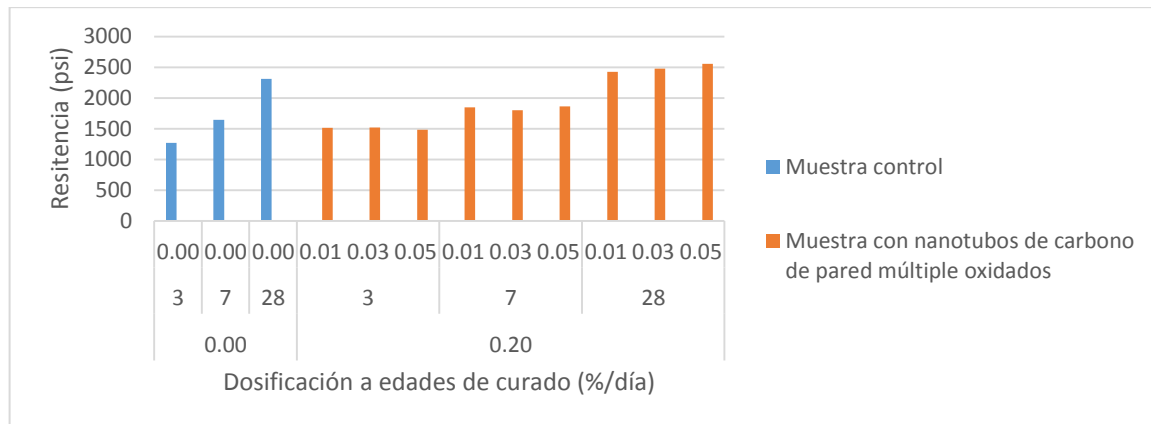
Fuente: datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala

Figura 11. **Difractograma de nanotubos de carbono de pared múltiple oxidados (MWNTC's OX) y nanotubos de carbono de pared múltiple prístinos**



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

Figura 12. **Resistencia mecánica (psi) de una mezcla de cemento UGC con dosificaciones de 0,01 %, 0,03 % y 0,05 % (m/m) de MWNT's-OX, en comparación con una mezcla control**



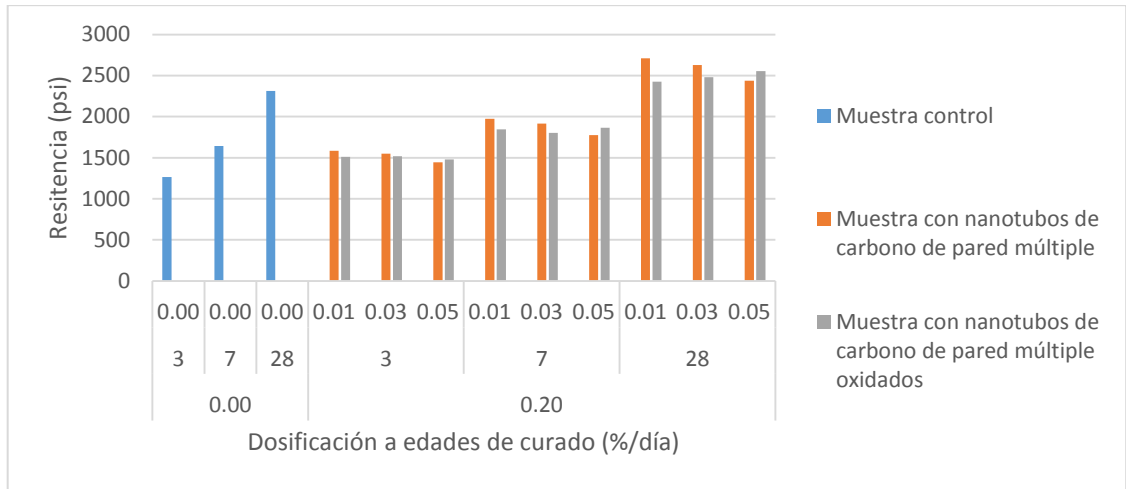
Fuente: datos experimentales obtenidos en el laboratorio Químico de Cemento, CETEC, CI+D, Cementos Progreso, S.A., finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala

Tabla XIII. **Porcentaje mayor de resistencia que supera la mezcla de cemento UGC con dosificaciones de MWNTC's**

Dosificación (%)	Control (psi)	MWNT-OX (psi)	Porcentaje (%)
0,010	1 266,097	1 512,161	16,273
0,010	1 266,097	1 519,079	16,654
0,010	1 266,097	1 479,981	14,452
0,030	1 642,713	1 845,444	10,9856
0,030	1 642,713	1 801,906	8,835
0,030	1 642,713	1 863,304	11,839
0,050	2 311,605	2 425,334	4,689
0,050	2 311,605	2 479,177	6,759
0,050	2 311,605	2 553,691	9,479

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Comparación de resistencia mecánica (psi) de una mezcla de cemento UGC con dosificaciones de 0,01 %, 0,03 % y 0,05 % (m/m) de MWNTC's-OX y MWNTC's-prístinos**



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

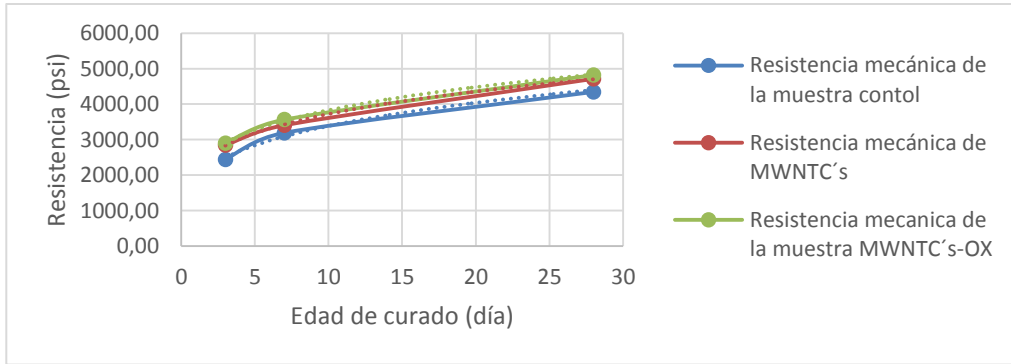
Tabla XIV. **Porcentaje mayor de resistencia que supera la mezcla de cemento UGC con dosificaciones de nanotubos de carbono**

Dosificación (%)	Edad (días)	MWNTC's (psi)	MWNTC's-OX (psi)	Porcentaje (%)
0,01	3	1 584,61064	1 512,16084	4,57208829
0,03	3	1 547,41519	1 519,07911	1,83118775
0,05	3	1 445,50861	1 479,98163	-2,38483657
0,01	7	1 974,36742	1 845,44382	6,52986871
0,03	7	1 916,79608	1 801,90614	5,99385308
0,05	7	1 775,26021	1 863,30439	-4,95950815
0,01	28	2712,1155	2 425,33443	10,574073
0,03	28	2626,77603	2 479,17672	5,61902892
0,05	28	2436,2083	2553,6906	-4,82234213

Fuente: elaboración propia.



Figura 14. **Comparación de resistencia mecánica en dosificación de 0,05 % (m/m)**



Muestra	Ecuación	R <sup>2</sup>	Tendencia
MWNTC's-OX	$y = 863,81\ln(x) + 1\ 925$	R <sup>2</sup> = 0,999	Logarítmica
MWNTC's	$y = 848,52\ln(x) + 1\ 850,1$	R <sup>2</sup> = 0,992	Logarítmica
Control	$y = 849,34\ln(x) + 1\ 521,8$	R <sup>2</sup> = 0,999	Logarítmica

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

Tabla XV. **Análisis estadístico entre las resistencias que añaden la muestra con MWNTC's-OX o MWNTC's-prístinos**

Muestra	Dosis de nanotubo de carbono (%)	Resistencia (psi)	Edad (días)	Muestra	Resistencia (psi)	Desviación	Varianza
MWNTC's	0,01	3098,50	3	Ox	2968,68	91,7966098	83831,98
MWNTC's	0,01	3867,17	7	Ox	3457,70	289,537528	93434,1216
MWNTC's	0,01	5212,00	28	Ox	4779,72	305,669955	42,1887351
MWNTC's	0,03	2934,35	3	Ox	2925,17	6,49528561	1545,55685
MWNTC's	0,03	3562,13	7	Ox	3506,53	39,3135708	18512,0898
MWNTC's	0,03	5009,12	28	Ox	4816,70	136,059141	1763,47342
MWNTC's	0,05	2841,61	3	Ox	2901,00	41,9937307	12260,5852
MWNTC's	0,05	3405,78	7	Ox	3562,37	110,727527	5626,54407
MWNTC's	0,05	4713,81	28	Ox	4819,89	75,0102931	#¡DIV/0!

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó la caracterización de muestras ya existentes de MWCNT-OX utilizando espectroscopia infrarroja (FT-IR), termogravimetría (TGA) y análisis de difracción (XRD). Para observar que la muestra obtenida fuera el producto esperado como nanotubos de carbono de múltiple capa totalmente oxidados.

“La caracterización por medio de espectroscopia FT-IR es una herramienta muy importante para la determinación de la identidad de grupos funcionales, sabiendo que en mayor grado sean hidroxilos y en menor grado carboxilos en la superficie del nanotubo de carbono”,<sup>33</sup> esto se observa mediante la detección de frecuencias de absorción. Realizando el procedimiento como se muestra en la figura 10 se determinó que inicialmente la vibración corresponde a un estiramiento del enlace OH en  $3339\text{ cm}^{-1}$ .

Las bandas de adsorción asimétricas pertenecientes a los grupos carboxilos se encuentran en  $1\ 728$ ,  $1\ 635$  y  $1\ 549\text{ cm}^{-1}$ . La banda  $1130\text{ cm}^{-1}$  respectiva a la deformación del cuerpo de los nanotubos de carbono. La vibración en  $1\ 017\text{ cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento simétrico del grupo C-O, confirmando así la funcionalización en la superficie.

El análisis termogravimétrico determina la estabilidad térmica que tiene la muestra, esta caracterización se llevó a cabo con las condiciones de 25-1000°C teniendo una rampa de 20 °C/min. En el caso de los nanotubos de carbono de pared múltiple, la técnica proporciona la información sobre el grado de funcionalización que estos consiguen, a través del porcentaje de pérdida de masa por calefacción

---

<sup>33</sup> MIRANDA MIERES, Jhonny Eduard. *Síntesis y caracterización de nanocompuestos de polipropileno heterofásico y nanotubos de carbono multipared*. p. 64.

de los grupos funcionales, por el aumento de temperatura de los grupos funcionales unidos covalente a las paredes de las nanoformas.<sup>34</sup>

Como se puede observar en la figura 11, los nanotubos de carbono de pared múltiple oxidados empiezan a perder peso desde los 175 °C hasta los 1 000 °C, Estas son en proporciones pequeñas debido a la aparición de defectos en la superficie de los nanotubos de carbono, estos defectos en su estructura son provocados por la oxidación, que se encarga de dañar las paredes del nanotubo y así mismo hacer que pierda su estabilidad térmica.

Como se puede observar en la figura 12, los nanotubos de carbono de pared múltiple son estables al aumentar su temperatura a 1 000 °C. También se puede observar en la tabla 12 que se realizó un estudio por medio de la ecuación 1 (apéndice 2), cálculo de una corrección previa de pérdida de peso (muestra funcionalizada material de partida), donde la muestra se encuentra en una relación de 3326.564:1 átomos de carbono por molécula de grupo hidroxilo (OH), por lo que se puede decir que la muestra tiene un bajo porcentaje de oxidación en la pared del nanotubo.

Se puede identificar por un difractograma (figura 13) de los patrones de XRD de MWCNT y MWCNT-OX, que muestran la típica intensidad característica en (002), que se produce en el número entero  $2\pi / C0$ , 25 ° y (100) de MWCNT, el cual confirma que la estructura es porosa. El tratamiento con MWCNT-OX a comparación de los MWCNT-prístinos muestran diferencia en la intensidad máxima que obtiene en el pico (002), esto debido a la oxidación que fue sometida la muestra. Este aumento se debe también a la ganancia de múltiples especies cristalinas.<sup>35</sup>

Estas surgen de la eliminación de las impurezas del carbono amorfo, a la que se llevan los nanotubos en el método de la oxidación, provocando así un daño en la estructura del nanotubo.

---

<sup>34</sup> VIZUETE MEDRANO, María. *Diseño y síntesis de nanotubo de carbono y nanocuernos de carbono con aplicaciones optoelectrónicas*. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/9151>.

<sup>35</sup> CAMPO PERFECTO, Teresa. *Síntesis y caracterización de nanotubos de carbono y nanohilos de silicio*.

La evaluación de la resistencia mecánica se realizó a 3, 7 y 28 días de curado, ya que a estas edades presentan una mejoría en el coeficiente de variación en función al tiempo de fraguado que tiene el cemento. Para este estudio se realizaron diferentes muestras, como la muestra blanco, la cual es solo cemento, muestras control la cual contiene agua, glenium y cemento, también muestras con adición de dosificaciones de MWNTC's-OX o MWNTC's-prístinos de 0,01, 0,03 y 0,05 %, agua, glenium, y cemento. Las cuales fueron previamente tratadas con una metodología de dispersión.

Los resultados, como se pueden observar en la figura 14, presentan un crecimiento en la resistencia mecánica de la muestra con adición de MWNTC's oxidados, esta aumenta dado que los nanomateriales se encargan de mejorar las propiedades mecánicas del cemento y mejoran el área superficial, dando así un aumento en comparación a la muestra control con un promedio de porcentajes de 15,79 % a una edad de 3 días, 10,56 % a una edad de 7 días y 6,97 % a una edad de 28 días más resistente a la fuerza ejercida.

Este comportamiento es resultado de la adición de MWNTC's-OX, dado que se encarga que las resistencias aumenten a temprana edad. Se puede considerar que a los 28 días de curado la muestra cumple su resistencia máxima, por lo que se puede observar que a mayor dosificación de MWNTC's-OX se logra, obtiene mayor resistencia.

En el análisis comparativo entre las muestras de cemento UGC con MWNTC's OX y MWNTC's-prístinos, como se puede observar en la figura 15, muestra un mayor crecimiento de resistencia el estudio de los MWNTC's prístinos, teniendo un comportamiento en promedio de 7,23 %, 4,48 % y 4,05 %, respectivamente a las dosificaciones utilizadas.

Se observa que en las dosificaciones de 0,01 % y 0,03 % existe un aumento de resistencia en esta muestra dado a que la adición de MWNTC's da mejoras significativas, esto puede deberse a la unión adecuada entre C-S-H, por lo tanto, provoca la reducción de propagación de micro grietas (Hallad y Banapurmath, 2014) y al compararlos con los MWNT's-OX sucede todo lo contrario debido a que estos presentan menos resistencia mecánica por una hidratación incompleta de la pasta de cemento, y liberan progresivamente agua durante el tiempo de curado formando así micro grietas.

Es importante recalcar que en un estudio de SEM podría analizarse a detalle la morfología de las muestras y confirmar la interpretación realizada acorde con las investigaciones publicadas con este tipo de compuestos.

“En el caso de la dosificación de 0,05 % de MWNTC's-OX, la muestra con presenta un caso contrario a las anteriores siendo esta una mejor adición para las pruebas a las diferentes edades, esto es provocado porque a mayor dosificación de MWNTC's prístinos ya no presenta mejorías en la resistencia.”<sup>36</sup> Por lo que se puede rechazar la hipótesis nula dado porque tiene una variación significativa con una desviación máxima de 305,67 en los resultados de resistencia mecánica obtenida por medio de una mezcla de cemento tipo Portland, adicionados con MWNTC's-OX entre MWNTC's-prístinos.

---

<sup>36</sup> POSADAS VILLEDA, Ricardo Antonio. *Evaluación del efecto de compositas de nanotubos de carbono sobre la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland tipo I (PM)*. Protocolo de tesis de licenciatura en Universidad de San Carlos de Guatemala, 98 pp,

## CONCLUSIONES

1. La resistencia mecánica de una mezcla de cemento con adición de MWNTC's-OX aumenta significativamente hasta un 16,65 % más resistente. También se comprueba las resistencias a temprana edad que brinda esta adición al cemento.
2. Por medio de la caracterización de espectrometría infrarroja FT-IR, termogravimetría TGA y difracción XRD, la muestra de nanotubos de MWNTC's-OX, presenta todas las características específicas: formación de los grupos funcionales, pérdida de estabilidad térmica y muestra intensidad máxima en el pico 002, lo cual indica que los nanotubos de capa múltiple están oxidados, se encontró un bajo porcentaje oxidación esperadas de una funcionalización en la superficie de las paredes de la nanoforma.
3. La resistencia mecánica de una mezcla cemento UGC con aditivos de nanotubos de carbono pared múltiple aumenta efectivamente con una dosis de 0,01 % (m/m), dando hasta un 16,28 % (r/r) más de resistencia mecánica al cemento, dado a que mejora el efecto que ofrece el cemento y con mayor área superficial.
4. La resistencia mecánica de las muestras de cemento UGC con MWNTC's-OX muestra menor resistencia que los MWNTC's-prístinos, considerando que se debe al fuerte comportamiento hidrofílico y la diferencia de la capacidad de crear refuerzos con puentes para evitar las

grietas, reforzando la matriz C-S-H aumentando la cantidad de alta rigidez y disminuyendo su porosidad.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio con dosificaciones más altas entre 0,05 % - 0,07 % para determinar si existe un mejor comportamiento y valores más altos de resistencia.
2. Adicionar a la mezcla nanofibras de carbono o grafeno.
3. Modificar la metodología de dispersión de nanotubos de carbono de capa múltiple en el agua al agregar glicol y ser llevados al equipo de ultrasonido.
4. Agregar la técnica de barrido de SEM, la cual se encarga de hacer un análisis que se realiza por medio de un microscopio electrónico de barrido.





## BIBLIOGRAFÍA

1. ANDRADE CRUEL, Marlene Lariza; LÓPEZ LÓPEZ, Lluvia Itzel; SÁENZ CALINDO, Aidé. *Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas*. Coahuila, México: Universidad Autónoma de Coahuila, 2012. 145 p.
2. Asociación Española para la Calidad. *Normas ASTM*. [en línea]. <<https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/normas-astm>>. [Consulta: 7 de octubre de 2017].
3. BALANDRAN QUINTANA, René Renato; ROMERO VILLEGAS, Gabriel Iván; MENDOZA WILSON, Ana María; SOTELO MUNDO, Rogerio R. *Nanotubos de carbono y bionanotecnología Interciencia*. Venezuela: Asociación Interciencia Caracas, 2008. 336 p.
4. BORJAS RAMOS, J. *Caracterización de nanofibras de carbón modificadas superficialmente con plasma de etileno*. Hipedinger, A.N. Scian y E.F. Aglietti, *Comportamiento termomecánico de hormigones refractarios de liga fosfato. influencia de los aridos en las propiedades*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Plata, 2001. 180 p.
5. CAMPO PERFECTO, Teresa. *Síntesis y caracterización de nanotubos de carbono y nanohilos de silicio: aplicaciones tecnológicas*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid. 2012, 137 p.

6. CORNEJO, Laureano, *La nanotecnología y los materiales de construcción*. [en línea]. <<http://nuevatecnologiasymateriales.com/lananotecnologia-y-los-materiales-de-construccion/>>. [Consulta: 30 de diciembre de 2017].
7. CRUZ DELGADO, Víctor J.; AVILA ORTA, Carlos A.; PÉREZ CAMACHO, Odilia; GARCÍA ZAMORA, Maricela; COMPARÁN PADILLA, Víctor y MEDELLÍN RODRÍGUEZ, Francisco J. *Funcionalización de nanotubos de carbono para la preparación de nanocompuestos poliméricos*. México: San José del Cabo, BCS, 2001. 692 p.
8. ESPARZA ESPARZA, Bertra Maria. *Caracterización de nanotubo de Carbono por difracción de rayo -x de alta resolución (hr-xrd)*. [en línea]. <<https://es.scribd.com/document/404340863/Introduccion-a-los-nanomateriales-docx>>. [Consulta: 3 de octubre de 2018].
9. FLORÉZ, Laura. *Nanotubos de carbono, crece la oferta y baja precio*. [en línea]. <<http://www.plastico.com/temas/Nanotubos-de-carbono,-crece-la-oferta-y-baja-el-precio+3068695>>. [Consulta: 13 de octubre 2018].
10. GADIOU, R., SAADALLAH, S-E., PIQUERO, David; PARMENTIER, Vix-Guterl C. *The Influence of textural properties on the adsorption of hydrogen on ordered nanostructured carbons*. [en línea]. <<https://books.google.com.gt/books?id=yBb6FPcTRvUC&pg=PA283&pg=PA283&dq=GADIOU,+R.,+SAADALLAH,+S->>>. [Consulta: 10 de septiembre de 2018].

11. GONZÁLEZ VELÁZQUEZ, Viviana Jehová. *Nanomateriales de carbono, síntesis, funcionalización y aplicaciones*. Madrid, España: Universidad Carlos III Madrid, 2015. 353 p.
12. Grupo organizador de la Facultad de Ingeniería. *Tipos de cemento*. España: Universidad de Oviedo. 2012. 26 p.
13. HARRIS, Daniel C. *Análisis químico cuantitativo*. Barcelona, España: Reverté, 2001. 744 p.
14. JUANICO LORAN, José Antonio. *Síntesis y caracterización de nanofibras de carbono para su aplicación en la adsorción de gases tóxicos*. México: Universidad Autónoma Metropolitana División de Ciencias Básicas e Ingeniería Coordinación de Estudios de Postgrado, 2004. 127 p.
15. JONG, K.P. et al. *Carbon-Nanofibers: Catalytic Synthesis and Applications*. Editorial: Taylor and Francis Group. Nueva York, USA: 2000. 481 p.
16. KEITH BOWEN D.; TANNER BRIAN, K.; *High Resolution X-ray Diffractometry and Topology*. Nueva York, USA: Taylor & Francis Group, 2001. 48 p.
17. MARCONDES, C. G. N., MEDEIROS, M. H. F., J. MARQUES, Filho, P. Helene. *Nanotubos de carbono en concreto de cemento tipo Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción del agua*. Revista ALCONPAT, Brasil. 114 p.

18. MAUBERT F.; SOTO Marisela; S., LEÓN Laura; C., FLORES Ana Ma.; M., Jorge. *Nanotubos de carbono - La era de la nanotecnología razón y palabra*. Monterrey, México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores, 2009. 68 p.
19. MIRANDA MIERES, Jhonny Eduard. *Síntesis y caracterización de nanocompuestos de polipropileno heterofásico y nanotubos de carbono multipared*. Santiago Chile: Universidad de Chile Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas Departamento de Química Orgánica y Fisicoquímica Laboratorio de Polímeros, 2010. 156 p.
20. OSORIO, Jesús David. *Resistencia Mecánica del Concreto y resistencia a la compresión*. [en línea]. <<http://blog.360gradosenconcreto.com/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/>>. [Consulta: junio de 2013].
21. POSADAS VILLEDA, Ricardo Antonio. *Evaluación del efecto de compositas de nanotubos de carbono sobre la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland tipo I (PM)*. Trabajo de graduación de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 78 p,
22. PUIG, J. *Cemento de aluminato de calcio: origen, producción y aplicaciones*. cemento y hormigón. [en línea]. <<https://digital.csic.es/bitstream/10261/4654/1/cementos.pdf>>. [Consulta: 5 de septiembre de 2018].

23. Revista ARQHYS. 2012, 12. Tipos de cemento portland. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. [en línea]. <<http://www.arqhys.com/arquitectura/tipos-cemento-portland.html>>. [Consulta: 9 de agosto de 2018].
24. RODRÍGUEZ, José. *Concretos refractarios de bajo cemento para calderas acuatubulares*. [en línea]. <[http://www.aeta.org.ec/2do%20congreso%20cana/art\\_fabrica/Rodriguez,%20J%20Cocretos%20refractarios.pdf](http://www.aeta.org.ec/2do%20congreso%20cana/art_fabrica/Rodriguez,%20J%20Cocretos%20refractarios.pdf)>. [Consulta: 8 de octubre de 2018].
25. RUBINSON, Judith F., *Química analítica contemporánea*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 2000. 615 p.
26. SAUTHIER, Gabriel; FRAXEDAS, G; MORENO MANAS, M; MARTÍNEZ, MT. *Preparation and characterization of single-walled carbon nanotubes functionalized with amines*. [en línea]. <<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/169222/Improving-Carbon-Nanotube-Polymer.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Consulta: 9 de agosto de 2018].
27. SRIVASTAVA, Deepak; MENON, Madhu; DARAIO, Jin; SADANADAN, Bindu; RAO, Apparao. *Phys. Vacancy-mediated mechanism of nitrogen substitution in carbon nanotubes*. [en línea]. <<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.69>>. [Consulta: 23 de agosto de 2018].

28. VERA ROMERO, Iván, ESTRADA JARAMILLOA, Melitón; MÉNDEZ VÁSQUEZ, José, MARTÍNEZ REYES, José, ORTÍZ SORIANO, Agustina. *Perfiles de temperatura y análisis del potencial de eficiencia energética en una estufa de biomasa*. México: McGraw-Hill, 2015. 125 p.
  
29. VIZUETE MEDRANO, María. *Diseño y síntesis de nanotubo de carbono y nanocuernos de carbono con aplicaciones optoelectrónicas [en línea]*. <<https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/9151>>. [Consulta: 7 de junio de 2018].

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Datos calculados

- Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento con una dosificación de 0,01 % de MWNTC´s-OX.

Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Peso (g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia (psi)	Edad (días)
24/07/2018	R1	0,200 %	360	20,580	2985,000	3
24/07/2018	R2	0,200 %	36,400	19,850	2879,000	3
24/07/2018	R3	0,200 %	35,500	20,320	2947,000	3
24/07/2018	R4	0,200 %	35,900	20,800	3017,000	3
24/07/2018	R5	0,200 %	36,200	20,350	2952,000	3
24/07/2018	R6	0,200 %	36,500	20,910	3033,000	3
24/07/2018	R1	0,200 %	36,400	24,020	3484,000	7
24/07/2018	R2	0,200 %	36,300	24,650	3575,000	7
24/07/2018	R3	0,200 %	35,500	24,370	3535,000	7
24/07/2018	R4	0,200 %	35,900	24,290	3523,000	7
24/07/2018	R5	0,200 %	35,500	20,640	2994,000	7
24/07/2018	R6	0,200 %	34,900	25,070	3636,000	7
24/07/2018	R1	0,200 %	35,100	32,250	4677,000	28
24/07/2018	R2	0,200 %	35,900	33,330	4834,000	28
24/07/2018	R3	0,200 %	34,900	33,280	4827,000	28
24/07/2018	R4	0,200 %	34,600	33,180	4812,000	28
24/07/2018	R5	0,200 %	34,800	32,410	4701,000	28
24/07/2018	R6	0,200 %	34,700	33,280	4827,000	28

Fuente: elaboración propia.



- Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento con una dosificación de 0,03 % de MWNTC´s-OX.

Id	Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Peso (g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Psi	Edad
1	31/07/2018	R1	0,200 %	36,300	21,490	3 117,000	3
2	31/07/2018	R2	0,200 %	35,900	19,510	2 830,000	3
3	31/07/2018	R3	0,200 %	34,900	19,440	2 820,000	3
4	31/07/2018	R4	0,200 %	34,700	20,150	2 923,000	3
5	31/07/2018	R5	0,200 %	34,800	19,810	2 873,000	3
6	31/07/2018	R6	0,200 %	37,500	20,610	2 989,000	3
7	31/07/2018	R1	0,200 %	35,100	25,170	3 651,000	7
8	31/07/2018	R2	0,200 %	35,800	24,770	3 593,000	7
9	31/07/2018	R3	0,200 %	35,100	24,230	3 514,000	7
10	31/07/2018	R4	0,200 %	34,800	23,620	3 426,000	7
11	31/07/2018	R5	0,200 %	34,800	23,710	3 439,000	7
12	31/07/2018	R6	0,200 %	35,200	23,560	3 417,000	7
13	31/07/2018	R1	0,200 %	36,300	33,420	4 847,000	28
14	31/07/2018	R2	0,200 %	35,800	32,230	4 675,000	28
15	31/07/2018	R3	0,200 %	35,400	32,410	4 701,000	28
16	31/07/2018	R4	0,200 %	35,600	34,680	5 030,000	28
17	31/07/2018	R5	0,200 %	35,800	33,310	4 831,000	28

Fuente: elaboración propia.

- Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento con una dosificación de 0,05 % de MWNTC´s-OX.

Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Peso (g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Psi	Edad
31/07/2018	R1	0,200 %	37,700	19,680	2 854,000	3
31/07/2018	R2	0,200 %	36,000	20,040	2 907,000	3
31/07/2018	R3	0,200 %	36,600	19,420	2 817,000	3
31/07/2018	R4	0,200 %	36,300	20,520	2 976,000	3
31/07/2018	R5	0,200 %	37,100	20,340	2 950,000	3
31/07/2018	R6	0,200 %	37,500	20,010	2 902,000	3
31/07/2018	R1	0,200 %	37,000	25,460	3 693,000	7
31/07/2018	R2	0,200 %	37,800	24,360	3 533,000	7
31/07/2018	R3	0,200 %	36,400	23,870	3 462,000	7
31/07/2018	R4	0,200 %	36,400	25,420	3 687,000	7
31/07/2018	R5	0,200 %	36,300	25,540	3 704,000	7
31/07/2018	R6	0,200 %	35,400	22,720	3 295,000	7
31/07/2018	R1	0,200 %	36,000	31,900	4 627,000	28
31/07/2018	R2	0,200 %	37,400	30,710	4 454,000	28
31/07/2018	R3	0,200 %	37,200	35,770	5 188,000	28
31/07/2018	R4	0,200 %	36,600	34,260	4 969,000	28
31/07/2018	R5	0,200 %	36,700	33,520	4 862,000	28

Fuente: elaboración propia.

- Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento (muestra control).

Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Peso (g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Psi	Edad
17/07/2018	R1	0,000 %	36,400	16,060	2 330,000	3
17/07/2018	R2	0,000 %	35,800	16,550	2 400,000	3
17/07/2018	R3	0,000 %	36,900	17,690	2 566,000	3
17/07/2018	R4	0,000 %	35,800	17,100	2 480,000	3
17/07/2018	R5	0,000 %	36,000	16,850	2 444,000	3
17/07/2018	R1	0,000 %	36,700	20,910	3 033,000	7
17/07/2018	R2	0,000 %	36,600	21,970	3 187,000	7
17/07/2018	R3	0,000 %	36,300	22,440	3 255,000	7
17/07/2018	R4	0,000 %	36,100	22,440	3 255,000	7
17/07/2018	R5	0,000 %	35,700	22,280	3 231,000	7
17/07/2018	R1	0,000 %	36,500	28,850	4 184,000	28
17/07/2018	R2	0,000 %	36,400	27,990	4 060,000	28
17/07/2018	R3	0,000 %	36,400	28,230	4 094,000	28
17/07/2018	R4	0,000 %	36,400	31,660	4 591,000	28
17/07/2018	R5	0,000 %	37,700	30,400	4 409,000	28
17/07/2018	R6	0,000 %	37,500	32,640	4 734,000	28

Fuente: elaboración propia.

- Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento (muestra de blanco).

Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Peso (g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Psi	Edad
17/07/2018	R1	0,200 %	36,000	22,350	3 241,000	3
17/07/2018	R2	0,200 %	36,400	21,660	3 142,000	3
17/07/2018	R3	0,200 %	36,600	21,570	3 129,000	3
17/07/2018	R4	0,200 %	36,400	21,730	3 152,000	3
17/07/2018	R5	0,200 %	36,300	22,420	3 251,000	3
17/07/2018	R1	0,200 %	35,200	25,140	3 646,000	7
17/07/2018	R2	0,200 %	35,600	24,740	3 588,000	7
17/07/2018	R3	0,200 %	36,500	26,100	3 785,000	7
17/07/2018	R4	0,200 %	35,500	24,850	3 604,000	7
17/07/2018	R5	0,200 %	35,500	25,830	3 746,000	7
17/07/2018	R1	0,200 %	36,300	34,560	5 012,000	28
17/07/2018	R2	0,200 %	36,600	36,270	5 260,000	28
17/07/2018	R3	0,200 %	35,500	32,900	4 771,000	28
17/07/2018	R4	0,200 %	36,300	37,160	5 390,000	28

Fuente: elaboración propia.

- Medición de resistencia a la compresión mecánica en cemento para comparación de resultados con MWNTC´s-prístinos.

Fecha	Repetición	Dosis Glennium	Dosis CNTs	Peso(g)	Resistencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia Psi	Edad
17/07/2018	R1	0,200 %	0,010 %	35,800	21,260	3 084,000	3
17/07/2018	R2	0,200 %	0,010 %	35,700	20,800	3 017,000	3
17/07/2018	R3	0,200 %	0,010 %	35,900	21,690	3 146,000	3
17/07/2018	R4	0,200 %	0,010 %	35,900	20,790	3 016,000	3
17/07/2018	R5	0,200 %	0,010 %	36,100	21,930	3 180,000	3
17/07/2018	R6	0,200 %	0,010 %	36,300	21,700	3 148,000	3
17/07/2018	R1	0,200 %	0,010 %	35,900	26,140	3 791,000	7
17/07/2018	R2	0,200 %	0,010 %	36,800	27,200	3 945,000	7
17/07/2018	R3	0,200 %	0,010 %	37,200	26,270	3 810,000	7
17/07/2018	R4	0,200 %	0,010 %	37,900	26,800	3 886,000	7
17/07/2018	R5	0,200 %	0,010 %	37,700	27,430	3 978,000	7
17/07/2018	R6	0,200 %	0,010 %	37,200	26,150	3 793,000	7
17/07/2018	R1	0,200 %	0,010 %	36,100	34,280	4 971,000	28
17/07/2018	R2	0,200 %	0,010 %	36,200	36,330	5 269,000	28
17/07/2018	R3	0,200 %	0,010 %	36,000	34,630	5 022,000	28
17/07/2018	R4	0,200 %	0,010 %	37,800	37,780	5 479,000	28
17/07/2018	R5	0,200 %	0,010 %	37,100	36,680	5 319,000	28
24/07/2018	R1	0,200 %	0,030 %	36,500	20,240	2 936,000	3
24/07/2018	R2	0,2000 %	0,030 %	36,300	20,660	2 996,000	3
24/07/2018	R3	0,200 %	0,030 %	36,700	18,040	2 616,000	3
24/07/2018	R4	0,200 %	0,030 %	37,600	20,550	2 981,000	3
24/07/2018	R5	0,200 %	0,030 %	37,800	20,970	3 041,000	3
24/07/2018	R6	0,200 %	0,030 %	38,000	20,930	3 036,000	3
24/07/2018	R1	0,200 %	0,030 %	38,000	25,270	3 665,000	7
24/07/2018	R2	0,200 %	0,030 %	38,400	26,410	3 830,000	7
24/07/2018	R3	0,200 %	0,030 %	37,600	25,680	3 725,000	7
24/07/2018	R4	0,200 %	0,030 %	37,300	24,780	3 594,000	7
24/07/2018	R5	0,200 %	0,030 %	35,800	24,140	3 501,000	7
24/07/2018	R6	0,200 %	0,030 %	36,700	21,080	3 057,000	7
24/07/2018	R1	0,200 %	0,030 %	37,200	33,760	4 896,000	28
24/07/2018	R2	0,200 %	0,030 %	36,700	32,260	4 679,000	28
24/07/2018	R3	0,200 %	0,030 %	36,800	34,160	4 954,000	28
24/07/2018	R4	0,200 %	0,030 %	37,300	35,690	5 176,000	28
24/07/2018	R5	0,200 %	0,030 %	36,900	34,200	4 960,000	28
24/07/2018	R6	0,200 %	0,030 %	37,000	37,150	5 388,000	28
24/07/2018	R1	0,200 %	0,050 %	35,600	19,650	2 850,000	3
24/07/2018	R2	0,200 %	0,050 %	35,400	19,220	2 788,000	3
24/07/2018	R3	0,200 %	0,050 %	36,000	19,360	2 808,000	3
24/07/2018	R4	0,200 %	0,050 %	36,300	20,110	2 917,000	3
24/07/2018	R5	0,200 %	0,050 %	36,800	19,620	2 846,000	3
24/07/2018	R1	0,200 %	0,050 %	36,300	23,370	3 390,000	7
24/07/2018	R2	0,200 %	0,050 %	36,400	23,440	3 400,000	7
24/07/2018	R3	0,200 %	0,050 %	37,400	24,850	3 604,000	7
24/07/2018	R4	0,200 %	0,050 %	35,900	22,050	3 198,000	7
24/07/2018	R5	0,200 %	0,050 %	37,200	23,700	3 437,000	7
24/07/2018	R1	0,200 %	0,050 %	36,000	32,060	4 650,000	28
24/07/2018	R2	0,200 %	0,050 %	37,500	33,510	4 860,000	28
24/07/2018	R3	0,200 %	0,050 %	35,700	30,950	4 489,000	28
24/07/2018	R4	0,200 %	0,050 %	37,100	32,400	4 699,000	28
24/07/2018	R5	0,200 %	0,050 %	37,000	33,580	4 870,000	28

Fuente: elaboración propia.

- Promedio, media aritmética, desviación estándar y criterio

M	Ctrl	0,000	0,000	16,850	2444,000	3	3,390	3,430	2 686,500
Des_est	Ctrl	0,000	0,000	0,610	88,190	3	0,020	3,350	2 221,080
M	Ctrl	0,000	0,000	22,010	3192,200	7	3,500	3,540	3 451,100
Des_est	Ctrl	0,000	0,000	0,640	93,230	7	0,010	3,470	2 950,660
M	Ctrl	0,000	0,000	29,960	4345,330	28	3,640	3,710	5 129,220
Des_est	Ctrl	0,000	0,000	1,920	277,880	28	0,030	3,560	3 668,840
M	Blnk	0,200	0,000	21,950	3183,000	3	3,500	3,520	3 339,440
Des_est	Blnk	0,200	0,000	0,410	58,190	3	0,010	3,480	3 033,080
M	Blnk	0,200	0,000	25,330	3673,800	7	3,570	3,590	3 882,200
Des_est	Blnk	0,200	0,000	0,600	87,440	7	0,010	3,540	3 475,020
M	Blnk	0,200	0,000	35,220	5108,250	28	3,710	3,760	5 788,970
Des_est	Blnk	0,200	0,000	1,890	274,110	28	0,020	3,650	4 497,760
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,010	21,360	3098,500	3	3,490	3,510	3 267,820
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,010	0,490	70,720	3	0,010	3,470	2 936,680
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,010	26,670	3867,170	7	3,590	3,610	4 061,060
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,010	0,560	81,570	7	0,010	3,570	3 681,170
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,010	35,940	5212,000	28	3,720	3,750	5 681,870
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,010	1,460	212,230	28	0,020	3,680	4 774,640
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,030	20,230	2934,350	3	3,470	3,520	3 309,660
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,030	1,110	160,480	3	0,020	3,410	2 594,760
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,030	24,560	3562,130	7	3,550	3,630	4 238,290
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,030	1,870	271,470	7	0,030	3,470	2 978,500
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,030	34,540	5009,120	28	3,700	3,740	5 558,630
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,030	1,690	244,430	28	0,020	3,650	4 505,050
M	MWNTC´s-prístinos	0,200	0,050	19,590	2841,610	3	3,450	3,470	2 948,240
Des_est	MWNTC´s-0prístinos	0,20	0,050	0,340	49,410	3	0,010	3,440	2 738,170
M	MWNTC´s-prístinos	0,20	0,050	23,480	3405,780	7	3,530	3,570	3 727,550
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,20	0,050	1,000	144,750	7	0,020	3,490	3 107,270
M	MWNTC´s-prístinos	0,20	0,050	32,500	4713,810	28	3,670	3,700	5 069,720
Des_est	MWNTC´s-prístinos	0,20	0,050	1,090	158,600	28	0,010	3,640	4 378,900
M	MWNTC´s-OX	0,20	0,010	20,470	2968,680	3	3,470	3,490	3 100,080
Des_est	MWNTC´s-OX	0,20	0,010	0,380	55,640	3	0,010	3,450	2 842,020
M	MWNTC´s-OX	0,20	0,010	23,840	3457,700	7	3,540	3,600	4 016,170
Des_est	MWNTC´s-OX	0,20	0,010	1,610	233,190	7	0,030	3,470	2 964,800
M	MWNTC´s-OX	0,20	0,010	32,960	4779,720	28	3,680	3,690	4 939,680
Des_est	MWNTC´s-OX	0,20	0,010	0,490	70,950	28	0,010	3,670	4 624,080
M	MWNTC´s-OX	0,20	0,030	20,170	2925,170	3	3,470	3,500	3 171,250
Des_est	MWNTC´s-OX	0,200	0,030	0,780	112,990	3	0,020	3,430	2 694,880
M	MWNTC´s-OX	0,200	0,030	24,180	3506,530	7	3,540	3,570	3 721,100
Des_est	MWNTC´s-OX	0,200	0,030	0,670	97,280	7	0,010	3,520	3 302,220
M	MWNTC´s-OX	0,200	0,030	33,210	4816,700	28	3,680	3,710	5 129,530
Des_est	MWNTC´s-OX	0,200	0,030	0,980	141,650	28	0,010	3,660	4 519,850
M	MWNTC´s-OX	0,200	0,050	20,000	2901,000	3	3,460	3,480	3 029,320
Des_est	MWNTC´s-OX	0,200	0,050	0,410	58,970	3	0,010	3,440	2 777,150
M	MWNTC´s-OX	0,200	0,050	24,560	3562,370	7	3,550	3,600	3 947,500
Des_est	MWNTC´s-OX	0,200	0,050	1,130	164,240	7	0,020	3,510	3 209,000
M	MWNTC´s-OX	0,200	0,050	33,230	4819,890	28	3,680	3,740	5 505,390
Des_est	MWNTC´s-OX	0,200	0,050	1,980	287,490	28	0,030	3,620	4 207,710

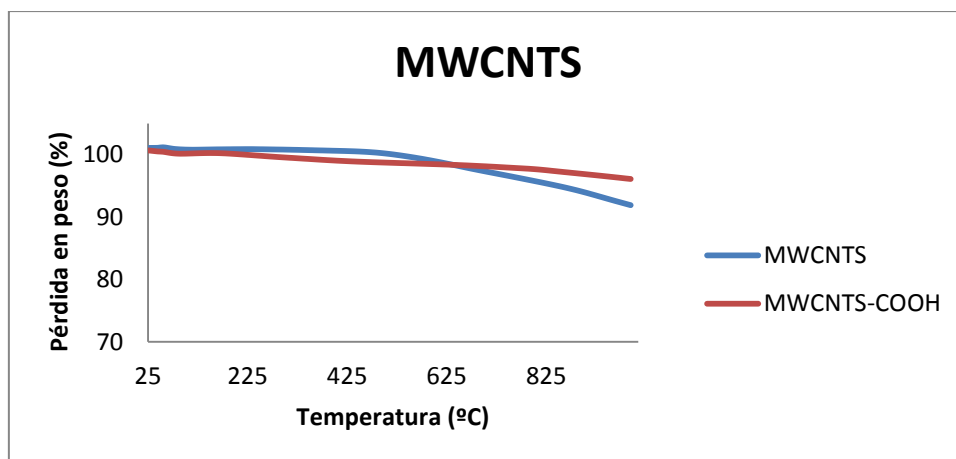
Fuente: elaboración propia.

- Criterio de Fisher.

Prístino-Oxidados	Dosis_CNTs	edad	Varianza	F exp	F crit	Fexp<Fcrit
Prístino	0,010	3	5 001,500	0,677	2,540	VERDADERO
Prístino	0,010	7	6 653,367	1,149	2,390	VERDADERO
Prístino	0,010	28	45 042,000	1,668	2,540	VERDADERO
Prístino	0,030	3	32 190,240	0,105	2,540	VERDADERO
Prístino	0,030	7	73 693,930	0,104	2,460	VERDADERO
Prístino	0,030	28	59 747,660	1,258	2,230	VERDADERO
Prístino	0,050	3	2 441,309	1,387	3,150	VERDADERO
Prístino	0,050	7	20 951,160	0,365	2,120	VERDADERO
Prístino	0,050	28	25 155,330	2,987	2,460	FALSO
Oxidados	0,010	3	3 095,999	1,094	2,540	VERDADERO
Oxidados	0,010	7	54 377,050	0,141	2,390	VERDADERO
Oxidados	0,010	28	5 626,061	13,355	2,540	FALSO
Oxidados	0,030	3	12 766,640	0,265	2,540	VERDADERO
Oxidados	0,030	7	9 464,207	0,808	2,460	VERDADERO
Oxidados	0,030	28	20 065,130	3,745	2,230	FALSO
Oxidados	0,050	3	3 477,170	0,974	3,150	VERDADERO
Oxidados	0,050	7	26 975,150	0,283	2,120	VERDADERO
Oxidados	0,050	28	109 472,400	0,686	2,460	VERDADERO

Fuente: elaboración propia.

- Comparación de resultados del análisis termogravimétrico TGA de MWNTC's-OX y MWNTC's.



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Muestra de cálculo

- Ecuación 1: análisis del TGA

Relación del porcentaje de pérdida de masa y el peso molecular de los grupos funcionales

$$\begin{aligned} & \# \text{átomos de nanotubo de carbono} \\ &= \frac{\frac{\%MWNTC}{12}}{\frac{\text{Pérdida del nanotubo funcionalizado} - \text{pérdida del nanotubo sin funcionalizar}}{\text{Peso molecular del grupo formado}}} \end{aligned}$$

Ejemplo:

Tomar la temperatura del 605 °C en la figura 15, determinar el % de pérdida de peso de cada muestra.

$$\% \text{ MWNTC's} = 98,4658 \% - 100 \% = 1,105 \%$$

$$\% \text{ MWNTC's-OX} = 98,895 \% - 100 \% = 1,534 \%$$

Peso molecular del grupo funcional formado OH = 17,00734

$$\begin{aligned} \# \text{átomos de nanotubo de carbono} &= \frac{\frac{98,895}{12}}{\frac{1,5342 - 1,105}{17,0073}} \\ &= 326,564 \text{ átomos de/por cada molecula de OH} \end{aligned}$$

Ecuación 2: porcentaje de resistencia mecánica:

$$\%R = \frac{\text{psi más bajo} * 100}{\text{psi más alto}} = \%$$

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Realización de la toma de resultados

- Dispersión de los MWNTC´s-OX o MWNTC´s-prístinos en agua destilada y glemium.



Fuente: elaboración propia.

- Elaboración de la mezcla de cemento, para la preparación de los morteros de cemento con aditivos de las muestras mencionadas.



Fuente: elaboración propia.

- Elaboración de los cubos de 1X1", para la preparación de morteros



Fuente: elaboración propia.

Cuarto húmedo, donde se quedan los moldes por 24 horas



Fuente: elaboración propia.



- Desencofran los moldes, para llevarlos al cuarto de curado conforme la edad de días a los que se analizarán.



Fuente: elaboración propia.

- Cuarto de curado de 3 días, 7 días y 28 días, en donde se preparan los morteros para ser analizados cuando cumplan las edades.



Fuente: elaboración propia.

- Ruptura de cubos para la medición de resistencias



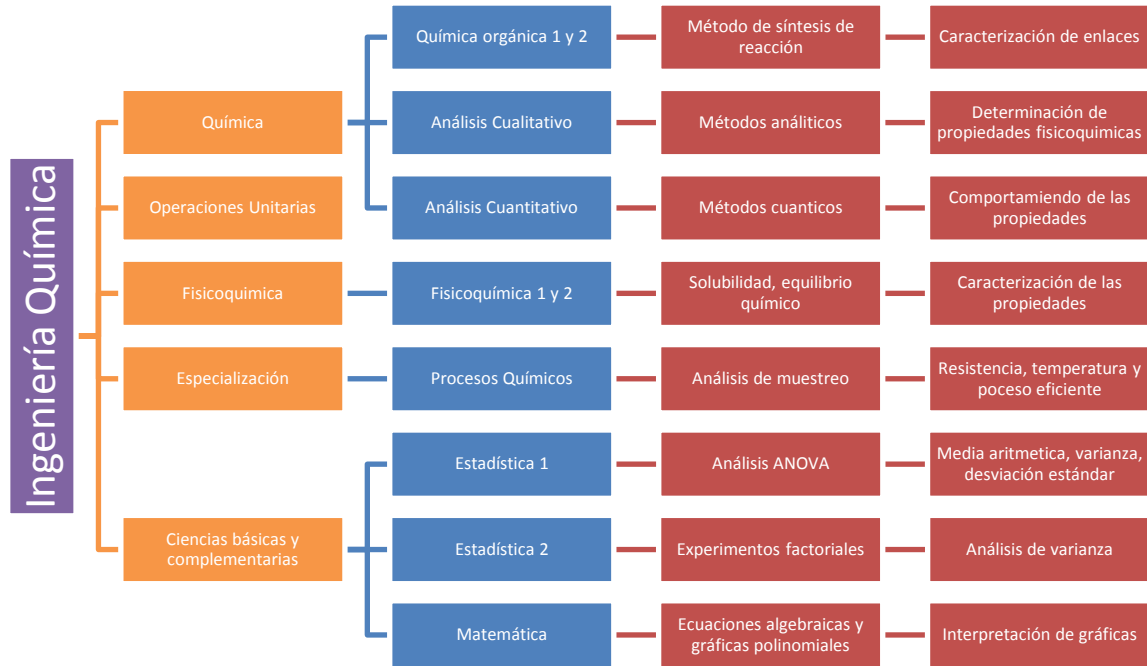
Fuente: elaboración propia.

- Equipo que mide la resistencia mecánica del cemento



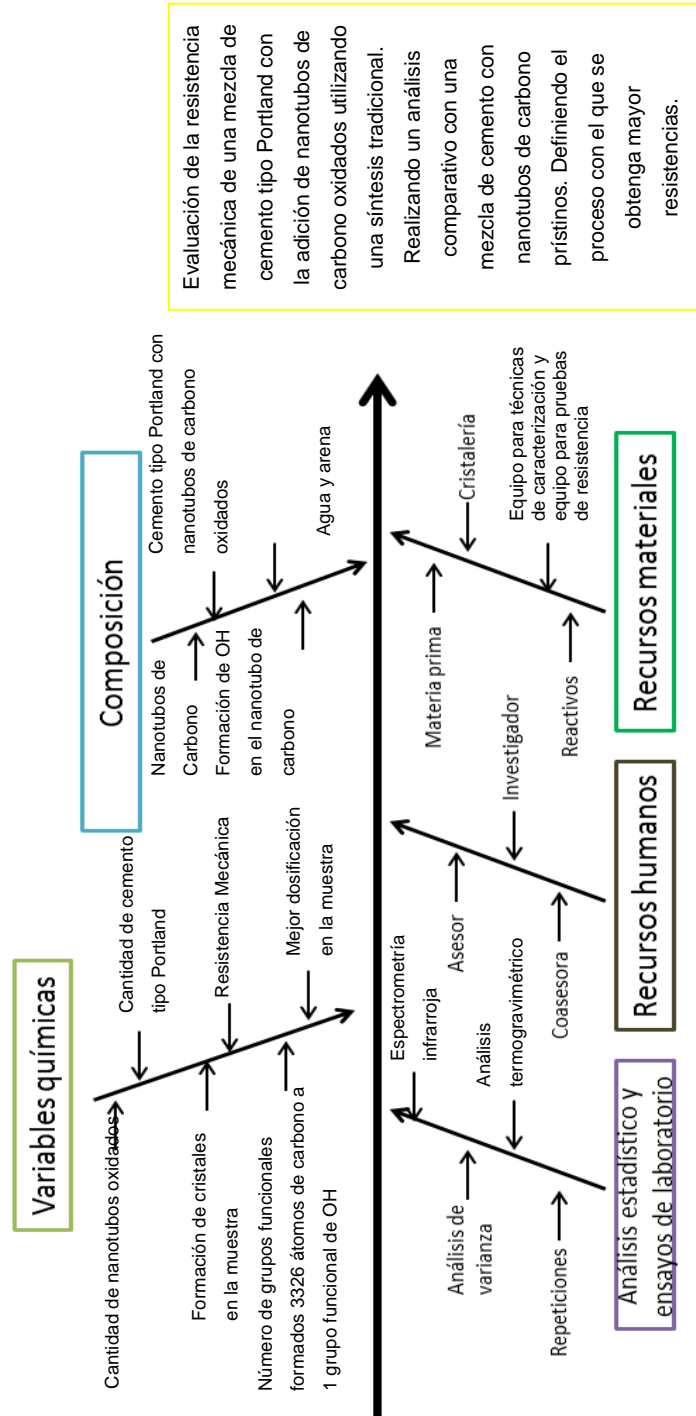
Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 4. Diagrama de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 6. Presupuesto

- Presupuesto generado para realizar investigación de tesis.

Descripción	Precio unitario (Q)	Unidades utilizadas	Subtotal (Q)
<b>Reactivos</b>			
Nanotubo de carbono multicapa	1 058,910	1	1 058,910
Arena	544,000	1	544,000
Cemento tipo Portland (UGC)	78,100	1	78,100
Agua desmineralizada	15,020	1	15,020
Aceite Mineral	64,000	1	64,000
<b>Instrumentos de medición</b>			
Balanza analítica	1 126,500	1	1 126,500
Cronómetro	50,000	1	50,000
Equipo de espectroscopía infrarrojo (hora)	383,010	1	383,010
Metro	55,000	1	55,000
Probeta 100mL	549,720	2	1 081,440
Beacker 250mL	229,060	6	1 374,330
Beacker de 100 mL	540,720	2	1 081,440
pipetas serológica 5mL	822,345	2	1 644,690
<b>Equipo</b>			
Vidrios de reloj	316,930	1	316,930
Mortero y pistilo	1 430,660	1	1 430,660
Cápsulas de porcelana 15 mL	681,160	1	681,160
Plancha de agitación magnética	4 964,110	1	4 964,110
Espátula	15,020	2	30,040
Soporte universal	122,760	2	245,520
Campana de extracción	8 223,450	1	8 223,450
Moldes cúbicos	90,120	15	1 351,800
Varrilla compactadora	19,824	2	39,645
Martillo	3 12,500	1	312,500
Cuchara	17,200	1	17,200
Pala	60,720	1	60,720
<b>Total</b>			<b>Q26 230,125</b>

Fuente: elaboración propia.