

Inclusión de Nanotubos de Carbono en Pastas de Cemento Portland: Propiedades  
Piezoeléctricas y Mecánicas

Yéssica Ospino Mercado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Directores

Ana María Pérez Ceballos

Ph. D. Ingeniería Metalúrgica

Jorge Hernán Quintero

Ph. D. Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

### **Agradecimientos**

Inicialmente expreso mi profundo agradecimiento a Dios, quien me brindó la fortaleza necesaria para persistir en este camino. Su guía ha sido fundamental en cada paso que he dado.

A mis directores, Jorge Hernán Quintero y Ana María Pérez Ceballos, les agradezco sinceramente por confiar en mí y depositar su confianza en este proyecto. Profesora Ana, sus palabras y consejos fueron un faro en momentos difíciles. Admiro profundamente la calidad profesional que ambos demuestran constantemente.

La Universidad Industrial de Santander merece mi reconocimiento especial, ya que su entorno fue el crisol donde pude adquirir y fortalecer numerosas habilidades. Gracias por ser mi hogar.

Y gracias a todas las personas excepcionales que confiaron en mí. Su confianza y ejemplos fueron pilares fundamentales en este arduo camino. A pesar de tantas dificultades sus palabras siempre estuvieron prestas y me sirvieron de impulso para continuar.

Gracias a todos por su apoyo incondicional.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	11
1.Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos .....	14
2. Pastas de cemento Portland .....	15
2.1 Porosidad del cemento .....	16
2.2 Estructuras de nanotubos de carbono .....	20
2.2.1 Estructura de nanotubos de pared simple .....	22
2.2.2 Estructura de MWCNT .....	23
2.3 Propiedades mecánicas de los CNT .....	25
2.3.1 Módulo elástico o módulo de Young.....	26
3. Propiedades mecánicas de las pastas de cemento Portland con la inclusion de nanotubos de carbono. ....	28
4. Propiedades piezoeléctricas de las pastas de cemento Portland con la inclusión de CNTs .....	31
5. Limitaciones en la adición de CNT a pastas de cemento Portland: .....	34
5.1 Relación agua/cemento .....	35
5.2 Dispersión los CNT.....	36
Análisis y conclusiones .....	38
Referencias .....	39

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> Composición química del cemento Portland .....	16
<b>Tabla 2</b> Métodos experimentales usados para caracterización de estructuras porosas.....	19
<b>Tabla 3</b> Área específica de poro ( $m^2/g$ ) en varias muestras mediadas con diferentes métodos..	20
<b>Tabla 4</b> Propiedades de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs).....	25
<b>Tabla 5</b> Estudios previos sobre módulo de Young en nanotubos de carbono.....	26
<b>Tabla 6</b> Propiedades químicas y físicas del cemento.....	29
<b>Tabla 7</b> Estudios previos sobre influencia de la inclusión de CNT en pastas de cemento Portland .....	30

**Listas de figuras**

<b>Figura 1</b> Procedimiento para el método de microscopía electrónica de barrido/ haz de iones focalizados (FIB/SEM) .....	18
<b>Figura 2</b> Método para obtener imágenes XCT. ....	18
<b>Figura 3</b> Porosidad medida en diferentes rangos de tamaño de poro.....	20
<b>Figura 4</b> Estructura molecular de una sección de (10, 10) CNT .....	21
<b>Figura 5</b> Estructura de enlace hexagonal básica para una capa de grafito (hoja de grafeno).....	21
<b>Figura 6</b> Esquema de una hoja de grafeno y definiciones de parámetros geométricos para describir un CNT. ....	22
<b>Figura 7</b> Definición del vector quiral (Ch) en una lámina de grafeno de SWCNTs. ....	23
<b>Figura 8</b> Imagen TEM de los MWCNTs observados por Iijima .....	24
<b>Figura 9</b> curvas de tensión versus deformación obtenidas de los experimentos de carga de tracción en haces SWCNT individuales.....	28
<b>Figura 10</b> Plot of stress versus strain curves for 5 individual MWCNTs.....	28
<b>Figura 11</b> Comportamiento mecánico de pastas de cemento simple y pasta de cemento reforzada con 0.08% de MWCNTs en peso (W/C=0.3) 28 días de curado.....	29
<b>Figura 12</b> Imagen SEM del nanocompuesto Pasta de cemento/Nanotubos de carbono con 1% en peso de nanotubos de carbono.....	32
<b>Figura 13</b> Esquema y dimensiones en mm de muestras y disposición de electrodos para las muestras de pastas de cemento Portland con inclusión de MWCNTs .....	32
<b>Figura 14</b> Resistencia eléctrica del nanocompuesto a base de cemento con respecto a diferentes porcentajes en peso de nanotubos de carbono.....	34

**Figura 15** Efecto de la relación agua-cemento sobre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento. ....35

**Figura 16** Imágenes ESEM de pasta de cemento MWCNT.....37

## Glosario

**BSEI:** por sus siglas en inglés *backscattered electron imaging*

**CFD:** por sus siglas en inglés *computational fluid dynamics*

**CNT:** por sus siglas en inglés *Carbon nanotubes*

**CPSD:** por sus siglas en inglés *continuous pore size distribution*

**DPSD:** por sus siglas en inglés *discrete pore size distribution*

**FIB/SEM:** por sus siglas en inglés *focused ion beam/scanning electron microscopy*

**Impedancia:** “z” Cantidad de ohms que mide la oposición a la corriente de un circuito o componente

**K-T model:** por sus siglas en inglés *Katz-Thompson model*

**LBM:** por sus siglas en inglés *lattice Boltzmann method*

**LSCM:** por sus siglas en inglés *laser scanning confocal microscopy*

**MIP:** por sus siglas en inglés *mercury intrusion porosimetry*

**NAD:** por sus siglas en inglés *nitrogen adsorption*

**NMR:** por sus siglas en inglés *nuclear magnetic resonance*

**Piezoelectricidad:** propiedades que tienen ciertos cristales de polarizarse eléctricamente cuando son sometidos a presión y a la inversa.

**Piezoresistividad:** propiedad de cambiar la resistencia eléctrica cuando se somete a un esfuerzo mecánico

**PNM:** por sus siglas en inglés *pore network model*

**PSD:** por sus siglas en inglés *pore size distribution*

**REV:** por sus siglas en inglés *representative element volume*

**SMIP:** por sus siglas en inglés *simulated mercury intrusion porosimetry*

**SSA:** por sus siglas en inglés *specific surface area*

**Tortuosidad:** medida de complejidad geométrica de un medio poroso, se relaciona con la resistividad eléctrica de un fluido en un medio poroso

**TPM:** por sus siglas en inglés *thermoporometry*

**VS:** por sus siglas en inglés *vacuum saturation*

**WVSI:** por sus siglas en inglés *water vapor sorption isotherms*

**XCT:** por sus siglas en inglés *X-ray computed tomography*

## Resumen

**Título:** Inclusión de nanotubos de carbono en pastas de cemento Portland: propiedades piezoeléctricas y mecánicas\*

**Autor:** Yéssica Ospino Mercado\*\*

**Palabras Clave:** Nanotubos de carbono, propiedades piezoeléctricas, propiedades mecánicas, pastas de cemento.

**Descripción:** Las aplicaciones de la nanotecnología se encuentran en constante crecimiento respondiendo a las necesidades de la sociedad, en su mayoría de carácter ambiental y relacionadas directamente con la expansión de la misma, de esta forma una de las industrias con altos requerimientos energéticos y con gran impacto ambiental es la industria de la construcción, en donde se ha evidenciado que gracias a nanomateriales como la nano-sílice se ha reducido en gran medida el consumo de agua para la fabricación de concretos y la duración de fraguado (Senff, Labrincha, Ferreira, Hotza, & Repette, 2009). Los CNTs por su parte son nanoestructuras tubulares cuyos subtipos dependen del grado de láminas enrolladas teniendo SWCNTs y MWCNTs, se ha evidenciado que estos han conferido propiedades eléctricas al cemento, convirtiéndolo en un material con características piezoeléctricas altamente aprovechables, abriendo las posibilidades de reducir el consumo energético, y construir espacios autosostenibles, este trabajo tiene por objeto evidenciar teóricamente los estudios relevantes sobre el comportamiento piezoeléctrico y mecánico de las pastas de cemento Portland con la inclusión de nanotubos de carbono, cabe mencionar que una de las características principales del cemento son las propiedades mecánicas de los mismos y que estas se pueden modificar según los agregados, composición química, porosidad, entre otras, así en la búsqueda de optimizar la funcionalidad de las pastas de cemento se debe pensar conjuntamente con estas características mecánicas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Programa académico. Directores: Jorge Hernán Quintero PhD Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales y Ana María Pérez Ceballos PhD Ingeniería Metalúrgica

### Abstract

**Title:** Inclusion of carbon nanotubes in Portland cement pastes: piezoelectric and mechanical properties<sup>§§</sup>

**Author(s):** Yessica Ospino Mercado<sup>††</sup>

**Key Words:** Carbon nanotubes, piezoelectric properties, mechanical properties, cement pastes

**Description:** The applications of nanotechnology are constantly growing, responding to the needs of society, mostly of an environmental nature and directly related to their expansion, thus one of the industries with high energy requirements and great environmental impact, is the construction industry, where it has been shown that thanks to nanomaterials such as nano-silica, water consumption for the manufacture of concrete and the setting duration have been greatly reduced (Senff, 2009). CNTs, for their part, are tubular nanostructures whose subtypes depend on the degree of rolled sheets having SWCNTs and MWCNTs. It has been shown that these have conferred electrical properties to the cement, turning it into a material with highly usable piezoelectric characteristics, opening up the possibilities of reducing consumption. energy, and build self-sustainable spaces, this work aims to theoretically demonstrate the relevant studies on the piezoelectric and mechanical behavior of Portland cement pastes with the inclusion of carbon nanotubes, it is worth mentioning that one of the main characteristics of the cement are the properties their mechanics and that these can be modified depending on the aggregates, chemical composition, porosity, among others, thus in the search to optimize the functionality of cement pastes one must think together with these mechanical characteristics.

---

<sup>§§</sup>Degree Work

<sup>††</sup>Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering. Advisors: Jorge Hernán Quintero, PhD and Ana María Pérez Ceballos, PhD

## Introducción

Actualmente es imprescindible la búsqueda de formas que permitan optimizar el funcionamiento de los materiales y fomentar la investigación conjuntamente al sostenimiento ambiental, de tal forma que se masifique la importancia de la autosostenibilidad. En la industria de la construcción a lo largo del desarrollo de la humanidad se han ido mejorando continuamente los procesos necesarios para la consolidación de las regiones, planteando salvaguardas ambientales, inherentes ante la actual crisis, además de algunas amenazas ambientales. La continuidad en el desarrollo de formas que permitan crear materiales cada vez más funcionales y eficientes, puede garantizar en gran medida un desarrollo consonante con la sostenibilidad ambiental. El uso del cemento es indispensable cuando se habla de construcción, desarrollo y expansión humana, éste es, esencialmente, un material poroso compuesto de hidróxido de calcio (Portlandita), aluminatos y Clinker incrustado en un producto de hidratación amorfo nanoestructurado, el llamado gel C-S-H (hidrato de silicato de calcio) (Naseri & Irani, 2016). Hoy en día la investigación de nuevos materiales para mejorar u optimizar la funcionalidad de estos, está generalmente focalizada en la inclusión de nanoestructuras, cuyo uso y aplicación han ganado un gran auge en industrias como la agrícola, biomédica, aeroespacial, eléctrica, entre otras, etc. (Rodríguez, et al., 2019). En el campo de la construcción, recientemente, se ha observado que algunas nanoestructuras como la nano-sílice ha mejorado significativamente la reducción del uso de agua para la fabricación de concretos y la duración de fraguado (Senff, Labrincha, Ferreira, Hotza, & Repette, 2009). Adicionalmente, se ha evidenciado que gracias a las nanoestructuras se obtienen gran variedad de propiedades importantes que añaden nuevas funcionalidades a los materiales cementosos, muchas de estas con el objetivo de mitigar el impacto al medio ambiente, sea el caso particular del diseño de una pasta de cemento con propiedades piezoresistivas, las cuales han sido estudiadas añadiendo

algunas nanopartículas metálicas para mejorar las propiedades eléctricas de la pasta de cemento (Azhari & Banthia, 2012). Partiendo de este hecho, los materiales con propiedades piezoeléctricas motivan a los científicos e ingenieros a desarrollar estructuras de concreto autosostenibles con una demanda de energía de baja vida. Este tipo de material presenta la capacidad de convertir la energía generada por tensión mecánica en potencial eléctrico. Este comportamiento físico ofrece materiales con un alto potencial de uso en el campo de la ingeniería de la construcción, lo que contribuiría a consolidar edificios inteligentes con mayor eficiencia en el uso de energía renovable y mayor sustentabilidad (Chen, Qiu, Han, & Lau, 2019). Las investigaciones antes mencionadas muestran que la corriente eléctrica se puede producir en cemento hasta cierto punto, una vez que se aplica una fuerza de compresión la corriente eléctrica disminuye gradualmente. Todos estos fenómenos pueden ser explicados por la redistribución del agua en el sistema cementicio, que aumenta o disminuye el movimiento de carga, sin embargo, no es lo suficientemente resistente porque la pasta de cemento no es un material cristalino (Sun, Liu, Li, & Hu, 2000). Debido a esta limitación, se han realizado numerosas investigaciones en la última década para mejorar las propiedades piezoeléctricas del material de cemento a través de adiciones de nanocompositos, estudiando de igual forma la influencia de estos en las propiedades mecánicas del cemento. Sin embargo, esta idea ha sido poco explotada sobre todo a nivel nacional, debido a la poca cantidad de investigaciones en el campo y la falta de material académico que permita darle sustento y bases para ampliar y expandir su uso de forma significativa, lo cual representa un paso más allá para aumentar el nivel de desarrollo industrial, investigativo, científico y tecnológico.

Para enfrentar estos desafíos, se hace relevante realizar investigaciones enfocadas en esta área, para contribuir con aportes teórico-prácticos al avance y al desarrollo científico y tecnológico en disciplinas poco exploradas, siendo la mencionada nanotecnología una de las más prometedoras pero subutilizadas.

Estas y otros aportes sustanciales son los que se pretenden abordar a través del desarrollo del presente trabajo, tratando de optimizar las propiedades del cemento Portland, que es uno de los más importantes y usados en el sector de la construcción, por su adaptabilidad a diferentes aplicaciones, ya que es posible emplearlo para la fabricación de hormigón para puentes y estructuras, también para otros usos generales como pisos, mampostería, etc.

Con la contribución de esta monografía se espera desarrollar o tener un material a base de pasta de cemento con nanocompuestos específicamente con nanotubos de carbono, que ayude a mitigar la gran demanda energética que se necesita en el campo de la construcción e infraestructura.

## **1.Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Estudiar la influencia de las inclusiones de nanotubos de carbono en pastas de cemento Portland sobre propiedades piezoeléctricas y mecánicas.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas de las pastas de cemento Portland con la inclusión de nanotubos de carbono.

Evaluar el comportamiento de las propiedades piezoeléctricas de las pastas de cemento Portland con la inclusión de nanotubos de carbono.

Identificar limitaciones en la adición de nanotubos de carbono a las pastas de cemento Portland.

## 2. Pastas de cemento Portland

Uno de los principales materiales en términos de infraestructura es el cemento, el cual es un material inorgánico y mineral, clasificado como un conglomerante cuyas partes inorgánicas y minerales se encuentran finamente molidas (Chakraborty, Wan Jo, & Yoon, 2020) (Singh, Kalra, & Saxena, 2017). El cemento tiene la capacidad de dar cohesión a una mezcla de materiales, generando un nuevo producto del conjunto de estos, promovido por transformaciones químicas (NTC 31). En la actualidad, el cemento de mayor uso es el denominado Portland, del cual según la norma NTC 184 se pueden encontrar algunos subtipos. Este tipo de cemento generalmente está constituido por carbonato de calcio, piedra caliza, cal, cal hidratada, polvo de horno para cemento (CKD), ceniza volante clase F y C, puzolana natural calcinada o no calcinada, humo sílice, escoria granulada de alto horno, y algunas adiciones como sulfato de calcio, reductor de agua, entre otros (NTC 121), además, el cemento Portland se considera un material nanoestructurado, debido a que una vez está hidratado prevalece la presencia del llamado gel de tobermorita (C-S-H) que es una nanopartícula con diámetros alrededor de los 10 nm (Tobon, Restrepo, & Paya, 2007), la composición química del cemento puede variar por lo que se recomienda para efectos de estudio y de control de calidad la realización del análisis bajo la norma estandarizada NTC 184:2019. La pasta de cemento Portland es una mezcla que es por lo general frágil y de baja resistencia a la tracción, puede fraguar y endurecer expuesto al aire o bajo el agua, este endurecimiento se presenta debido a la formación de hidratos por reacción química con el agua (ASTM 219-20a).

Estos materiales cementosos son de gran atractivo debido a las particulares propiedades mecánicas que exhiben, cabe mencionar que existe cierta variedad en los tipos de cemento y para objeto particular de este estudio se considera el cemento Portland ordinario, de uso común o general, cuya composición aproximada se enuncia en la **Tabla 1**

**Tabla 1***Composición química del cemento Portland*

Composición	Cemento	Ceniza Volante	Escoria
CaO	62.89	6.69	39.81
SiO <sub>2</sub>	19.96	52.45	31.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.35	29.35	16.53
SO <sub>3</sub>	3.3	0.74	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	5.93	0.43
MgO	2.9	0.83	6.89
K <sub>2</sub> O	0.8	1.07	0.54
Na <sub>2</sub> O	0.48	0.89	0.33
TiO <sub>2</sub>	-	1.24	1.23
MnO	-	-	0.18
Óxido de calcio libre	1.3	0.8	-
Pérdida por ignición	1.3	4.41	4.41

*Nota:* Adaptado de (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022)

## 2.1 Porosidad del cemento

Uno de los aditivos de mayor importancia en el OPC es el hidrato de silicato de calcio (CSH), el cual cumple la función de promover la hidratación del cemento mediante sitios de nucleación, desarrollando consecuentemente la resistencia y durabilidad dado que ocupa cavidades propias de la superficie porosa desarrollada en estas matrices cementosas, actuando como relleno. Adicionalmente, este componente tiene un área superficial relativamente alta (Zhou, Meng, Pan, & Mi, 2022) por lo que aun deja cavidades o espacios vacíos, la porosidad presente en estas matrices es un aspecto fundamental en las propiedades mecánicas y durabilidad de las mismas, incluyendo resistencia a la compresión, fluencia, contracción y permeabilidad (Beaudoin, Feldman, & Tumidajski, 1994).

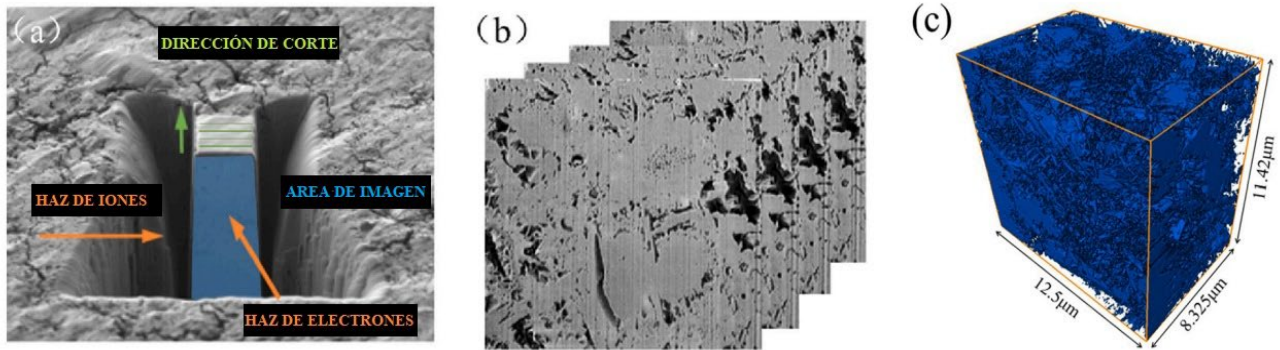
La caracterización de los poros representa un estudio complejo dado que se pueden encontrar diferentes tamaños, incluso desde escalas nanométricas, por lo que exige la aplicación

de diferentes métodos experimentales, los cuales se pueden clasificar en métodos directos e indirectos (Aligizaki, 2005) . En el caso de los métodos directos, las características como el tamaño forma y distribución espacial de los poros se representan mediante imágenes físicas de estos materiales porosos, dentro de los cuales se destaca la tomografía computarizada de rayos X o XCT por sus siglas en inglés, esta es una técnica no destructiva que proporciona información estructural de los materiales, sin embargo, estudios realizados por (Liu, Qian, Liu, Zhang, & Zhang, 2021) revelaron que aunque este método no posee la resolución para la detección a escala nanométrica de los poros, el empleo de un metal con bajo punto de fusión puede mejorar el contraste de la imagen.

En el caso de los métodos indirectos se emplean técnicas de aplicación de estímulos externos tales como la capacidad de adsorción, magnetismo nuclear, espectroscopia de resonancia y el más utilizado es la Porosimetría de intrusión de mercurio o MIP (por sus siglas en inglés) debido a su amplio rango de detección en cuanto a la variedad de tamaños según su escala (de nanométrica a decenas de micras) su mayor desventaja es la exigencia de preparación de la muestra como el secado y daños a la estructura de la matriz cementosa (Muller & Scrivener, 2017). Otros métodos que caben mencionar son la resonancia magnética nuclear (RMN) en aprovechamiento al agua contenida en la matriz de las pastas de cemento, la Termoporometría, técnicas de adsorción de gas (NAD Y WVSI) y la microscopía electrónica de barrido/ haz de iones enfocados (FIB/SEM) esta es una técnica destructiva la cual consiste en analizar cortes regularmente espaciados y el haz de electrones incide sobre la superficie de estos cortes (Song, Davy, Troadec, & Bourbon, 2019), su desventaja principal es que demanda mucho tiempo para la obtención de resultados y la porosidad total es menor que la medida por MIP. En la **Figura 1** y **Figura 2** se indica el procedimiento del análisis focalizado (FIB/SEM) y el montaje experimental para una muestra que se sometió a un curado por 90 días (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022) .

**Figura 1**

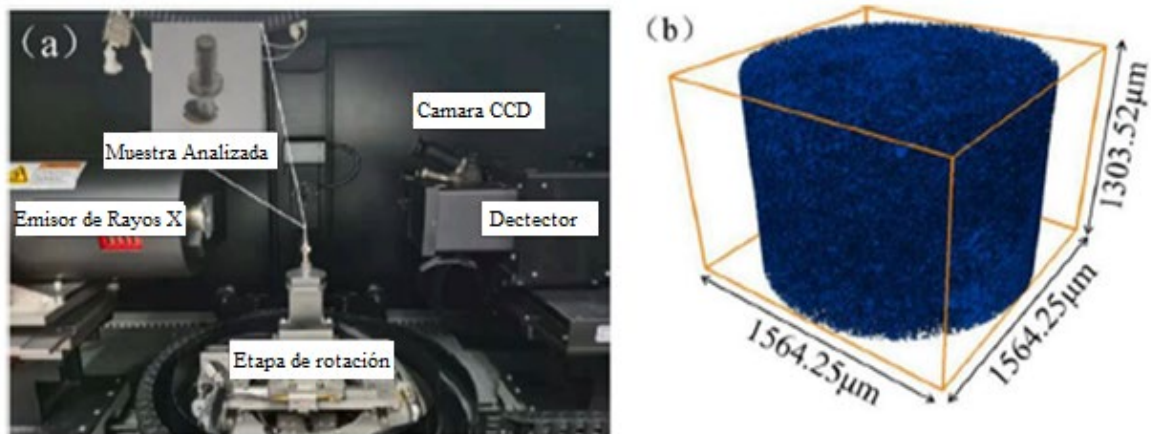
*Procedimiento para el método de microscopia electrónica de barrido/ haz de iones focalizados*



*Nota:* a) Fresado e imagen, b) Cortes de secuencia 2D obtenidos y c) representación 3D de las fases de los poros (muestra p3 después de 90 días. Adaptado de (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022)

**Figura 2**

*Método para obtener imágenes XCT.*



*Nota:* a) configuración experimental b) Representación de poros en 3D de una muestra P3 a una edad de 90 días. Adaptado de (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022)

En general, la complejidad de análisis de la porosidad en los materiales cementosos aun es objeto de estudio debido a que la aplicación conjunta de estos métodos revela resultados muy variables entre sí, así que la aplicación de estas técnicas de estudio solo representa una idea de relación entre microestructuras y otras características como permeabilidad, esta última relación (porosidad / permeabilidad de las pastas) también sigue siendo objeto de estudio, autores como Jiang (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022) realizaron un análisis de caracterización de poros usando varios métodos resumidos en la **Tabla 2**. Estos autores, realizaron un análisis de caracterización de poros usando varios métodos (ver **Figura 3**) donde se muestran los resultados de características específicas de los poros, como el tamaño y el volumen ocupado, para este resultado los grupos de muestra analizados se tipificaron según el área superficial, como puede verse en la **Tabla 3**.

**Tabla 2**

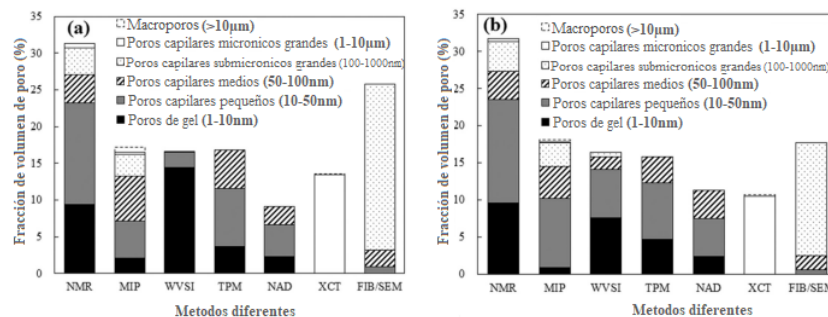
*Métodos experimentales usados para caracterización de estructuras porosas*

	Métodos	Pretratamiento de la muestra	Parámetros de poro
<b>Métodos indirectos</b>	Saturación de vacío (VS)	Secado al horno a 105°C	Porosidad
	Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)	Secado al vacío a 60°C	Porosidad,
	Adsorción/Desorción de Nitrógeno (NAD)	Secado al vacío a 60°C	distribución del
	Isotermas de sorción de vapor de agua (WVS)	Molido a polvo	tamaño de los poros,
	Resonancia magnética nuclear (NMR)	Saturado al vacío con agua	área superficial
	Termoporometría (IPM)	Saturado al vacío con agua	específica
<b>Métodos Directos</b>	Haz de iones enfocado/microscopía electrónica de barrido (FIB/SEM)	Impregnado al vacío con epoxi y superficie pulida	Porosidad,
	Tomografía computarizada de rayos x	Sin tratamiento específico	distribución del tamaño de los poros, área superficial específica, conectividad y tortuosidad.

*Nota:* Adaptado de (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022)

**Figura 3**

*Porosidad medida en diferentes rangos de tamaño de poro*



*Nota:* a) Para el grupo de muestras P3 b) Para el grupo de muestras P4 (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022)

**Tabla 3**

*Área específica de poro (m<sup>2</sup> /g) en varias muestras mediadas con diferentes métodos*

Métodos	P3-7d	P3-28d	P3-90d	P4
NMR	42.8	44.1	45.1	45.0
MIP	18.9	25.7	23.0	25.3
WVSI	112.9	124.9	148.8	149.3
TPM	35.2	41.1	48.2	49.7
NAD	11.7	17.6	19.8	20.0
XCT	0.119	0.076	0.087	0.085
FIB/SEM	-	-	3.74	2.28

*Nota:* Adaptado de (Jiang, Pan, Wang, & Lu, 2022)

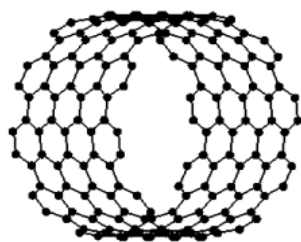
## 2.2 Estructuras de nanotubos de carbono

La primera persona en reportar el descubrimiento de los nanotubos de carbono fue Sumio Iijima en 1991 cuyo descubrimiento abrió las posibilidades para poder aprovechar un nanocompuesto con propiedades teóricamente superiores a las de otras nanoestructuras ordinarias. Los nanotubos de carbono son moléculas compuestas de átomos de carbono unidas entre sí mediante enlaces covalentes exhibiendo una estructura hexagonal repetitiva (**Figura 4**), debida a la hibridación sp<sup>2</sup>, donde un orbital s y dos orbitales p forman conjuntamente 3 orbitales sp<sup>2</sup>

híbridos a  $120^\circ$  esto, entendido en principio para una hoja de grafeno ya que al curvar la hoja de grafeno en forma tubular se obtienen los CNT, de esta forma los orbitales vuelven a hibridar (Ruoff, Qian, & Liu, 2003) esto produce que cada átomo este unido a otros tres átomos, como puede verse en la **Figura 5** y esta unión se da mediante enlaces covalentes, este tipo de enlace juega un papel primordial en las propiedades mecánicas de los CNT y sus tipos (Ruoff, Qian, & Liu, 2003).

#### Figura 4

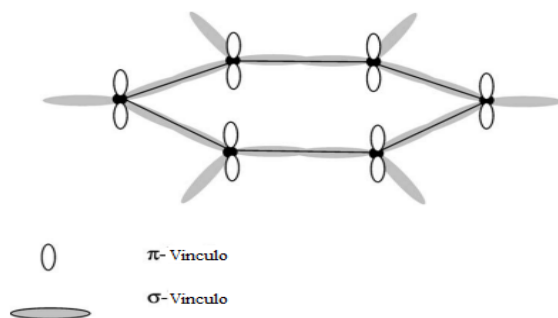
*Estructura molecular de una sección de (10, 10) CNT*



*Nota:* Cada nodo mostrado es un átomo de carbono y las líneas son los enlaces químicos. Tomado de (Ruoff, Qian, & Liu, 2003).

#### Figura 5

*Estructura de enlace hexagonal básica para una capa de grafito (hoja de grafeno)*



*Nota:* Núcleos de carbono mostrados como círculo relleno, enlaces  $\pi$  fuera del plano y enlaces  $\sigma$  conecta los núcleos C en el plano. Tomado de (Ruoff, Qian, & Liu, 2003).

**2.2.1 Estructura de nanotubos de pared simple**

Los CNT se consideran también como una hoja de grafeno hexagonal que se enrolla formando un cilindro hueco (Ansari & Rouhi, 2010) , según la configuración del enrollamiento permite identificar tres tipos de nanotubos de carbono simples o SWCNT posibles, diferenciados específicamente por un vector llamado Quiral ( $Ch$ ) o de acumulación  $r$ , que a su vez resulta de una combinación lineal de los vectores unitarios de la red hexagonal  $a_1$  y  $a_2$  descritos en la **Figura 6** y la **Figura 7**, estos vectores se expresan bajo la ecuación:

$$Ch = a_1 + ma_2$$

Donde los números asociados  $m$  y  $n$  son enteros mayores que cero y su relación describe tres tipos de SWCNT o subtipos de CNT:

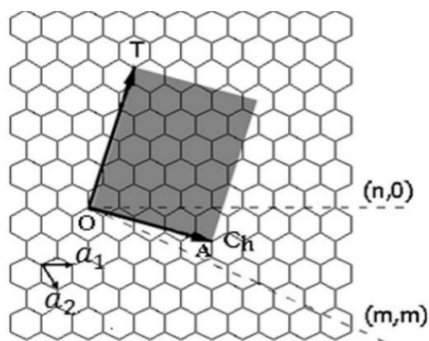
Zig-zag  $m=0 / \theta=0^\circ / (n,0)$

Armchair o sillón  $m=n / \theta=30^\circ$

Quiral  $0^\circ > \theta < 30^\circ$

**Figura 6**

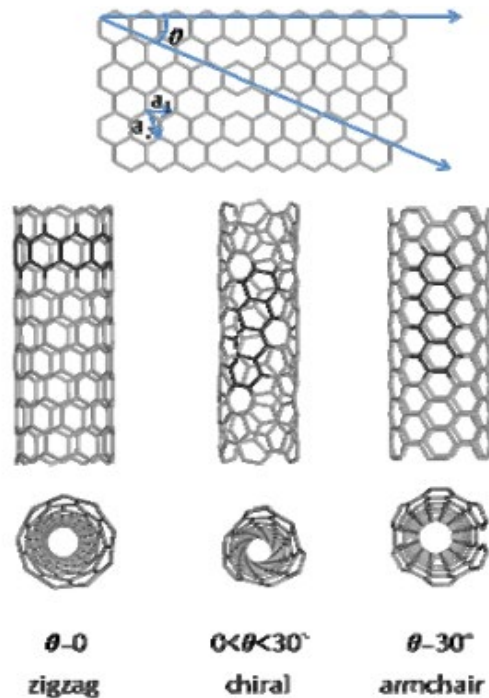
*Esquema de una hoja de grafeno y definiciones de parámetros geométricos para describir*



*Nota:* Tomado de (Vizute Medrano, 2013)

**Figura 7**

*Definición del vector quiral ( $Ch$ ) en una lámina de grafeno de SWCNTs.*



*Nota:* Tomado de (Vizute Medrano, 2013)

El tipo de conductividad ya sea metálico o semiconductor, en un SWCNT dado está determinado por sus propiedades y estructura. Esto significa que todos los SWCNTs con estructura tipo "armchair" exhibirán propiedades metálicas. En cambio, en el caso de los SWCNTs con estructura "quiral" y "zigzag", solo aquellos nanotubos en los que el coeficiente  $(n-m)/3$  sea un número entero mostrarán conductividad metálica, mientras que los demás SWCNTs serán semiconductores. (Vizute Medrano, 2013)

### **2.2.2 Estructura de MWCNT**

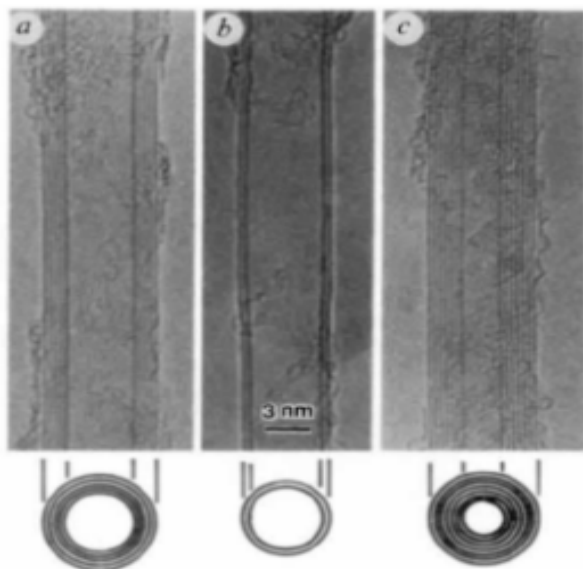
Los MWCNT (Carbon Nanotubes Multi-Walled, por sus siglas en inglés) consisten principalmente en capas de nanotubos de carbono anidados. La separación entre estas capas de

tubos concéntricos es aproximadamente de 0,34 nm, una medida cercana a la distancia presente en el grafito, la cual es de 0,335 nm (Lavin, Ruoff, & Berber, 2002).

Investigaciones realizadas por Kiang et al. han señalado que la curvatura influye en la separación entre capas, variando entre 0,342 y 0,375 nm, y esta variación depende de la cantidad de capas. Además del modelo de capas anidadas, Iijima logró observar de 2 a 50 capas de estos tubos o denominados individualmente como capas de grafeno como se muestra en la **Figura 8**, así mismo en la **Tabla 4** se presentan las propiedades de los nanotubos de carbono de pared múltiple.

### Figura 8

*Imagen TEM de los MWCNTs observados por Iijima*



Nota: Tomado de (Iijima, 1991)

**Tabla 4***Propiedades de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs)*

	Aspecto Radio	Diámetro (nm)	Longitud ( $\mu$ m)	Pureza (%)	Área de superficie (m <sup>2</sup> /g)
Corto	700	20-40	10-30	>95	110
Largo	1600	20-40	10-100	>97	250-300

*Nota:* Adaptado de (Konsta-Gdoutos, Metaxa, & Shah, 2010)

### 2.3 Propiedades mecánicas de los CNT

Los análisis sobre propiedades mecánicas de nanomateriales específicamente de los nanotubos de carbono denotan muchas dificultades debido a la exigencia o necesidad de equipos especializados, por lo tanto, muchos de los análisis se basan en reportes sobre modelamientos que incluyen simulaciones y modelado continuo.

Se ha determinado que el espesor de los nanotubos de carbono es un aspecto primordial a la hora de realizar análisis sobre sus propiedades mecánicas, pero varios autores resaltan la gran complejidad que significa la determinación de un valor específico de espesor de los nanotubos de carbono, por lo tanto, se hace énfasis en el uso de convenciones determinadas a partir de aproximaciones tales como tomar la medida de la separación entre capas como su espesor, esto específicamente para los MWCNTs, y para el caso de los SWCNT aún no se ha definido una medida concreta al respecto, en la actualidad varios autores han definido valores para el módulo de Young según el espesor de los mismos, así, los valores de espesor mayormente usados se encuentran entre  $H=0.066\text{nm}$  y  $0.34\text{ nm}$  (Lavin, Ruoff, & Berber, 2002) el primero bajo la convención de Yakobson cuyo valor fue calculado teniendo en cuenta la separación de enlaces y el segundo considera

estrictamente la separación entre capas de grafito determinada por Iijima mediante microscopía de transmisión de alta resolución o HRTEM ( *Vizute Medrano, 2013*)

**2.3.1 Módulo elástico o módulo de Young**

El análisis del módulo de Young ha presentado dificultades a lo largo del tiempo ya que se considera la ausencia de un plano transversal de isotropía en estos nanocompuestos cuyo razonamiento se plantea debido a las dificultades para obtener todas las constantes elásticas.

Para el cálculo o determinación del módulo de Young es necesario considerar las nanopartículas de carbono bajo criterios estructurales como vigas, barras y armazones con la finalidad de realizar medidas de compresión y tensión-deformación. En la **Tabla 5** se resumen algunas investigaciones relevantes para las nuevas investigaciones hoy di. (*Ruoff, Qian, & Liu, 2003*)

**Tabla 5**

*Estudios previos sobre módulo de Young en nanotubos de carbono*

Referencia	valor módulo de Young [Tpa]	Método/Herramienta de estudio	Miembro estructural	Observaciones
(Lourie & Wagner, 1998)	2,8 a 3,36 SWCNT 1,7 a 2,7 MWCNT	Espectroscopia miro-Raman	Barra	Compresión
(Yu, Lourie, Dyer, & Moloni, 2000)	0.320 a 1.470 SWCNT 0.270 a 0.950 MWCNT	---	---	Tracción directa
(Wong, Sheehan, & Lieber, 1997)	1,28 +- 0,59	Microscopio de fuerza atómica	Viga en voladizo	Se doblaron MWCNT individuales usando una punta de microscopio de fuerza atómica
(Treacy, Ebbesen, & Gibson, 1996)	0,4 y 4,15	Vibración térmica	Viga continua	---

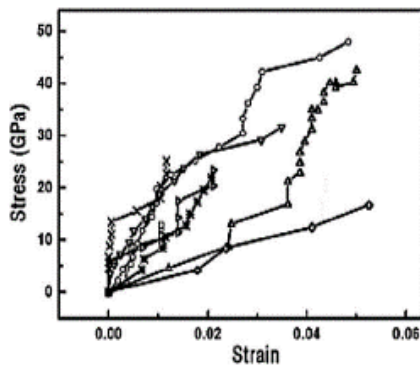
Referencia	valor módulo de Young [Tpa]	Método/Herramienta de estudio	Miembro estructural	Observaciones
(Krishnan, Dujardin, Ebbesen, Yianilos, & Treacy, 1998)	1,3-0.4/ +0.6	---	---	---
(Poncharal, Wang, Ugarte, & De Heer, 1999)	1 MWCNT	Contraelectrodo	---	Se midió la frecuencia de resonancia de los MWCNT impulsando la resonancia con un contraelectrodo y excitación de RF.
(Yakobson, Brabec, & Bernholc, 1996)	Aprox. 5,5	Modelo de capa continua	---	

En la tabla anterior se logra observar una variabilidad en los valores para el módulo de Young de los CNT esto debido a factores como el valor de espesor asumido y el tamaño del diámetro de los CNT y el tipo de CNT (en su mayoría se emplearon nanotubos de carbono de pared múltiple).

Lourie y Wagner (Lourie & Wagner, 1998) emplearon espectroscopia micro-Raman al modelo de barra, obteniendo como resultado a la compresión un módulo de Young de 2,8 a 3, 6 Tpa para SWCNT y de 1,7 a 2,4 Tpa para MWCNT. A continuación, se presentan las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas para ambos tipos de nanotubos de carbono (ver **Figura 9** y **Figura 10**). Es importante destacar que la tensión y la deformación se definen según los parámetros típicos de ingeniería, y la tensión se calcula considerando un espesor equivalente de 0,34 nm para cada capa de CNT cargado.

**Figura 9**

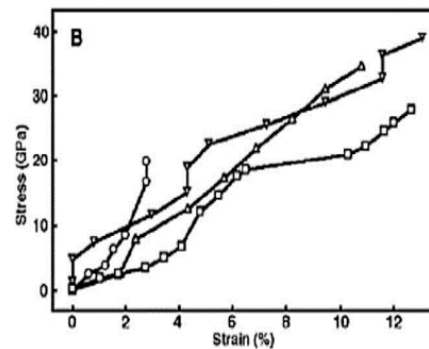
*curvas de tensión versus deformación  
obtenidas de los experimentos de carga de  
tracción en haces SWCNT individuales.*



*Nota:* Tomado de (Ruoff, Qian, & Liu, 2003)

**Figura 10**

*Plot of stress versus strain curves for 5  
individual MWCNTs.*



### 3. Propiedades mecánicas de las pastas de cemento Portland con la inclusión de nanotubos de carbono

Los valores de resistencia mecánica del cemento generalmente se encuentran especificados por el fabricante, dado que está directamente relacionado con su composición química, y los tiempos de curado del cemento, pues se sabe que a tiempos mayores a 28 días la resistencia mecánica del cemento aumenta. En la **Tabla 6** se enuncia una caracterización típica para el estudio de propiedades mecánicas del cemento y el valor de esfuerzo de compresión evaluado a diferentes edades de curado. Uno de los estudios hallados de mayor relevancia y riguroso fue realizado por Konsta y Mexata quienes especifican la metodología aplicada en la realización de las pruebas mecánicas de la pasta de cemento Portland reforzada, empleando nanoidentación, estableciendo la relación agua/cemento ( $w/c=0,3$ ) y evaluado a las edades de curado de 28 días, donde presenta mejores respuestas a la resistencia mecánica ver **Figura 11** (Konsta-Gdoutos, Metaxa, & Shah, 2010)

**Tabla 6**

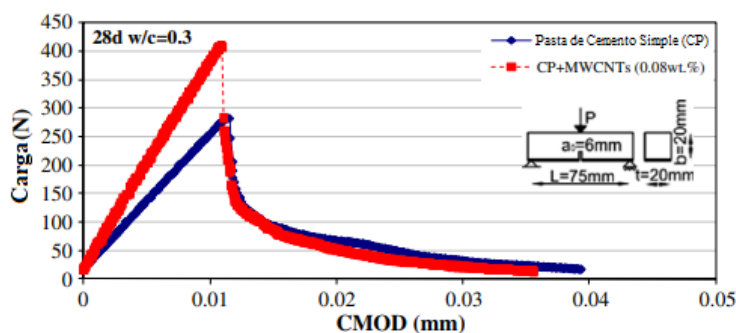
*Propiedades químicas y físicas del cemento.*

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$C_3A$	Superficie específica (Cm <sup>2</sup> /gr)	Fuerza compresiva, 7-días (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuerza compresiva, 28-días (kg/cm <sup>2</sup> )
22	5	3.82	64	1.9	1.5	6.5	3000	275	370

*Nota:* Adaptado de (Sedaghatdoost & Behfarnia, 2018)

**Figura 11**

*Comportamiento mecánico de pastas de cemento simple y pasta de cemento reforzada con 0.08% de MWCNTs en peso (W/C=0.3) 28 días de curado*



*Nota:* Tomado de (Konsta-Gdoutos, Metaxa, & Shah, 2010)

Para evaluar el cambio en las propiedades mecánicas de las pastas de cemento Portland es importante determinar las cantidades necesarias de estas nanopartículas y el comportamiento de la matriz nanorreforzada, aspectos como el tipo de nanotubo de carbono y subtipo son determinantes, un ejemplo son los MWCNTs cortos y largos empleados por Konsta, Mexata y Shah (**Tabla 4**) quienes determinaron el impacto positivo de los MWCNTs en matrices cementosas siempre que estos se encuentren dispersos adecuadamente, de esta forma mejoran las propiedades mecánicas de materiales cementicios, afirmando su gran utilidad en aplicaciones del campo de construcción e infraestructura. En la **Tabla 7**, se hace mención de algunos de los estudios más relevantes y su resultado en cuanto a la respuesta de las propiedades mecánicas de los materiales evaluados.

**Tabla 7**

*Estudios previos sobre influencia de la inclusión de CNT en pastas de cemento Portland*

<b>Autor/Referencia</b>	<b>% CNT</b>	<b>Tipo de CNT</b>	<b>Técnica de medición</b>	<b>Resultados</b>
(Makar & Beaudoin, 2004)	2,0%		Dureza SEM y Vickers	Aumento en las tasas de hidratación
(Li, Wang, & Zhao, Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, 2007)	0,5%	MWCNT		25% más en la resistencia a la flexión y un aumento del 19% en la resistencia a la compresión.
(Mexata, Konsta-Gdoutos, & Shah, 2009) (Shah, Konsta-Gdoutos, Metaxa, & Mondal, 2009)		MWCNT		Pueden reforzar fuertemente la matriz de pasta de cemento al aumentar la resistencia a la flexión y el módulo de Young de la pasta de cemento simple aumentando en un 25% y un 50%, respectivamente.
(Sedaghatdoost & Behfarnia, 2018)	0,1 %	MWCNT		Mejora en la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión del mortero de cemento al 35 %, 8 % y 11,2 %, respectivamente
(Xu, Liu, & Li, 2015)	0.1%	CNT		Mejoras significativas tanto en la resistencia a la compresión como en la resistencia a la fractura con una relación a/c de 0,33

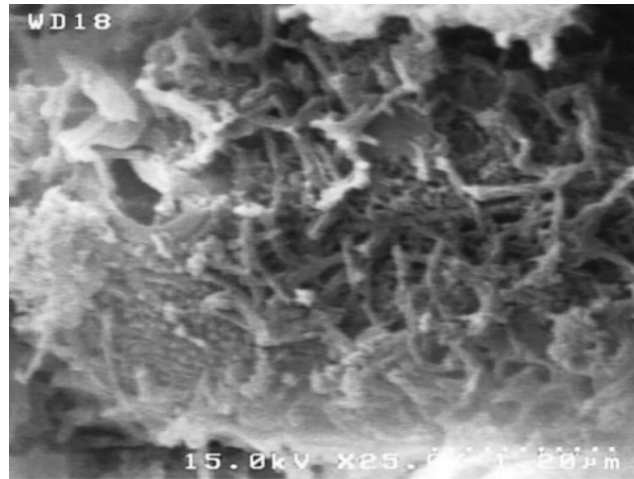
#### 4. Propiedades piezoeléctricas de las pastas de cemento Portland con la inclusión de CNTs

La piezoelectricidad es la capacidad de transformar movimientos como vibraciones o energía mecánica en energía eléctrica. Puede considerarse como una técnica de recolección y generación de energía eléctrica que permitiría reducir el uso de los recursos naturales que se encuentran en continuo descenso (Soh & Lim, 2016). Específicamente, lo que ocurre internamente en un material piezoeléctrico es un desplazamiento de aniones y cationes generando una carga superficial cuando se expone a un cambio de dimensión provocado por un esfuerzo de tensión.

La transferencia de carga en los compuestos cementosos, al igual que sus propiedades mecánicas depende en gran medida del volumen de poros y su hidratación, es pertinente entonces hablar sobre una característica del cemento de bajo enfoque como el índice de percolación relacionado directamente con la hidratación de las pastas de cemento y que su investigación específica es casi nula. Parvaneh y Hasanzadeh (Parvaneh & Hasanzadeh Khiabani, 2018) llevaron a cabo una caracterización eléctrica de muestras de pastas de cemento Portland, mortero y hormigón con inclusión de nanotubos de carbono, dichos autores emplearon diferentes contenidos o concentraciones de MWCNTs y un tensioactivo denominado NaDDBS (por sus siglas en inglés Sodium dodecylbenzene sulfonate) como tensioactivo para dispersar los nanotubos de carbono y modificar su superficie, como aspecto primordial garantizaron una dispersión de los MWCNTs apropiada en la pasta de cemento Portland haciendo uso de un microscopio electrónico de barrido (**Figura 12**). Para las muestras de las pastas de cemento, utilizaron una malla cuadrada de 6mm, las muestras analizadas consistían en cubos de  $5,1 \times 5,1 \times 5,1 \text{ cm}^3$  con electrodos en forma de red o malla incrustados directamente a lo largo de 85% de su espesor aproximadamente, fabricados con alambre de 0,5mm de acero inoxidable para un total de 5 electrodos netos paralelos a una cara del cubo con distancias de 1cm entre electrodos (ver **Figura 13**).

**Figura 12**

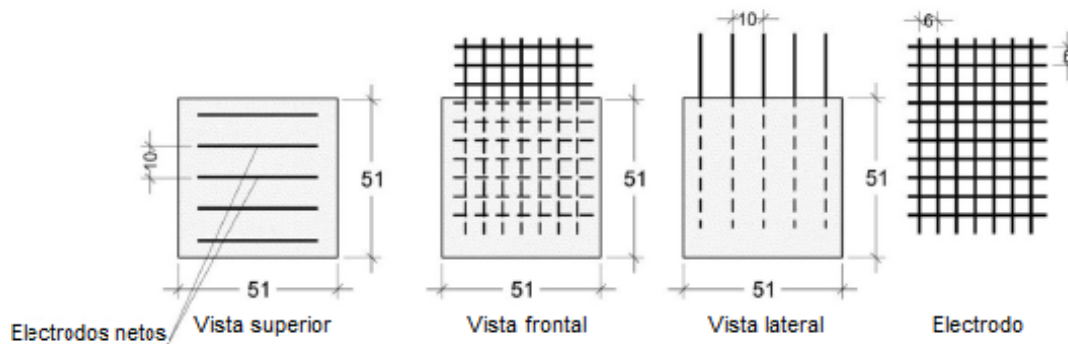
*Imagen SEM del nanocompuesto Pasta de cemento/Nanotubos de carbono con 1% en peso de nanotubos de carbono*



*Nota:* Tomado de (Parvaneh & Hasanzadeh Khiabani, 2018)

**Figura 13**

*Esquema y dimensiones en mm de muestras y disposición de electrodos para las muestras de pastas de cemento Portland con inclusión de MWCNTs*



*Nota:* Adaptado de (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2016)

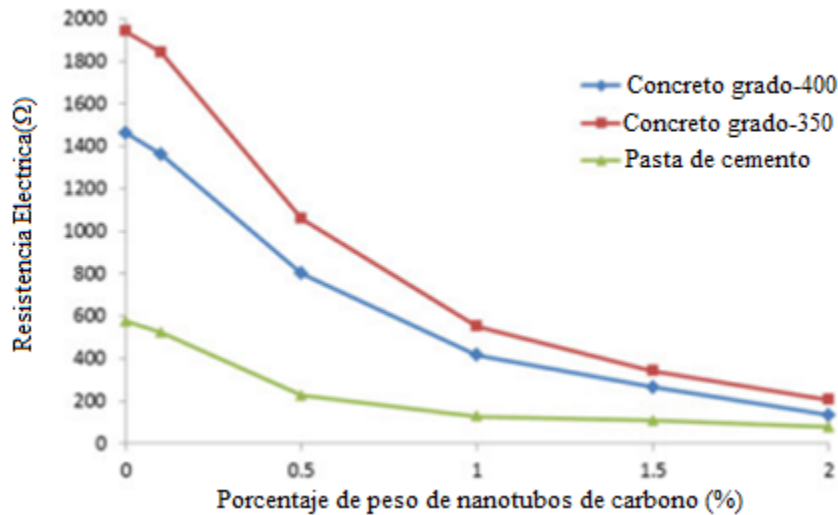
En estudios más recientes y específicos sobre la piezoelectricidad de estas pastas de cemento con inclusión de nanotubos de carbono, se hace necesario relacionar este término con

piezoresistividad para lo cual se ha encontrado un incremento en esta característica eléctrica para contenidos de un 0,2% (Azhari & Banthia, 2012)

Triana y colaboradores en un enfoque más profundo en cuanto a caracterización eléctrica emplean un modelo efectivo GEMTIP que permite una interpretación probablemente más práctica y completa, sin embargo los resultados obtenidos revelan varios aspectos importantes no mencionados o detallados como por ejemplo medidas de porosimetría y características físicas de los nanotubos empleados como su tamaño o relación de aspecto (Triana-Camacho, Miranda, Garcia, Mendoza, & Quintero, 2022). Por su parte Parvaneh encontró mediante pruebas experimentales que el porcentaje de MWCNTs agregados a los compuestos cementosos debe ser de 1% para obtener un aumento en la resistencia mecánica, específicamente en la resistencia a la compresión de 42,47 MPa a 80,33 MPa. Con respecto a la resistencia eléctrica se observó una disminución de 8% en cuanto a la relación agua/cemento, para valores mayores a 0,45 la resistencia a la compresión disminuye, algunas de los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 14** (Parvaneh & Hasanzadeh Khiabani, 2018).

**Figura 14**

*Resistencia eléctrica del nanocompuesto a base de cemento con respecto a diferentes porcentajes en peso de nanotubos de carbono*



*Nota:* tomado de (Parvaneh & Hasanzadeh Khiabani, 2018)

## 5. Limitaciones en la adición de CNT a pastas de cemento Portland

Estas limitaciones en general se traducen en la disminución o desaprovechamiento de las características deseadas, dentro de las limitaciones más determinantes a la hora de evaluar las características de las pastas de cemento Portland con la inclusión de nanotubos de carbono, y que se deben tener en cuenta para tener un análisis coherente para determinar la correcta funcionalidad se encuentran la relación agua cemento o w/c (por sus siglas en inglés Water/Cement), una correcta dispersión de los nanotubos de carbono dentro de la matriz cementosa y como se menciona anteriormente el contenido de nanotubos de carbono en el compuesto.

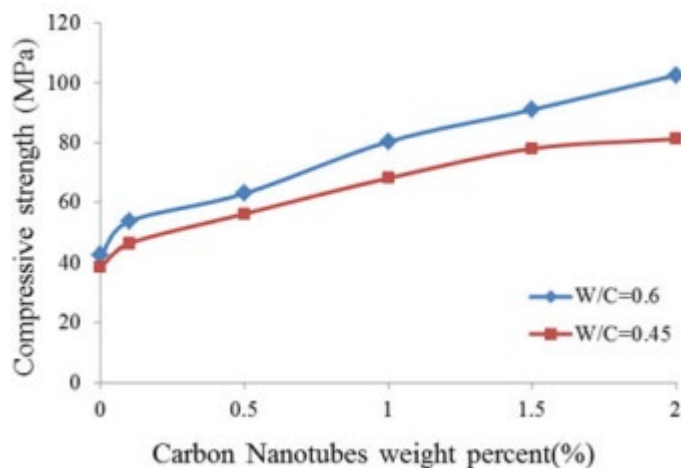
## 5.1 Relación agua/cemento

El índice de relación de agua/cemento para la pasta de cemento simple generalmente viene indicada por el fabricante del cemento, pues garantizan una alta durabilidad y desempeño de la estructura en conjunto con la sostenibilidad, por ejemplo, el fabricante argos proporciona en su ficha técnica las siguientes especificaciones: con una relación a/c de 0.50 la resistencia a la compresión es mayor a 28MPa o 4000psi de 0.40 mayor a 38MPa 5500 psi y la relación mayormente usada es de 0.35 y hasta 0.30 cuyo valor de resistencia a la compresión alcanza valores mayores a 41MPa o 6000psi (Grupo Argos, 2020)

Para el caso de la pasta de cemento con la inclusión de nanotubos de carbono propiamente el contenido de agua va relacionado estrictamente con la cantidad de nanotubos de carbono y generalmente, esta relación varía en rangos superiores a la indicada por el fabricante como se puede observar en la **Figura 15**.

**Figura 15**

*Efecto de la relación agua-cemento sobre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento.*



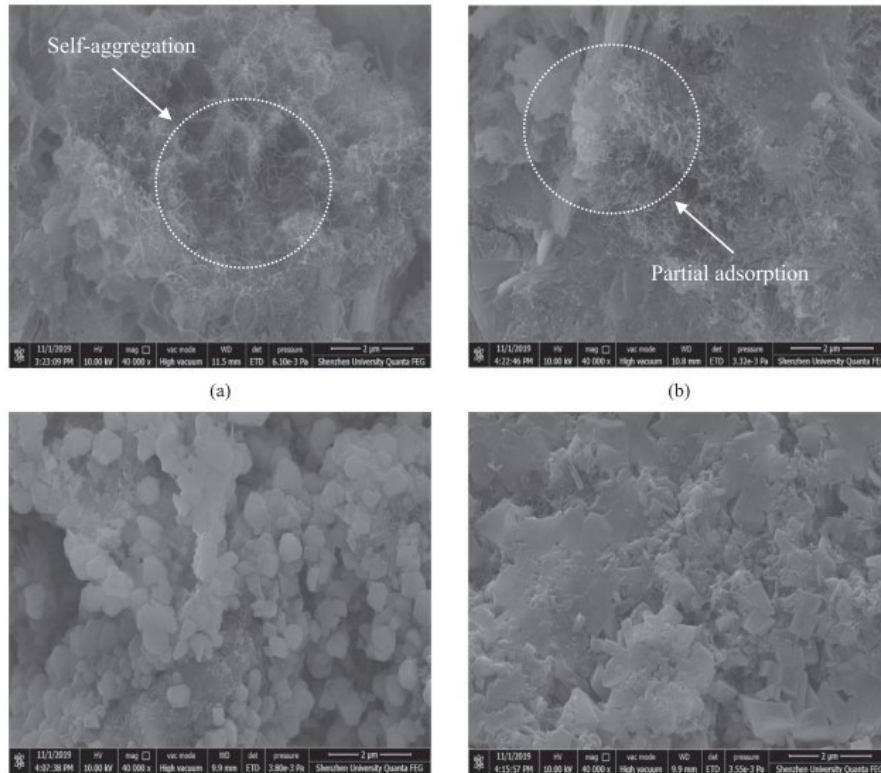
*Nota:* Tomado de (Parvaneh & Hasanzadeh Khiabani, 2018)

## 5.2 Dispersión los CNT

Una correcta dispersabilidad de los nanotubos de carbono en las pastas de cemento acarrea a su vez análisis sobre la relación de aspecto y condiciones de enlace. Las partículas de nanotubos de carbono de múltiples paredes (MWCNTs) poseen una superficie hidrofóbica. La falta de fluidez observada a nivel macroscópico en estos materiales compuestos se relaciona con las microenergías de Van der Waals, las interacciones electrostáticas y las interacciones polares entre las partículas de cemento y las de MWCNTs. Cuando estas energías de interacción son positivas, generan una repulsión entre partículas, mientras que, si son negativas, promueven la atracción entre ellas, es decir, la adsorción. En la **Figura 16** las imágenes de microscopía electrónica de barrido (ESEM) muestra que los nanotubos de carbono de múltiples paredes (MWCNTs) se agrupan y enredan en la pasta compuesta de cemento. Esto se debe a la dificultad para mezclar los MWCNTs con las partículas de cemento debido a la atracción mutua entre los MWCNTs y la falta de agentes dispersantes, la concentración desigual de MWCNTs entre las partículas de cemento crea poros adicionales, lo que reduce la fluidez y compacidad de las muestras y el riesgo de disminuir sus propiedades mecánicas, a pesar de algunas interacciones entre MWCNTs y partículas de cemento, estas aglomeraciones no están conectadas, provocando una dispersión inestable. En síntesis, la Teoría de la Doble Capa Eléctrica (EDLVO) explica la adsorción y aglomeración, evidenciadas por la ESEM en las muestras de cemento con MWCNTs. (Zhang, Ke, Zhang, Han, & Dong, 2020)

**Figura 16**

*Imágenes ESEM de pasta de cemento MWCNT*



*Nota:* (a) autoagregación de MWCNT, (b) adsorción parcial de MWCNT, (c) la relación PCE (éter de policarboxilato) a MWCNT es 1:1, (d) relación SDS (dodecilsulfato sódico o lauril, dispersante) a MWCNTs 0,8:1

Es importante analizar estudios previos sobre la mejor dispersabilidad de los nanotubos de carbono en las pastas de cemento, ya que es estrictamente necesario a la hora de garantizar un nanocompuesto altamente funcional y una matriz con buen acoplamiento, en el caso de las pastas de cemento Portland con la inclusión de nanotubos de carbono, a continuación, se presenta una tabla con algunos estudios previos sobre la dispersión correcta de nanotubos de carbono.

### **Análisis y conclusiones**

En este trabajo se logró identificar la viabilidad de la búsqueda de un material a base de cemento con propiedades potenciales de aprovechamiento energético, haciendo uso de captación de energía mediante propiedades piezoeléctricas del cemento Portland sin disminuir las propiedades mecánicas que lo caracterizan y convierten en un material con gran demanda en el campo de la construcción e infraestructura.

En la literatura los resultados óptimos obtenidos hasta la fecha para características mecánicas y eléctricas de interés se han realizado en su mayoría con nanotubos de carbono de pared múltiple o MWCNTs con un contenido en las pastas de carbono no mayor a un 1% y una relación agua/cemento de hasta 0,45. Estudios actuales descartan la influencia de aspectos importantes y necesarios en características mecánicas y eléctricas, por lo tanto, la complejidad de un análisis completo representa un reto en la búsqueda de un nanocompuesto a base de cemento que cumpla las expectativas de estudio y la necesidad de su óptimo aprovechamiento

La eficiencia de aprovechamiento energético depende tanto de la tensión aplicada como de la dirección de carga aplicada, polarización y su relación, esto se le denomina en la literatura como acoplamiento.

## Referencias

- Aligizaki, K. (2005). *Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation and Requirements* (Primera ed.). Londres: Taylor and Francis. doi:10.1201/9781482271959
- Ansari, R., & Rouhi, S. (2010). Atomistic finite element model for axial buckling of single-walled carbon nanotubes. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 43(1), 58-69. doi:10.1016/j.physe.2010.06.023
- Azhari, F., & Banthia, N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 866-873. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007
- Azhari, F., & Banthia, N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 37(7), 866-873. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007>
- Beaudoin, J., Feldman, R., & Tumidajski, P. (1994). Pore structure of hardened Portland cement pastes and its influence on properties. *Advanced Cement Based Materials*, 1(5), 224-236. doi:[https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)90028-0)
- Chakraborty, S., Wan Jo, B., & Yoon, Y. (2020). 7 - Development of nano cement concrete by top-down and bottom-up nanotechnology concept. *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*, 183-213. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00007-6>
- Chen, J., Qiu, Q., Han, Y., & Lau, D. (2019). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 14-25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.038> M
- Ćwirzeń, A., Habermehl-Cwirzen, K., & Penttala, V. (2008). Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. *Advances in Cement Research*, 20, 65-73. doi:10.1680/ADCR.2008.20.2.65
- Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, k., Nasibulin, A., Kaupinen, E., Mudimela, P., & Penttala, V. (2009). SEM/AFM studies of cementitious binder modified by MWCNT and nano-sized Fe needles. *Materials Characterization*, 60, 735-740. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.11.001>
- D'Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A., & Kenny, J. (2016). Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing. *Cement and Concrete Composites*, 200-213. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.001>
- Grupo Argos. (10 de septiembre de 2020). *Concreto de relación agua/material cementante*. Obtenido de Argos: [https://colombia.argos.co/fichas\\_tecnicas/ft-concreto-agua-material-cementante.pdf](https://colombia.argos.co/fichas_tecnicas/ft-concreto-agua-material-cementante.pdf)
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 56-58. doi:<https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Jiang, Z. L., Pan, Y. J., Wang, y., & Lu, J. F. (2022). Pore structure characterization of cement paste by different experimental methods and its influence on permeability evaluation. *Cement and Concrete Research*, 159, 106892.

- Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010). Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity. *Cement & Concrete Composites*, 6.
- Krishnan, A., Dujardin, E., Ebbesen, T., Yianilos, P., & Treacy, M. (1998). Young's modulus of single-walled nanotubes. *Physical review B*, 58, 14013-14019. doi:10.1103/PhysRevB.58.14013
- Lavin, J. G., Ruoff, R., & Berber, S. (2002). Scrolls and nested tubes in multiwall carbon nanotubes. *Carbon*, 1123-1130.
- Li, G. Y., Pei, M. W., & Xiaohua, Z. (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 1239-1245.
- Li, G. Y., Wang, P. M., & Zhao, X. (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites*, 377-382.
- Liu, C., Qian, R., Liu, G., Zhang, M., & Zhang, Y. (2021). Three-Dimensional Modeling of Transport Properties in Hardened Cement Paste Using Metal Centrifugation-Based Pore Network. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(12). doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004004
- Lourie, O., & Wagner, H. (1998). Evaluation of Young's modulus of carbon nanotubes by micro-Raman spectroscopy. *MATERIALS RESEARCH*, 2418 - 2422.
- Makar, J., & Beaudoin, J. J. (2004). Carbon Nanotubes and their Application in the Construction Industry. *Nanotechnology in Construction*, 412.
- Mexata, Z., Konsta-Gdoutos, M., & Shah, S. (2009). Carbon nanotubes reinforced concrete. *ACI Fall 2009 Convention* (págs. 11-20). New Orleans, LA, United States: The Next Big Thing is Small .
- Muller, A., & Scrivener, K. (2017). A reassessment of mercury intrusion porosimetry by comparison with <sup>1</sup>H NMR relaxometry. *Cement and Concrete Research*, 100, 350-360. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.024
- Naseri, F., & Irani, M. (2016). Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4), 695-701. doi:https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.04.008 B
- Parvaneh, V., & Hasanzadeh Khiabani, S. (2018). *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1537-6532. doi:10.1080/15376494.2018.1432789
- Poncharal, P., Wang, Z., Ugarte, D., & De Heer, W. (1999). Electrostatic Deflections and Electromechanical Resonances of Carbon Nanotubes. *Science*, 283, 1513-1516. doi:DOI: 10.1126/science.283.5407.151
- Rodriguez, B., Correa, E., Arias, Y., Quintero, J., Calderon, J., & Mendoza, O. (2019). Carbonation study in a cement matrix with carbon nanotubes. *Journal of Physics Conference Series*, 1247, 012024. doi:10.1088/1742- 6596/1247/1/012024 B
- Ruoff, R., Qian, D., & Liu, W. (2003). Mechanical properties of carbon nanotubes: Theoretical predictions and experimental measurements. *Comptes Rendus Physique*, 4(9), 993-1008. doi:10.1016/j.crhy.2003.08.001

- Sedaghatdoost, A., & Behfarnia, K. (2018). Mechanical properties of Portland cement mortar containing multi-walled carbon nanotubes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 482-489. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.095>
- Senff, L., Labrincha, J., Ferreira, V., Hotza, D., & Repette, W. (2009). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Constr. Build. Mater*, 23(7), 2487-2491. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005> F.
- Shah, S. P., Konsta-Gdoutos, M., Metaxa, Z., & Mondal, P. (2009). Nanoscale Modification of Cementitious Materials. *Materials Science, Engineering*. doi:10.1007/978-3-642-00980-8\_16
- Singh, N., Kalra, M., & Saxena, S. (2017). Nanoscience of Cement and Concrete. *Materials Today Proceedings*, 4(4), 5478-5487. doi:10.1016/j.matpr.2017.06.003
- Soh, C.-K., & Lim, Y. (2016). Fatigue damage diagnosis and prognosis using electromechanical impedance technique. *Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures*, 429-446. doi:10.1016/B978-0-08-100148-6.00015-9
- Song, Y., Davy, C., Troadec, D., & Bourbon, X. (2019). Pore network of cement hydrates in a High Performance Concrete by 3D FIB/SEM — Implications for macroscopic fluid transport. *Cement and Concrete Research*, 115, 308-326. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.004>
- Sun, M., Liu, Q., Li, Z., & Hu, Y. (2000). A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1593-1595. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00338-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00338-0)
- Tobon, J., Restrepo, O., & Paya, J. (2007). Adición de nanopartículas al cemento Portland. *Dyna*, 74(152), 277-291.
- Treacy, M. M., Ebbesen, T., & Gibson, J. (1996). Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, 678-680. doi:<https://doi.org/10.1038/381678a0>
- Triana-Camacho, D. A., Miranda, D., Garcia, E., Mendoza, O., & Quintero, J. (2022). Effective medium electrical response model of carbon nanotubes cement-based composites. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128293>
- Vizute Medrano, M. (2013). Diseño y síntesis de nanotubos de carbono con aplicaciones optoelectrónicas. (*Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha*). Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=78515>
- Wong, E. W., Sheehan, P., & Lieber, C. (1997). Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes. *Science*, 277, 1971-1975. doi:DOI: 10.1126/science.277.5334.1971
- Xu, S., Liu, J., & Li, Q. (2015). Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste. *Construction and Building Materials*, 76, 16-23. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.049>
- Yakobson, B. I., Brabec, C., & Bernholc, J. (1996). Nanomechanics of Carbon Tubes: Instabilities beyond Linear Response. *Physical Review Letter*, 76, 2511--2514. doi:10.1103/PhysRevLett.76.2511
- Yu, M.-F., Lourie, O., Dyer, M., & Moloni, K. (2000). Strength and Breaking Mechanism of Multiwall Carbon Nanotubes Under Tensile Load. *Science*, 287, 637-640. doi:10.1126/science.287.5453.637

- Zhang, J., Ke, Y., Zhang, J., Han, Q., & Dong, B. (2020). Cement paste with well-dispersed multi-walled carbon nanotubes: *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120746>
- Zhou, F., Meng, H., Pan, G., & Mi, R. (2022). Influence of CSH grown in situ on steel slag powder on the performance of fresh and hardened cement pastes. *Construction and Building Materials*, 344, 128269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128269>
- Zhu, R., & Wang, Z. (2020). 9 - Piezoelectric one- to two-dimensional nanomaterials for vibration energy harvesting devices. *Emerging 2D Materials and Devices for the Internet of Things*, 221-241. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818386-1.00009-6>