



Evaluación de la respuesta mecánica de morteros con adición de nanotubos de carbono utilizando la resistividad eléctrica del material

Yon Alexander Bolaños Díaz

Universidad Nacional de Colombia
Ingeniería, Departamento de ingeniería Agrícola y Civil
Bogotá, Colombia
2025

Evaluación de la respuesta mecánica de morteros con adición de nanotubos de carbono utilizando la resistividad eléctrica del material

Yon Alexander Bolaños Díaz

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Estructuras

Director:

Dr. Ing. Juan Manuel Lizarazo Marriaga
Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá

Codirector:

Dr. Ing. Enrico Zacchei
ITECONS Institute. Universidad de Coímbra. Portugal

Línea de Investigación:

Materiales para Estructuras

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Análisis, Diseño y Materiales - GIES

Universidad Nacional de Colombia

Ingeniería, Departamento de ingeniería Agrícola y Civil

Bogotá, Colombia

2025

El conocimiento verdadero no busca oro, sino transformación: de la materia, del pensamiento y del espíritu. Como el alquimista, el investigador convierte lo invisible en comprensible

Nicolas Flamel

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre: Yon Alexander Bolaños Diaz

Fecha 21/04/2025

Agradecimientos

Agradezco, ante todo, a Dios y a la Virgen por permitirme llegar hasta este punto. A mis padres, por su apoyo incondicional; a mi hermano, por acompañarme cuando más lo necesité; y a mi novia, por su aliento constante. Extiendo mi gratitud al profesor Juan Manuel Lizarazo, director de esta tesis, por su guía paciente y generosa, y al profesor Enrico Zacchei, codirector, por compartir su experiencia y enseñanzas. Reconozco igualmente a los laboratoristas del Laboratorio de Estructuras, cuyo apoyo técnico resultó esencial, y a todos mis profesores de carrera, quienes forjaron mi formación profesional y sembraron en mí la vocación investigadora; en especial a la profesora Maritzabel Molina, referente desde mi pregrado y quien siempre confió en mi trabajo.

También agradezco a quienes aportaron de manera decisiva a esta investigación: al profesor Juan Carlos Serrato, por facilitar su laboratorio para la realización de ensayos; a la Universidad del Cauca, por abrir sus instalaciones para las pruebas de Microscopía Electrónica de Transmisión; y a los laboratoristas del Departamento de Física y Geología de la Universidad Nacional, cuya ayuda fue clave para obtener las imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido. A todos ustedes, muchas gracias por hacer posible este trabajo.

Resumen

Evaluación de la respuesta mecánica de morteros con adición de nanotubos de carbono utilizando la resistividad eléctrica del material

La monitorización de edificios mediante tecnología de sensores promueve la rápida acción ante cualquier perturbación que pueda comprometer la integridad estructural, permitiendo optimizar el mantenimiento, reducir costos operativos y aumentar la seguridad a lo largo de su vida útil. Por esta razón, este trabajo estudia la viabilidad de tres tipos de electrodos embebidos en morteros con adiciones del 0.0 % 0.5 % y 1.0 % de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) como método de evaluación estructural. La presente investigación abarca desde el diseño de las mezclas hasta el establecimiento de la relación entre las propiedades eléctricas bajo cargas mecánicas. En primer lugar, se determinó el método de dispersión de los MWCNT para elaborar las mezclas, siendo el más efectivo el ultrasonido por sonda, además se proporciona un método de ensayo para evaluar la conductividad de soluciones mediante diagramas de Nyquist usando un electrodo serigrafiado. Con la mezcla definida y empleando tres tipos de electrodos (malla de alambre, lámina de acero y electrodo serigrafiado cerámico), se elaboraron diferentes especímenes los cuales a través de un diseño experimental que midió el Cambio Fraccional en la Resistencia (FCR), se correlacionó de manera consistente los valores de impedancia real con los niveles de carga aplicados, obteniendo valores de coeficiente de correlación (R^2) muy cercanos a 1. Adicionalmente, se realizó un análisis de reproducibilidad obteniendo coeficientes de variación alrededor de 1 % en los mejores especímenes. Como resultado del estudio se logró identificar los electrodos de lámina de acero como los más funcionales.

Palabras clave: MWCNT, FCR, dispersión ultrasónica, monitoreo de estructuras, electrodo serigrafiado.

Abstract

Evaluation of the mechanical response of mortars with the addition of carbon nanotubes using the electrical resistivity of the material

Monitoring buildings using sensor technology promotes rapid action in the event of any disturbance that could compromise structural integrity, allowing for optimized maintenance, reduced operating costs and increased safety throughout the building's useful life. For this reason, this work studies the viability of three types of electrodes embedded in mortars with additions of 0.0%, 0.5% and 1.0% multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) as a method of structural evaluation. The present investigation covers from the design of the mixtures to the establishment of the relationship between electrical and mechanical properties. Firstly, the dispersion method for the MWCNT was determined to prepare the mixtures, with probe ultrasound being the most effective. A test method is also provided to evaluate the conductivity of solutions by means of Nyquist diagrams using a screen-printed electrode. With the mixture defined and using three types of electrodes (wire mesh, steel foil and ceramic screen-printed electrode), different specimens were produced which, through an experimental design that measured the Fractional Change in Resistance (FCR), consistently correlated the real impedance values with the applied load levels, obtaining correlation coefficient (R^2) values very close to 1. Additionally, a reproducibility analysis was performed, obtaining coefficients of variation around 1% in the best specimens. As a result of the study, steel foil electrodes were identified as the most functional.

Keywords: MWCNT, FCR, ultrasonic dispersion, structure monitoring, screen-printed electrode.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas	XIX
Introducción	21
1. Preliminares	24
1.1 Planteamiento del problema	24
1.2 Objetivos	26
1.2.1 Objetivo general	26
1.2.2 Objetivos específicos	26
1.3 Estructura del documento	26
1.4 Estado del conocimiento.....	28
2. Marco teórico	38
2.1 Cemento hidráulico	38
2.2 Nanotubos de carbono	40
2.3 Materiales compuestos multifuncionales	46
2.4 Métodos de dispersión de nanopartículas	47
2.4.1 Dispersión por funcionalización	48
2.4.2 Dispersión por ultrasonido	49
2.4.3 Dispersión con surfactantes	51
2.5 Medición eléctrica de materiales compuestos multifuncionales	52
2.5.1 Métodos de medición	53
2.5.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica EIS	59
2.5.3 Resistividad eléctrica	65
2.5.4 Diagrama de Nyquist.....	68
3. Metodología.....	71
3.1 Equipos.....	75
3.1.1 Ultrasonido por sonda	75
3.1.2 Ultrasonido por baño.....	78
3.1.3 Agitador magnético	79
3.1.4 Conductímetro.....	80
3.1.5 Sistema PROOVE'it de 8 canales.....	81
3.1.6 Potenciostato	83
3.1.7 Maquina universal	85
3.1.8 Espectrofotómetro UV/Vis.....	86

XII Evaluación de la respuesta mecánica de morteros con adición de nanotubos de carbono utilizando la resistividad eléctrica del material

3.1.9 Equipos y herramientas auxiliares	87
3.2 Materiales	90
3.2.1 Cemento	90
3.2.2 Arena	92
3.2.3 Agua desionizada	95
3.2.4 Nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT)	96
3.2.5 Grafito en polvo	102
3.2.6 Electrodo	103
3.2.7 Superplastificante	108
3.3 Diseño experimental	108
3.3.1 Entradas	111
3.3.2 Factores controlables	112
3.3.3 Factores no controlables	113
3.3.4 Respuesta de salida	114
3.4 Dispersión de MWCNT	115
3.4.1 Método manual	115
3.4.2 Método manual con superplastificante	116
3.4.3 Método de ultrasonido por baño	117
3.4.4 Método de ultrasonido por sonda	118
3.5 Diseño de mezcla	119
3.5.1 Selección metodología de dispersión de MWCNT	121
3.5.2 Elaboración de mezcla de morteros	128
3.6 Ensayos mecánicos	130
3.6.1 Compresión	131
3.6.2 Tensión	132
3.6.3 Flexión	134
3.7 Diseño de electrodos	136
3.8 Ensayos de impedancia eléctrica sobre especímenes	140
3.8.1 Ciclos de carga	142
3.8.2 Monitoreo mediante el Cambio Fraccional en la Resistencia (FCR)	144
3.9 Metodología para correlacionar datos	145
4. Discusión y análisis de resultados	146
4.1 Ensayos de dispersión	146
4.2 Elaboración de especímenes	164
4.3 Ensayos mecánicos	169
4.3.1 Compresión	169
4.3.2 Tensión	172
4.3.3 Flexión	174
4.4 Ensayos eléctricos	176
4.4.1 Conductividad	176
4.4.2 Selección de frecuencia ensayos de AC	178
4.5 Respuesta eléctrica ante cargas mecánicas	180
4.5.1 Reproducibilidad experimental	183
4.5.2 Respuesta de especímenes ante cargas mecánicas	195
5. Conclusiones y trabajos futuros	221
5.1 Conclusiones	221
5.2 Trabajos futuros	223

Anexos	239
Anexo A	239
Anexo B	248
Anexo C	257
Anexo D	267

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Ciclo de Gartner para nanotubos de carbono.....	29
Figura 1-2. Red Conceptual de investigaciones en nanotecnología y concreto.	30
Figura 2-1. Esquema de una lámina de grafeno (a) Nanotubos de pared simple (SWCNT) (b) y de pared múltiple (MWCNT) (c).....	41
Figura 2-2. Estructura de MWCNT.....	42
Figura 2-3. Esquema de Formación de Material Compuesto Multifuncional.	47
Figura 2-4. Esquema de la Configuración de Cuatro Puntas para Medición de Resistividad Eléctrica.....	55
Figura 2-5. Técnicas de medición de la resistividad eléctrica: (a) método uniaxial de dos puntos y (b) método de cuatro puntos (Wenner).	56
Figura 2-6. Configuración experimental para la medición de la resistencia de CA.....	57
Figura 2-7. Especímenes con electrodos embebidos por distintos autores.....	58
Figura 2-8. Representación en el plano complejo de la impedancia.	63
Figura 2-9. Circuito equivalente simplificado para pasta de cemento en hidratación.	64
Figura 2-10. Montaje de ensayos de resistividad eléctrica para electrodos serigrafiados.	64
Figura 2-11. Diagrama de Nyquist.	70
Figura 2-12. Diagrama de Bode.....	70
Figura 3-1. Fases Metodológicas de la Investigación.	74
Figura 3-2. Ultrasonido por sonda Branson Digital Sonifier 450.	75
Figura 3-3. Ultrasonido por sonda QSONICA Sonicator Processor Q125.....	77
Figura 3-4. Ultrasonido de baño Branson M1800H.....	78
Figura 3-5. Agitador magnético con placa calefactora Boeco MSH 130 y barra de agitación magnética.	79
Figura 3-6. Conductímetro de mesa Lab 945.	80
Figura 3-7. Dispositivo PROOVE'it de 8 canales.	82
Figura 3-8. Potenciostato/galvanostato/ZRA de la empresa Gamry Instruments referencia 600+(derecha), computador con software Gamry (izquierda).	83
Figura 3-9. Máquina universal SHIMADZU tipo AG-X plus 250 kN / 300 kN (derecha), computador con software (izquierda).....	85
Figura 3-10. Espectrómetro SPECORD 50 PLUS, Universidad de los Andes.	86
Figura 3-11. Cemento Argos tipo ART.....	91
Figura 3-12. Arena 20-30	92

Figura 3-13. Curva granulométrica de la Arena sílice 20-30.....	93
Figura 3-14. Equipo de osmosis inversa del laboratorio de ambiental de la universidad Nacional de Colombia.....	95
Figura 3-15. Lotes de nanotubos, cada uno de 30 g.	96
Figura 3-16. Fotografía SEM de aglomerados de MWCNT, primer lote.	97
Figura 3-17. Fotografías SEM de aglomerados de MWCNT, segundo lote.....	98
Figura 3-18. Fotografía SEM de aglomerados de MWCNT, tercer lote.	98
Figura 3-19. Espectro EDX de MWCNT para los lotes (a) primero, (b) segundo y (c) tercero.....	99
Figura 3-20. Fotografías de MWCNT en el TEM, lote 1 (a), lote 2 (b), lote 3 (c).	101
Figura 3-21. Grafito Polvo 18 g.	102
Figura 3-22. Estructura del grafito.....	102
Figura 3-23. Fotografía SEM (a) y espectro EDX (b) del polvo de grafito.	103
Figura 3-24. Electrodo serigrafiado en PET con tinta impresa de carbono.	104
Figura 3-25. Electrodo serigrafiado en cerámica con tinta impresa de platino.	105
Figura 3-26. Láminas de acero Maxdur 304 - 304L.	106
Figura 3-27. Baquelita de cobre, cara de resina (izquierda), cara de cobre (derecha)..	107
Figura 3-28. Trozo de alambre de acero al carbono.	107
Figura 3-29. Superplastificante ViscoCrete®-3100.....	108
Figura 3-30. Esquema del diseño experimental para la selección del método óptimo de dispersión.....	114
Figura 3-31. Esquema del diseño experimental para evaluar la variación de resistividad en los especímenes sometidos a cargas mecánicas a lo largo del tiempo.	115
Figura 3-32. Método manual de dispersión, uso de agitador magnetico.	116
Figura 3-33. Método manual con aditivo superplastificante.....	116
Figura 3-34. Principios de operación de un baño ultrasónico.	117
Figura 3-35. Montaje de muestras para dispersión por baño de ultrasonido.	117
Figura 3-36. Principios y fenómeno del ultrasonido por sonda.	118
Figura 3-37. Procedimiento de dispersión por sonda ultrasónica.	119
Figura 3-38. Identificación de la resistencia en Diagrama de Nyquist para una solución acuosa.....	122
Figura 3-39. Montaje de electrodos en recipientes de muestras dispersas.	123
Figura 3-40. Análisis de la repetibilidad de Series de datos variando el electrodo serigrafiado con barras de Error y COV Máximo.	124
Figura 3-41. Análisis de la repetibilidad de Series de datos de una sola muestra con barras de Error y COV Máximo.....	124
Figura 3-42. Procedimiento para la medición de conductividad eléctrica.	125
Figura 3-43. Montaje para toma de fotografías.	126
Figura 3-44. Determinación de la fluidez.....	129
Figura 3-45. Proceso de elaboración de especímenes para ensayos mecánicos.	135
Figura 3-46. Efecto de la oxidación en baquelitas de cobre embebidas en el mortero.	136
Figura 3-47. Electrodos de lámina de acero inoxidable embebidos en cubos.	138
Figura 3-48. Electrodos de lámina de acero inoxidable embebidos en briquetas.....	138
Figura 3-49. Electrodos tipo malla en especímenes cúbicos.....	139

Figura 3-50. Electrodo tipo malla en especímenes en forma de briqueta.....	139
Figura 3-51. Electrodo serigrafiado embebidos en los especímenes.....	139
Figura 3-52. Montaje y respuesta eléctrica del espécimen cubico con adición de grafito ante compresión.	141
Figura 3-53. Ensayo cíclico de carga a compresión, variando el voltaje.	142
Figura 3-54. Ciclos de carga para ensayos de compresión.....	143
Figura 3-55. Ciclos de carga para ensayos de tensión.....	143
Figura 3-56. Montaje y proceso de medición eléctrica.....	145
Figura 4-1. Diagramas Nyquist y valores de R , muestra patrón.	148
Figura 4-2. Diagramas Nyquist y valores de R , muestra 7.	150
Figura 4-3. Comparación de métodos de dispersión de MWCNT mediante resistencia y conductividad eléctrica, en el tiempo de 0 h y 1 h.	154
Figura 4-4. Evolución de la conductividad normalizada en suspensiones de MWCNT mediante diferentes métodos de dispersión	156
Figura 4-5. Espectros de absorbancia UV-Vis de MWCNT en agua: comparación entre métodos de dispersión y concentraciones.....	157
Figura 4-6. Fotografías SEM de MWCNT sin proceso de dispersión.....	158
Figura 4-7. Fotografías SEM de MWCNT luego del proceso de dispersión.	158
Figura 4-8. Registro fotográfico de los diferentes métodos de dispersión.	159
Figura 4-9. Esquema del procedimiento para la elaboración de especímenes con MWCNT para mediciones de respuestas eléctricas ante cargas mecánicas.	165
Figura 4-10. Variación de la fluidez según el contenido de MWCNT, 0.0 % (a), 0.5 % (b) y 1.0 % (c).....	167
Figura 4-11. Expansión por RAS en barras de mortero con distintas adiciones de MWCNT.	168
Figura 4-12. Montaje ensayo de compresión.....	169
Figura 4-13. Efecto de la compactación y del contenido de MWCNT sobre la resistencia a compresión	170
Figura 4-14. Evolución de la resistencia a compresión con distintos contenidos de MWCNT.	172
Figura 4-15. Montaje ensayo de tensión.....	172
Figura 4-16. Evolución de la resistencia a tensión con distintos contenidos de MWCNT.	173
Figura 4-17. Montaje ensayo de flexión.....	174
Figura 4-18. Evolución de la resistencia a flexión con distintos contenidos de MWCNT.	175
Figura 4-19. Montaje para medición de impedancia mediante dispositivo PROOVE'it.	177
Figura 4-20. Evolución de la Conductividad Eléctrica en Morteros con Diferentes Porcentajes de MWCNT.	178
Figura 4-21. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo (a) y briqueta (b) con electrodo serigrafiado, con adición de 0.5 % MWCNT.....	179
Figura 4-22. Evolución de la Pérdida de contenido de agua en Briquetas.	182
Figura 4-23. Evolución de la Pérdida de contenido de agua en Cubos.	182

Figura 4-24. Ciclos de carga para los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.	184
Figura 4-25. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga (20000 N) en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.	185
Figura 4-26. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEL 0.5 % MWCNT.	186
Figura 4-27. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEM 0.5 % MWCNT.	186
Figura 4-28. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CES 0.5 % MWCNT.	186
Figura 4-29. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEL 0.5 % MWCNT.	186
Figura 4-30. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEM 0.5 % MWCNT.	187
Figura 4-31. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BES 0.5 % MWCNT.	187
Figura 4-32. FCR promedio vs Tiempo, para especímenes en forma de cubo con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo tipo lamina de acero.	189
Figura 4-33. FCR promedio vs Tiempo, para especímenes en forma de cubo con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo tipo malla de alambre de acero.	189
Figura 4-34. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de cubo con electrodo tipo malla de alambre de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.	191
Figura 4-35. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de cubo con electrodo tipo lamina de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.	192
Figura 4-36. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de cubo con electrodo serigrafiado cerámico, variando el porcentaje de adición de MWCNT.	193
Figura 4-37. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de briqueta con electrodo tipo malla de alambre de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.	194
Figura 4-38. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de briqueta con electrodo tipo lamina de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.	194
Figura 4-39. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de briqueta con electrodo serigrafiado cerámico, variando el porcentaje de adición de MWCNT.	195
Figura 4-40. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo malla de alambre de acero.	196
Figura 4-41. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen cubico con electrodo tipo malla de alambre de acero.	197
Figura 4-42. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo malla de alambre de acero.	198
Figura 4-43. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo lamina de acero.	199
Figura 4-44. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen cubico con electrodo tipo lamina de acero.	199
Figura 4-45. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo lamina de acero.	200
Figura 4-46. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo serigrafiado cerámico.	201
Figura 4-47. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen cubico con electrodo tipo serigrafiado cerámico.	201

Figura 4-48. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo serigrafiado cerámico.	202
Figura 4-49. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo malla de alambre de acero.	203
Figura 4-50. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen en forma de briqueta con electrodo tipo malla de alambre de acero.	203
Figura 4-51. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo malla de alambre de acero.	204
Figura 4-52. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo lamina de acero.	205
Figura 4-53. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, electrodo tipo lamina de acero.	205
Figura 4-54. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo lamina de acero.	206
Figura 4-55. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo serigrafiado cerámico.	207
Figura 4-56. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, electrodo tipo serigrafiado cerámico.	207
Figura 4-57. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo serigrafiado cerámico.	208
Figura 4-58. Respuesta FCR a compresión con diferentes configuraciones de electrodos	209
Figura 4-59. Respuesta FCR a tensión con diferentes configuraciones de electrodos.	210
Figura 4-60. FCR vs tiempo: electrodo de malla de alambre (CEM), compresión hasta la falla.	211
Figura 4-61. Falla espécimen CEM 0.5 % MWCNT.	211
Figura 4-62. FCR vs tiempo: electrodo de lámina de acero (CEL), compresión hasta la falla.	212
Figura 4-63. Falla espécimen CEL 0.5 % MWCNT.	213
Figura 4-64. FCR vs tiempo: electrodo serigrafiado cerámico (CES), compresión hasta la falla.	214
Figura 4-65. Falla espécimen CES 0.5 % MWCNT.	214
Figura 4-66. FCR vs tiempo: electrodo de malla de alambre (BEM), tensión hasta la falla.	215
Figura 4-67. Falla espécimen BEM 0.5 % MWCNT.	215
Figura 4-68. FCR vs tiempo: electrodo de lámina de acero (BEL), tensión hasta la falla.	216
Figura 4-69. Falla espécimen BEL 0.5 % MWCNT.	217
Figura 4-70. FCR vs tiempo: electrodo de malla de alambre (BES), tensión hasta la falla.	218
Figura 4-71. Falla espécimen BES 0.5 % MWCNT.	218

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Clasificación de tipos de mortero.	40
Tabla 2-2. Propiedades de MWCNT. (Cerro-Prada et al., 2021; D'Alessandro et al., 2016; Del & Camacho Ballesta, 2013; Siahkouhi et al., 2021).	43
Tabla 2-3. Comparación sonda y baño de ultrasonido.	51
Tabla 3-1. Especificaciones técnicas. Adaptado de Branson Ultrasonics Corporation (2001).	76
Tabla 3-2. Especificaciones técnicas. Adaptado de QSONICA, (2023)	77
Tabla 3-3. Especificaciones técnicas ultrasonido de baño. Adaptado de Branson Ultrasonics Corporation (2013).	78
Tabla 3-4. Especificaciones Agitador magnético con placa calefactora Boeco MSH 130, adaptada de BOECO Germany, (2024).	79
Tabla 3-5. Especificaciones técnicas del conductímetro de mesa Lab 945. Adaptado de SI Analytics (2016).	81
Tabla 3-6. Especificaciones técnicas del dispositivo PROOVE'it de 8 canales. Adaptado de Germann Instruments (2021).	82
Tabla 3-7. Especificaciones técnicas del dispositivo potencióstato/galvanostato/ZRA de la empresa Gamry Instruments referencia 600+. Adaptado de Gamry Instruments (2022).	84
Tabla 3-8. Especificaciones técnicas del equipo SHIMADZU tipo AG-X plus 250 kN / 300 kN. Adaptado de SHIMADZU (2014).	85
Tabla 3-9. Especificaciones del espectrómetro SPECORD 50 PLUS. Adaptado de Analytik Jena (2020).	87
Tabla 3-10. Dispositivos auxiliares.	88
Tabla 3-11. Especificaciones técnicas. (Argos, 2024).....	91
Tabla 3-12. Gradación normativa, porcentaje que pasa a través del tamiz para la Arena 20-30.	92
Tabla 3-13. Granulometría de la Arena sílice 20-30.	93
Tabla 3-14. Resultados de fluorescencia de rayos X (FRX).....	94
Tabla 3-15. Parámetros de los MWCNT reportado por el fabricante VOME Store.	96
Tabla 3-16. Propiedades físicas del acero Maxdur 304 - 304L. (Cía, 2024).	106
Tabla 3-17. Etapas del desarrollo experimental para los experimentos propuestos.	110
Tabla 3-18. Valores de adición de MWCNT reportados en la literatura.	119
Tabla 3-19. Masas de los distintos materiales del mortero para un volumen de 1 m ³ . ..	120

Tabla 3-20. Masas de los distintos materiales del mortero con masa constante de cemento de 300 g.	120
Tabla 3-21. Parámetros utilizados en los métodos de dispersión evaluados.	126
Tabla 3-22. Datos y cálculo de la fluidez.	129
Tabla 3-23. Cantidad de especímenes con electrodos embebidos ensayados.	140
Tabla 4-1. Parámetros de métodos de dispersión con temperatura antes y después del proceso.	146
Tabla 4-2. Valores de resistencia a partir de Diagramas de Nyquist en los distintos intervalos de tiempo.	148
Tabla 4-3. Valores de conductividad en los distintos intervalos de tiempo.	151
Tabla 4-4. Valores de fluidez.	167
Tabla 4-5. Resultados ensayos de compresión cubos (Mpa).	171
Tabla 4-6. Resultados ensayos de tensión (Mpa).	173
Tabla 4-7. Resultados ensayos de flexión (Mpa).	175
Tabla 4-8. Cuadro resumen de las frecuencias determinadas mediante los diagramas de Nyquist y Bode.	180
Tabla 4-9. Codificación para los especímenes, dependiendo de su forma y tipo de electrodo.	183
Tabla 4-10. Coeficientes de variación (COV) según forma del espécimen, adición de MWCNT y tipo de electrodo.	187

Introducción

El cemento es uno de los materiales más utilizados en el mundo, solo en Colombia en el periodo de agosto 2023 a julio de 2024, la producción de cemento gris fue de 13.78 millones de toneladas, lo que equivaldría a una producción per cápita de 267 kg/habitante (DANE, 2024). Dado que el cemento es el material más utilizado en la construcción de obras civiles, ha sido objeto de múltiples investigaciones y desarrollos. En este contexto, la aplicación de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y monitoreo de las estructuras de concreto es de gran importancia, por lo que en los últimos años se han investigado diversas herramientas para caracterizar su salud estructural. A partir de esto es posible detectar cualquier posible daño, permitiendo así su oportuna intervención (Masciotta et al., 2017).

Resulta de gran importancia el poder garantizar la seguridad y el comportamiento óptimo de las estructuras durante su vida útil, lo que se puede lograr mediante la supervisión de su resistencia y capacidad de servicio, permitiendo que las intervenciones sean en el momento adecuado, alargando su vida útil. Como alternativa a las estructuras convencionales, se han propuesto recientemente las estructuras inteligentes, que tienen la capacidad de proporcionar información sobre sí mismas o sobre las condiciones ambientales. Estas estructuras inteligentes cuentan con sensores capaces de monitorear deformación, cambios en las cargas, corrosión y hasta aceleraciones, ayudando a identificar oportunamente cualquier anomalía que perturbe su integridad (Das & Saha, 2018).

En la última década se han propuesto nuevas tendencias como es el uso de nanotubos de carbono (CNT, por sus siglas en ingles), los cuales son una de las nanotecnologías más prometedoras para la industria de la construcción debido a sus únicas propiedades mecánicas y eléctricas. Estos son considerados materiales multifuncionales o polivalenticos (Ferreira et al., 2016a). En particular, se ha demostrado que los CNT pueden mejorar significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales base cemento (Lopes et al., 2022). En este sentido, la intención de este trabajo fue estudiar

los efectos de la adición de CNT en morteros, evaluando la respuesta eléctrica ante cargas mecánicas y su efecto en la resistencia. Esto con la finalidad de evaluar su posible aplicación en el monitoreo estructural. Se llevó a cabo una serie de ensayos con el propósito de evaluar las propiedades mecánicas y en especial las eléctricas en morteros con diferentes concentraciones de CNT, así como también se implementó una metodología óptima para la realización de la mezcla. Además, se estudió la viabilidad de la producción de cementos con CNT y su potencial impacto en la industria de la construcción. Este trabajo contribuirá al avance de la tecnología de los materiales de construcción y a la promoción de la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Esta investigación pretende evaluar la respuesta mecánica de morteros con adición de nanotubos de carbono sometidos a cargas de tensión y compresión utilizando la resistencia eléctrica del material. Para lograr este objetivo, la investigación se estructuró en dos etapas fundamentales. La primera, denominada «etapa exploratoria», la cual aparte de fortalecer la recolección de investigaciones previas, se centró en experimentar con diferentes proporciones de CNT añadidos en la mezcla, así como la forma más adecuada de la utilización de los equipos de medición. Durante esta etapa, se examinó la respuesta eléctrica de los especímenes de mortero en estado de saturación y estado seco. Se llevaron a cabo ensayos de compresión en cubos de mortero y de tensión en especímenes tipo briqueta (forma de hueso), una metodología tradicional. El propósito era determinar el impacto de los CNT en las propiedades eléctricas del material, así como optimizar el uso de equipos de laboratorio como el potenciómetro. Adicionalmente, se realizaron análisis de composición e imagen de los CNT importados desde China. También se exploraron distintas metodologías de dispersión de CNT en el agua, para luego ser adicionados a la mezcla de mortero, en donde se utilizaron diversas herramientas para evaluar su dispersión en el agua.

La segunda etapa, denominada «etapa experimental», se basó en los hallazgos y conclusiones de la etapa exploratoria. En esta etapa, se definieron y llevaron a cabo ensayos definitivos con los porcentajes de adición de CNT identificados como más relevantes. Se enfocó especialmente en los ensayos de comportamiento mecánico de los especímenes, buscando evaluar cómo los CNT influían tanto en las propiedades eléctricas como en las mecánicas del mortero. Esta evaluación se realizó teniendo en cuenta los

requerimientos establecidos por las normativas colombianas, asegurando que los resultados fueran relevantes y aplicables en contextos normativos específicos. Igualmente se realizaron ensayos para evaluar el método de dispersión de los CNT en el agua para luego adicionarlos a la mezcla de mortero, en donde mediante análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), se pudo establecer una metodología cuantificativa para determinar la eficacia de los métodos de dispersión empleados, para lograr esto se diseñó un experimento que permitió determinar valores de resistencia eléctrica a partir de diagramas de Nyquist. Igualmente, se estudió el impacto en la manejabilidad de la mezcla pues la adición de CNT provocaba cambios significativos en las propiedades y el comportamiento del mortero en su estado fresco. Estos ensayos fueron cruciales para comprender cómo la incorporación de CNT afecta la consistencia y la trabajabilidad del mortero durante la etapa inicial de mezclado y aplicación.

La importancia de este trabajo es contar con un material multifuncional capaz de recolectar datos en tiempo real, donde cualquier perturbación mecánica brinda una ventaja clara al momento de decidir intervenciones y permite, sin desmontar nada cómo se comporta la estructura en su día a día. Lo novedoso no está en la inclusión de nanotubos de carbono, sino en utilizar una técnica de EIS para obtener datos de impedancia al momento de aplicar ciclos de tensión y compresión que no sobrepasaron el 40 % de la resistencia última, con el fin de mantener los especímenes dentro del rango elástico, sin deformaciones permanentes. Bajo ese criterio, se midió la impedancia y se la relacionó con la carga mediante regresiones polinómicas, de modo que cada dato eléctrico tuviese su espejo mecánico. El resultado, ofrece una mirada fresca sobre el monitoreo de salud estructural y deja listo un protocolo fácilmente transferible a escenarios reales.

1. Preliminares

Este capítulo de preliminares tiene como objetivo proporcionar una comprensión del contexto y alcance de la investigación. El capítulo comienza con el planteamiento del problema y la motivación para llevar a cabo esta investigación, así como también los objetivos que se pretenden lograr. Por último, se incluye una revisión del estado del arte para brindar el panorama general de los nanotubos de carbono como adición al concreto o mortero, mencionando sus principales propiedades, ya sea eléctricas o mecánicas, al igual que la importancia de la dispersión.

1.1 Planteamiento del problema

El control y monitoreo en estructuras es una necesidad importante para poder garantizar su uso y servicio. Esto ha conllevado al avance de técnicas para el monitoreo de las propiedades mecánicas de las estructuras, como lo son la invención de sensores que sean capaces de detectar daños efectivos (Das & Saha, 2018). Las mezclas de cemento y nanotubos dan como resultado un mecanismo de detección de esfuerzo que se fundamenta en detectar un cambio en la resistencia eléctrica del material (Siahkouhi et al., 2021). Estos sensores también pueden tener una durabilidad tan larga como la estructura, lo que resulta en aplicaciones a largo plazo (Ubertini et al., 2014).

El propósito de monitorear las estructuras una vez puestas en funcionamiento se confirma al ser el concreto su material principal, el cual es propenso a agrietarse debido a su fragilidad inherente, lo que deteriora su vida útil e incluso provoca desastres impredecibles (D. Lu et al., 2023). Por esta razón surge la pregunta: ¿Es posible el monitoreo de las propiedades mecánicas de la estructura, sin necesidad de técnicas destructivas a través de sensores internos de mortero con adición de CNT? La presente investigación tiene

como objetivos poder responder esta inquietud, a través de ensayos y enfocándose principalmente en la respuesta eléctrica ante cargas de compresión-tensión.

Justificación

Durante décadas se ha construido en todo el mundo con cemento, el cual es un material versátil, de gran resistencia y durabilidad, donde siempre se ha querido estudiar y monitorear su comportamiento, con el fin de que este sea satisfactorio y cumpla con ciertos requisitos mecánicos y químicos esperados. Lo anterior ha llevado al desafío de como medir en sitio sus propiedades en cualquier momento, ya que los métodos convencionales requieren tomar muestras y ser trasladadas al laboratorio, lo cual percute en tiempo y dinero, sin contar que dichas muestras deben ser tomadas intrusivamente en las estructuras.

Los nanotubos de carbono abren el camino para monitorear las propiedades mecánicas de las estructuras sin la necesidad de extraer muestras intrusivas y con la ventaja de tener los datos en sitio. Lo anterior es gracias a que los CNT como adición a la mezcla de cemento mejoran su conductividad eléctrica y permiten el monitoreo de parámetros físicos como la deformación, esfuerzo, carga, temperatura, desplazamiento y presión, permitiendo relacionar la respuesta eléctrica, en particular la resistividad, con los parámetros descritos anteriormente.

La utilización de CNT tiene una ventaja ante métodos de medición como galgas extensiométricas, las cuales son susceptibles a daños y su ubicación a veces llega a ser limitada ante el objeto en medición, al contrario de los compuestos con CNT que al ser una adición en el cemento puede proporcionar propiedades intrínsecas.

En particular, la presente investigación está focalizada en correlacionar la resistencia eléctrica con la respuesta mecánica de especímenes de mortero sometidos a cargas de compresión y tensión. Con el fin que compuestos multifuncionales de CNT puedan tener aplicaciones potenciales como sensores en infraestructuras nuevas, carreteras, ferrocarriles, puentes, pavimentos para aeropuertos, tuberías de concreto, entre otros.

1.2 Objetivos

Los siguientes son los objetivos de la presente investigación:

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta mecánica de morteros con adición de nanotubos de carbono sometidos a tensión y compresión utilizando la resistividad eléctrica del material.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y evaluar mecánicamente mezclas de mortero adicionadas con nanotubos de carbono.
- Evaluar la respuesta eléctrica de morteros adicionados con nanotubos de carbono.
- Establecer la relación entre las propiedades eléctricas y la respuesta mecánica de morteros sometidos a cargas de tensión y compresión.

1.3 Estructura del documento

La estructura del documento se compone de 5 capítulos que siguen un flujo lógico y coherente. Empezando por una visión general del tema de investigación y su relevancia. Posteriormente, una explicación de conceptos y fundamentos teóricos relevantes permitiendo así tener una base para sustentar y contextualizar el estudio. Luego, se realiza una descripción de la metodología desarrollada para los distintos procedimientos y técnicas implementadas, con el fin de ensayar, recopilar y analizar los datos necesarios para su posterior procesamiento. A raíz de lo expuesto se generan dos capítulos más, por un lado, el análisis de los datos obtenidos, donde se interpretan los resultados, y por otro, las conclusiones, que recogen los puntos clave y aportes de la investigación. A continuación, se explica cada uno de estos 5 capítulos.

Capítulo 1. Preliminares: en el primer capítulo de preliminares se justifica la investigación, en donde establecen los objetivos a cumplir, se plantea el problema y se revisa el estado del conocimiento, este capítulo es importante para contextualizar y ofrecer una visión general del trabajo.

Capítulo 2. Marco teórico: expone los fundamentos teóricos de los materiales utilizados como también los conceptos de las propiedades eléctricas necesarios para el entendimiento del fenómeno y medición. De igual manera, se describen los métodos de dispersión, fundamentales para la correcta distribución de las partículas en la mezcla. De lo anterior se construye la base fundamental de la investigación.

Capítulo 3. Metodología: detalla cómo se desarrolla la parte experimental de la investigación, abordando las distintas fases de la investigación, los métodos y ensayos normativos empleados. En este capítulo se especifican los dispositivos y materiales utilizados, incluyendo los tipos de electrodos, su proceso de fabricación, así como la elaboración de los especímenes de ensayo. Además, se presenta el diseño experimental aplicado tanto para la selección del método de dispersión, como para la medición del cambio de resistividad en especímenes sometidos a cargas mecánicas.

Capítulo 4. Análisis de resultados: el capítulo de análisis y discusión de resultados se compone de la interpretación detallada de los datos obtenidos durante la fase experimental, desarrollando la metodología y aplicando los diseños experimentales definidos. En este capítulo se analizan los resultados mecánicos y eléctricos de los morteros con diferentes porcentajes de adición de nanotubos de carbono, así como el comportamiento de los distintos tipos de electrodos utilizados. A través del análisis de gráficas, curvas de carga vs cambio fraccional de la resistencia y correlaciones polinómicas, se examina cómo la incorporación de nanotubos influye en la respuesta del material frente a cargas de compresión y tensión. Este análisis permite contrastar los resultados con los objetivos propuestos y evaluar la viabilidad del uso de estas mezclas como posibles sistemas de monitoreo estructural.

Capítulo 5. Conclusiones: presenta los principales hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación, dando respuesta a los objetivos generales y específicos planteados. En este capítulo se sintetizan los resultados más relevantes en cuanto al comportamiento mecánico y eléctrico de los morteros con adición de nanotubos de carbono, así como la efectividad de los diferentes tipos de electrodos utilizados. Además, se destaca la relación establecida entre la impedancia eléctrica y las cargas aplicadas, evidenciando el potencial del material como herramienta para la monitorización estructural. Finalmente, se exponen las implicaciones prácticas del estudio y se sugieren posibles líneas de investigación futuras.

1.4 Estado del conocimiento

La materia prima esencial para la construcción es el cemento, el cual ha sido el foco de extensas investigaciones y avances tecnológicos a lo largo de la historia. Con el tiempo, el cemento tradicional ha sido mejorado mediante la incorporación de aditivos como la ceniza volante, entre otros. Actualmente, la vanguardia de la investigación apunta hacia la integración de nanotubos de carbono en las mezclas de mortero, una innovadora propuesta con el potencial de revolucionar la industria de la construcción. La inclusión de estos nanomateriales ha evidenciado un fortalecimiento en las propiedades eléctricas del cemento, lo que abre la posibilidad de desarrollar sofisticados sensores capaces de supervisar el estado estructural de las construcciones de manera precisa.

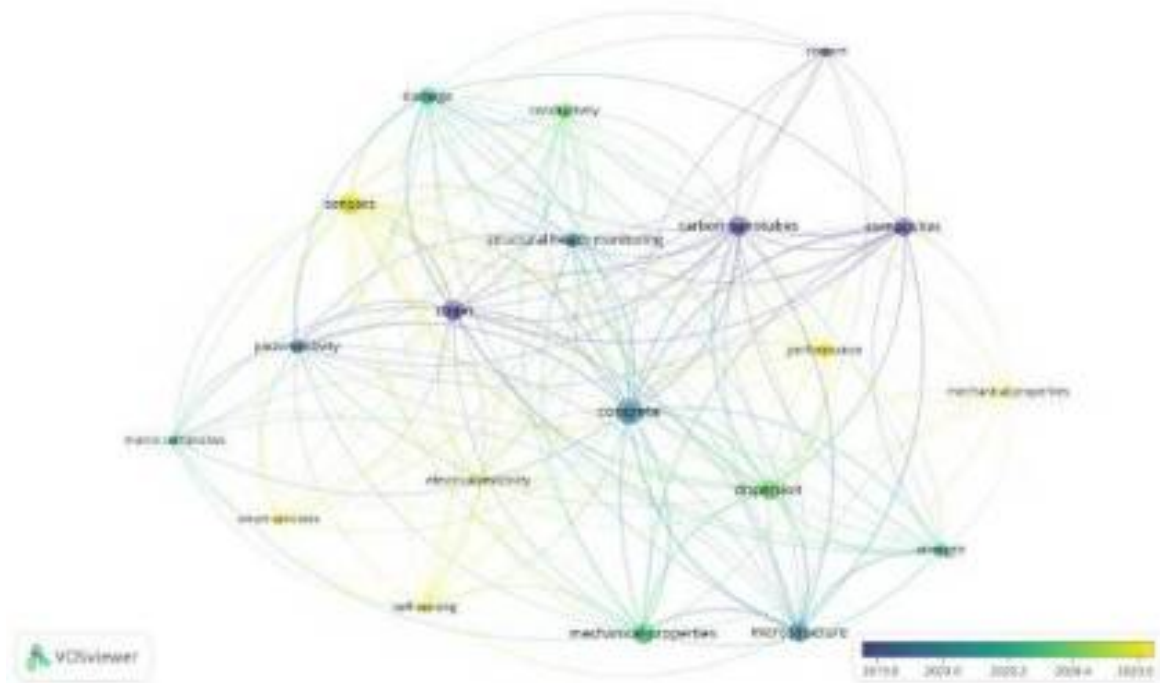
Para entender como ha venido evolucionando las investigaciones sobre nanotubos de carbono, una manera ilustrativa para asimilar las etapas de adopción y madurez de una tecnología innovadora es mediante el ciclo de Gartner (**Figura 1-1**). Este diagrama se compone de cinco fases fundamentales: el Disparador Tecnológico, donde se introduce la innovación y genera interés inicial; el Pico de Expectativas Exageradas, caracterizado por un optimismo desmedido y expectativas poco realistas; el Abismo de la Desilusión, donde las limitaciones tecnológicas y comerciales se hacen evidentes, disminuyendo el entusiasmo; la Pendiente de la Iluminación, cuando se identifican aplicaciones reales y se resuelven los retos técnicos; y finalmente, la Meseta de la Productividad, en la que la tecnología se adopta ampliamente con un impacto tangible y predecible. Para los CNT, el ciclo de Gartner muestra su progreso desde que S. Iijima los descubrió en 1991, pasando por su etapa de crecimiento entre los años 2000 y 2005, periodo en el que las expectativas iban entre su aplicación en electrónica avanzada hasta conceptos más innovadores como elevadores espaciales. Después, los CNT se toparon con obstáculos técnicos y comerciales, tales como el alto costo de producción y la complejidad de producción, lo que condujo al cese de operaciones como la de Bayer Material Science en 2013. Sin embargo, aplicaciones concretas, como la creación de materiales compuestos para uso en protectores por la NASA en 2011 y progresos en métodos de cultivo homogéneo en 2014, señalaron el comienzo del desarrollo tecnológico (Ramírez Arrieta, 2017). En la actualidad, los nanotubos de carbono están ganando terreno en áreas como materiales compuestos y almacenamiento de energía, evidenciando un progreso hacia la Meseta de Productividad.

Figura 1-1. Ciclo de Gartner para nanotubos de carbono.

Fuente: Adaptado de Rana & Fanguero, 2018.

Entendiendo en el punto en el que se encuentran los estudios de nanotubos de carbono se realizó una búsqueda de información para contextualizar y conocer los desarrollos realizados por múltiples investigadores. En la **Figura 1-2** se presenta un análisis de red que permite visualizar los conceptos más importantes que se tratan en las diferentes investigaciones de CNT como adición en el cemento. Se destaca que conceptos como sensores (*sensors*), desempeño (*performance*), propiedades mecánicas (*mechanical properties*), auto-sensores (*self-sensing*) y concreto inteligente (*smart concrete*), son definiciones exploradas más recientes y se encuentran en el auge de las investigaciones, esto significa que no solo se destaca la interdisciplinariedad del campo, sino que también refuerza la importancia de los nanotubos de carbono en el diseño de materiales avanzados para aplicaciones estructurales innovadoras.

Figura 1-2. Red Conceptual de investigaciones en nanotecnología y concreto.



Alrededor de los nanotubos de carbono hay múltiples investigaciones como la de Chaipanich et al., (2010) quienes estudiaron las propiedades mecánicas de cementos con adición de ceniza volante e inclusión de CNT, donde encontraron una mejoría en la resistencia en mezclas que contenían estos materiales. Los nanotubos debido a su tamaño actuaron como un relleno, haciendo así la matriz de la estructura más densa. Por otra parte, Batiston et al., (2021) determinaron que los CNT pueden mejorar la conductividad térmica en macizos de concreto.

Se ha observado que la adición de CNT a las mezclas de cemento mejora la resistencia a la flexión, compresión, deformación y porosidad. Como también se ha identificado la interacción interfacial de los nanotubos de carbono y las hidrataciones del cemento, como el gel C-S-H y el hidróxido de calcio. Esto conduce a una adhesión fuerte en la matriz de cemento. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en ingles) para examinar la mineralogía y la microestructura, y se descubrió que los nanotubos de carbono pueden unirse a grietas y huecos, lo que permite la transferencia de carga en situaciones de tracción (G. Y. Li et al., 2005). Cabe mencionar que la inclusión de

nanotubos tiene una influencia al momento de mitigar la reacción álcali-sílice, ya que la adición de nanotubos de carbono en morteros de cemento contribuye significativamente a mitigar los daños inducidos por la reacción álcali-sílice (RAS) mediante la restricción de la propagación de grietas, el refinamiento de la estructura de poros, y la reducción de la alcalinidad de la solución de poros. Estas acciones no solo disminuyen directamente los efectos destructivos de la RAS, sino que también mejoran las propiedades mecánicas del mortero, como la resistencia a la compresión y la flexión, así como los módulos de elasticidad estático y dinámico (Ramezani et al., 2022).

En diversos estudios se ha señalado que la introducción de nanotubos en el material en estado endurecido puede mejorar sus propiedades físicas en aspectos como su capacidad para resistir fuerzas de compresión y tensión, su durabilidad y la reducción de espacios vacíos en su estructura. El estado fresco es de igual importancia, por lo que Farias de Medeiros et al., (2015) variaron la concentración de CNT entre 0.1% al 0.5%, ya que con niveles más altos resulta que el compuesto sea demasiado consistente, lo que dificulta su moldeo y anula la mejora en la resistencia a la compresión. Además, los niveles menores o iguales al 0.3% de CNT son más adecuados para mantener la fluidez de la mezcla de cemento Portland.

Lo mencionado anteriormente se refiere a las características del cemento con CNT tanto en su estado fresco como endurecido. No obstante, se destaca que la principal ventaja de la incorporación de CNT es el incremento de la conductividad eléctrica en las mezclas. Según las mediciones experimentales de Sánchez-Romate et al., (2019) se estableció que la conductividad eléctrica de las muestras de cemento aumenta con la adición de nanotubos y óptima dispersión, esto se debe a que los CNT crean una red conductora dentro de la matriz, proporcionando «vías eléctricas». En el mismo sentido, el estudio realizado por Yoo et al., (2018) examinaron las propiedades eléctricas y piezorresistivas de compuestos de cemento con nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, por sus siglas en inglés), así como otros nanomateriales como grafeno y fibra de nano grafito. Los resultados revelaron que la inclusión de MWCNT mejoró la conductividad eléctrica de la pasta de cemento y redujo la resistividad en comparación con compuestos de mayor fluidez. Además, los compuestos de cemento con MWCNT demostraron un prometedor desempeño en la detección bajo fuerzas de compresión y tensión, con un factor de calibración superior a los extensómetros comerciales. En conclusión, los MWCNT potenciaron las propiedades eléctricas y piezorresistivas de los compuestos de cemento.

Se ha demostrado que los MWCNT son preferidos sobre los nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT, por sus siglas en inglés) para aplicaciones de monitoreo de la salud estructural debido a varias razones clave. Los MWCNT ofrecen una mejor conductividad y desempeño mecánico, además de un costo significativamente más bajo, lo que los hace más adecuados para la integración en compuestos de cemento destinados al monitoreo estructural. Aunque la investigación no establece una comparación directa en el contexto de la reacción álcali-sílice, resalta las ventajas de los MWCNT en términos de eficiencia de costos y propiedades físicas, lo que indirectamente sugiere su mayor utilidad en comparación con los SWCNT para mejorar las propiedades eléctricas y mecánicas del cemento en aplicaciones de monitoreo de la salud estructural (Siahkouhi et al., 2021).

De igual modo es relevante mencionar que el estudio realizado por Liu & Cheng, (2022) los cuales analizaron la influencia del tamaño de los nanotubos de carbono en las propiedades eléctricas del mortero de cemento, enfocándose en el cómo las variaciones en el diámetro de los nanotubos afectan la conductividad eléctrica. Los resultados revelaron que nanotubos de menor diámetro incrementan significativamente la conductividad eléctrica en la matriz de cemento, lo cual es crucial para aplicaciones en la monitorización de la salud estructural y en la fabricación de materiales inteligentes. Este hallazgo subraya la importancia de seleccionar adecuadamente el tamaño de los nanotubos para optimizar las propiedades eléctricas del mortero. De igual forma es importante contemplar el estudio realizado por Zhang et al., (2019) el cual se centró en el impacto del contenido de agua en las propiedades piezorresistivas de materiales cementosos con relleno compuesto de nanotubos de carbono y negro de nano carbono. Donde descubrieron que la disminución en el contenido de agua lleva a una reducción en los cambios fraccionales máximos de la resistividad eléctrica, así como en la sensibilidad a esfuerzos y la deformación. Esto sugiere que la reducción del contenido de agua afecta negativamente la sensibilidad de la propiedad piezorresistiva del material.

Considerando las propiedades mejoradas de las mezclas de cemento con CNT, es crucial enfatizar la importancia de una dispersión adecuada, tal como destacaron Silvestro & Jean Paul Gleize, (2020) en su análisis del impacto de los nanotubos en las propiedades mecánicas de los materiales a base de cemento. A pesar de las notables propiedades de los CNT, los desafíos en su dispersión y la interacción con la matriz de cemento son aspectos críticos que pueden influir en la efectividad de su incorporación en las mezclas

de cemento. La correcta dispersión de los CNT es esencial para optimizar su contribución y asegurar mejoras significativas en las propiedades mecánicas y eléctricas del cemento.

En este sentido, se han realizado varias investigaciones sobre la dispersión de los nanotubos, estudiando el efecto y manera más óptima de dispersarlos.

El desafío nace en dispersar materiales aglomerantes como los nanotubos o las fibras de carbono. Así lo estudiaron Allam et al., (2022), los cuales dispersaron fibras de carbono dentro del mortero. Este estudio evaluó la efectividad de varias secuencias e intensidades de mezcla, al medir la impedancia de corriente alterna. La eficiencia se evaluó utilizando volúmenes de fibra de carbono de 0.1 % y 0.5 %, que corresponden a los estados de percolación de las fibras en la zona de saturación (0.5 %) y cerca del umbral de percolación (0.1 %), respectivamente. Los resultados mostraron que la medición de impedancia de corriente alterna es una herramienta eficiente para evaluar la dispersión de fibras en el mortero. Se determinó que la adición de componentes siguiendo el protocolo de mezcla en seco con 3 minutos de mezcla lenta a una velocidad de 140 rpm resultó ser el más confiable en términos de impedancia final y homogeneidad del mortero. Además, se encontró que el aumento de la energía de mezcla no tuvo efectos positivos en la dispersión de las fibras de carbono en el mortero cementicio, lo que indica que el aumento de la energía de mezcla fue relativamente ineficaz para mejorar la dispersión de las fibras. Por otra parte, S. Li et al. (2021) evaluaron la efectividad de la dispersión de los nanotubos funcionalizados en solución acuosa, esto mediante espectroscopia de absorción UV-vis, donde mayores valores de absorbancia indican una mejor dispersión.

En relación con la dispersión de CNT en matrices de cemento, se reconoce que estos nanomateriales, por su amplia superficie específica, enfrentan dificultades de dispersión. La sonicación se presenta como una técnica eficaz para su dispersión. Sin embargo, es importante considerar que la sonicación intensa puede dañar los CNT, modificando su funcionamiento en pastas de cemento. Por ello, resulta esencial ajustar los parámetros de sonicación para maximizar la eficiencia de los CNT en las pastas de cemento. En un estudio realizado se establecieron rangos de energía de ultrasonido que van desde los 9000 a 500000 Joules, esto depende de la potencia del equipo, la amplitud y el tiempo de ultrasonido (De Siqueira & Gleize, 2020).

Por lo tanto, la realización de una sonicación adecuada es esencial para asegurar la dispersión óptima de los CNT en la matriz de cemento, el cual es un paso crucial para

mejorar significativamente sus propiedades mecánicas, tal como lo enfatiza Sobolkina et al., (2012); sin embargo, el proceso de utilizar ultrasonido implica una mayor laboriosidad y, por ende, un mayor coste. El uso de agentes químicos plastificantes ha sido tema de estudio, en donde investigadores como D'Alessandro et al., (2016) sugieren que las mezclas con nanotubos pueden ser efectivas sin sonicación. La investigación que realizaron destaca la importancia crucial del tipo y concentración del agente dispersante. Se ha identificado que el mejor dispersante logra una dispersión óptima de nanotubos en concentraciones bajas combinadas con sonicación, y también consigue una buena dispersión en concentraciones más altas sin sonicación, manteniendo suspensiones estables de CNT en agua, aunque con algunos agrupamientos locales.

En consecuencia, los métodos de dispersión han sido de gran estudio, así como lo abarcaron Marcondes & Medeiros, (2016) quienes realizaron una revisión exhaustiva de los métodos de dispersión la cual mostro un progreso en esta variable. Ellos llevaron a cabo un análisis jerárquico para evaluar y comparar doce métodos de dispersión diferentes. En el contexto del uso de nanotubos de carbono en concretos de cemento Portland, este análisis jerárquico permitió no solo identificar el método más eficaz, sino también comprender las variaciones en la eficiencia y aplicabilidad de cada técnica.

En el análisis de la impedancia, un parámetro eléctrico que muestra la resistencia general al flujo de corriente alterna, que abarca tanto la resistencia como la reactancia eléctrica, se pueden descubrir detalles importantes sobre la microestructura de los compuestos cementosos. Estas pruebas de impedancia no solo revelan detalles sobre la composición interna del material, sino que también proporcionan datos sobre sus características físicas y mecánicas, lo que proporciona una visión completa de su comportamiento y calidad en una variedad de aplicaciones. En la investigación de Almeida Junior & Martini, (2023) se analizó la influencia de las dimensiones de las muestras y los contactos eléctricos necesarios para obtener la impedancia eléctrica. En dicha investigación se fabricaron morteros de diferentes tamaños y se produjeron electrodos con diferentes cantidades de contactos eléctricos. Los resultados del estudio indican que la impedancia eléctrica en morteros cementicos está afectada por el factor geométrico y el número de contactos eléctricos de los electrodos. Los especímenes con un factor geométrico bajo tienden a una impedancia resistiva. Tanto las impedancias resistivas como capacitivas dependen de los valores de resistencia (R) y capacitancia (C), relacionados con las dimensiones

geométricas (área de electrodo y distancia entre ellos). Además, el número de contactos eléctricos, que representa el área de contacto efectiva, influye en la impedancia del sistema. Se constató también que el módulo de impedancia depende de las dimensiones físicas de los especímenes y del número de contactos eléctricos en los electrodos. Estos hallazgos son clave para la caracterización e interpretación de las mediciones de impedancia en compuestos cementicios. Teniendo presente lo descrito anteriormente, la impedancia del material con adición de CNT ha abierto un mundo de posibilidades de medición, tal como lo demuestran estudios como el de Kim et al., (2019), quienes identificaron como la adición de CNT a morteros de cemento Portland mejora significativamente las capacidades de medición de la impedancia durante los procesos de congelamiento y descongelamiento. En esta investigación, se utilizaron diagramas de Nyquist que facilitan la visualización y el análisis de las complejas respuestas de impedancia del material. Estos diagramas muestran la parte real de la impedancia frente a la imaginaria a diferentes frecuencias, lo que permite identificar los cambios en las propiedades eléctricas del mortero asociados con la formación y fusión de hielo en su estructura porosa.

También se destaca el estudio de uso de sensores de titanato zirconato de plomo (PZT, por sus siglas en inglés) para monitorear las propiedades mecánicas de los morteros de cemento durante el curado por saturación el cual se analiza en esta investigación. Donde fue detectado que a medida que avanzaba el curado, los picos de impedancia se desplazaban hacia frecuencias más altas, lo que indicaba un aumento en la rigidez y resistencia mecánica. Las capas internas y externas del mortero diferían en la hidratación, según una simulación numérica. Según el estudio, este método podría ser útil para monitorear diferentes técnicas de curado en investigaciones futuras (Taha et al., 2023). Sin embargo, se presta mayor atención a la eficacia de los sensores de cemento piezoeléctrico, que se producen mediante la incorporación de materiales piezoeléctricos en la matriz de cemento. Esta integración aumenta la sensibilidad a los cambios en la estructura interna del cemento, lo que le permite detectar variaciones de impedancia con mayor precisión que los sensores PZT. Esto resulta en una evaluación más precisa y no dañina de la calidad y durabilidad del cemento, lo que permite un monitoreo en tiempo real más eficiente (Pan & Huang, 2020).

La incorporación de materiales como negro de carbón, fibra de carbono, nanofibra de carbón, nanoplaca de grafeno, placa de grafito y nanotubos de carbono como adición en

el concreto mejoran significativamente las propiedades mecánicas y la capacidad de autodetección, lo que es fundamental para el monitoreo de la salud estructural. Teniendo en cuenta que los factores ambientales como la humedad y la temperatura afectan su sensibilidad, la concentración y dispersión efectiva de estos materiales son esenciales para optimizar su comportamiento. De los anteriores materiales los nanotubos se destacan no solo en el número de investigaciones si no en su gran desempeño para creación de sensores estructurales (Li et al., 2022).

Por lo anterior se ha estudiado la eficacia de los compuestos cementicos eléctricamente conductores, como las fibras de carbono y, en particular, los nanotubos de carbono, para detectar cargas de compresión. Se enfoca en cómo estos materiales pueden medir los cambios en la resistividad eléctrica provocados por fuerzas aplicadas, ofreciendo un método innovador para monitorear la integridad estructural en una variedad de aplicaciones.

En ese aspecto, Azhari & Banthia (2012) investigaron dos tipos diferentes de sensores basados en cemento. Uno tenía fibras de carbono, mientras que el otro era un híbrido con una mezcla de fibras y nanotubos de carbono. Para evaluar su eficacia en la medición de carga y tensión, compararon estos sensores con galgas extensiométricas convencionales. Los resultados mostraron que ambos sensores de cemento podían replicar con precisión los cambios en las condiciones aplicadas, aunque mostraron una respuesta no lineal influenciada por la velocidad de carga. El sensor híbrido, que combina fibras de carbono y nanotubos, demostró ser el más eficiente en términos de repetibilidad y confiabilidad en sus mediciones, destacando por su coherencia en diferentes tasas de carga. Estos hallazgos sugieren una aplicación prometedora de estos sensores en el monitoreo de estructuras y materiales en ingeniería civil.

Estudios adicionales han utilizado los CNT en forma de capa para monitorear la salud estructural de las reparaciones en materiales compuestos. Estos nanotubos de carbono se incorporan en películas adhesivas, que al aplicarse a reparaciones de plásticos reforzados con fibra de carbono permiten detectar variaciones en la resistencia eléctrica del adhesivo. Estos cambios muestran los esfuerzos mecánicos y la propagación de grietas, lo que convierte en estos adhesivos en una herramienta útil para monitorear la integridad estructural en tiempo real (Sánchez-Romate et al., 2021). De manera similar ocurre en cuanto a la formación de fisuras en compuestos con cemento, los nanotubos cambian la

conductividad eléctrica del compuesto, lo que los hace funcionar como sensores. Las grietas alteran la conductividad eléctrica al alterar la continuidad de los nanotubos. Esta variación en la conductividad se mide para determinar la presencia y el tamaño de las grietas, lo que permite una detección temprana y precisa de daños estructurales en el concreto (Lim et al., 2017).

Conforme a lo argumentado anteriormente, la utilización de sensores basados en CNT es una técnica avanzada para el monitoreo de estructuras que proporciona mediciones precisas y consistentes. Esta nueva tecnología permite un seguimiento minucioso y en tiempo real de la integridad estructural. Esto mejora significativamente la capacidad de detección y respuesta ante daños o fisuras potenciales.

También se probó la capacidad de los sensores para reflejar fielmente las características dinámicas del estímulo. Por ejemplo, el estudio de Materazzi et al. (2013) sobre los sensores basados en adición de CNT al cemento, demostró que son muy buenos para medir la deformación dinámica en estructuras hechas de concreto. Estos sensores se insertaron en especímenes prismáticos de cemento-CNT y experimentaron cargas y deformaciones sinusoidales. El estudio muestra que los sensores de cemento y nanotubos de carbono brindan una respuesta dinámica precisa, reflejando así las características del estímulo y brindando datos relevantes para el monitoreo de la salud estructural en ingeniería civil. Esta habilidad demuestra su amplio potencial para aplicaciones de monitoreo en estructuras de concreto. Adicionalmente, estos sensores pueden ser desarrollados con capacidad de transmisión inalámbrica, con el fin de monitorear infraestructuras ferroviarias de concreto. Este tipo de sensores fueron investigados por S. J. Lee et al. (2020), quienes diseñaron módulos de transmisión y recepción inalámbrica con la utilizaron nanotubos de carbono de pared múltiple como rellenos conductivos en el cemento. Los resultados demostraron que la respuesta y la tasa de pérdida de transmisión del sensor inalámbrico eran comparables a las de los sistemas con cable, y los sensores inalámbricos duraban hasta tres años y medio. Este sistema ofrece una alternativa efectiva para monitorear la integridad estructural del concreto en el entorno ferroviario de forma autónoma y en tiempo real.

2. Marco teórico

El marco teórico es un pilar clave para la investigación, ya que proporciona los fundamentos conceptuales y teóricos necesarios para contextualizar el presente trabajo. Este capítulo se centra en realizar una revisión de definiciones, teorías y métodos pertinentes para el desarrollo de la presente tesis, donde se definen los materiales principales utilizados como el cemento y nanotubos de carbono, así como la dispersión de los últimos, que es importante para mejorar la respuesta de los nanotubos en la mezcla. Se estudian además las propiedades eléctricas, al igual que las técnicas de medición. De la misma forma, se presentan los electrodos serigrafiados como alternativa de medición a los electrodos usados convencionalmente en la mayoría de las investigaciones.

2.1 Cemento hidráulico

El cemento hidráulico es un material en polvo, que, al ser mezclado con agua, forma una masa moldeable que fragua y desarrolla rápidamente resistencia. Este cemento puede dividirse en distintos tipos según la composición química y mineralógica obtenida durante el proceso de fabricación, especialmente en proceso de clinquerización; la norma ASTM C150 (*Standard Specification for Portland Cement*) define parámetros de evaluación que deben seguirse para esta clasificación. También existen normas nacionales como la NTC 121 (Especificación de desempeño para cemento hidráulico) donde se basa en atributos del cemento hidráulico que influyen en el desempeño del concreto como resistencia, durabilidad y calor de hidratación; estos cementos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Tipo UG: cemento hidráulico para construcción general, utilizado cuando no se necesitan características especiales.
- Tipo ART: cemento de Alta Resistencia Temprana.
- Tipo MRS: cemento de Moderada Resistencia a los Sulfatos.
- Tipo ARS: cemento de Alta Resistencia a los Sulfatos.

- Tipo MCH: cemento de Moderado Calor de Hidratación.
- Tipo BCH: cemento de Bajo Calor de Hidratación.

La producción del cemento inicia a partir de la calcinación de una mezcla de piedra caliza, arcilla, cuarzo y minerales de hierro a altas temperaturas, cercanas a los 1450 °C en un horno rotativo, lo que da como resultado grumos de Clinker, que al enfriarse entran a un proceso de molienda junto con una adición entre 3 % al 5 % de sulfato de calcio. Este último se encarga de controlar el tiempo de fraguado. En la base de la composición del Clinker se presentan 4 minerales principales como la Alita (Silicato tricálcico C_3S), Belita (Silicato bicálcico C_2S), Celita (Aluminato tricálcico C_3A) y Felita (Ferroaluminato tetracálcico C_4AF), donde las fases de Alita y Belita son las que mayor incidencia tienen en las propiedades de resistencia a corto y largo plazo. En complemento, la Celita es responsable de gran liberación de calor durante los primeros días de hidratación, contribuyendo a la resistencia temprana. Por otro parte, la Felita ayuda a reducir la temperatura de clinquerización durante la fabricación. En este escenario, en el cemento hidráulico moderno se pueden añadir materiales suplementarios en forma de adición, como cenizas volantes, escoria de alto horno o puzolanas entre otras que mejoran sus propiedades mecánicas, aumentan su durabilidad y contribuyen a la sostenibilidad del proceso al reducir las emisiones de dióxido de carbono asociadas con la producción de Clinker (Stutzman, 2012).

Mortero

El mortero es el resultado de la mezcla entre cemento, agregado fino (arena) y agua. Esta mezcla actúa en la construcción como adhesivo, asegurando la unión y estabilidad de las estructuras en las que se aplica, además ofrece una resistencia considerable. Para su aplicación se requiere una correcta dosificación y mezclado para garantizar que, al secar, adquiera la consistencia y solidez necesarias para soportar las cargas estructurales a las que estará expuesto. El mortero tiene una amplia gama de usos como en nivelación de pisos, recubrimientos de elementos estructurales, protección de taludes, pero el mayor consumo se presenta en la construcción de mampostería, esto lo convierte en un material versátil capaz de satisfacer una variedad de necesidades. El mortero se puede clasificar según composición, se encuentra el mortero de cemento Portland y de cemento de mampostería, la principal diferencia es el tipo de cemento ya que el mortero de mampostería el cemento

utilizado es Portalnd adicionado con ceniza volante, caliza y entre otros, este es el tipo de cemento que se comercializa actualmente en el país (Instituto del Concreto «Asocreto», 2000).

Existen varios tipos de mortero calificados por la norma NTC 3329 emitida por INCONTEC (2004) y es equivalente a la norma ASTM C270, se tipifican por su resistencia y uso, estos tipos de mortero se presentan en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1. Clasificación de tipos de mortero.

Tipo	Uso	Resistencia a compresión mínima a los 28 días (MPa)
M	Presenta la mayor resistencia, ideal para estructuras sometidas a cargas extremas.	17.2
S	Ofrece alta adherencia, usado en estructuras con cargas normales de compresión, muy útil en la colocación de enchapes.	12.4
N	Es un mortero multipropósito, su resistencia es media, adecuado para mampostería en general.	5.2
O	Su resistencia es la menor, usado en pañetes y como pega en paredes poco cargadas y de partición.	2.4

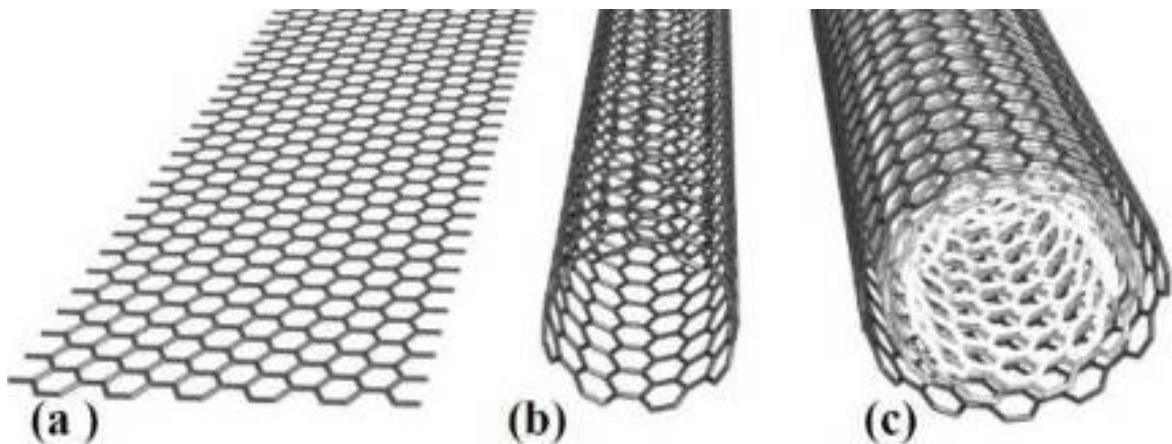
La norma sismorresistente de Colombia adiciona un tipo de mortero con mayor resistencia, el cual es el tipo H, con una resistencia mínima a la compresión de 22.5 MPa (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, 2010).

2.2 Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono son alótropos de carbono con forma cilíndrica y están compuestos por láminas de grafeno enrolladas sobre sí mismas (**Figura 2-1 (b) y (c)**). Este material presenta diámetros en el orden de nanómetros y longitud de micras. Destacan sus grandes propiedades eléctricas, dada su alta conductividad (Lariza et al., 2012). El descubrimiento de los CNT en 1991 por el científico Sumio Iijima fue un hito en la ciencia de los materiales. Utilizando un microscopio electrónico de alta resolución, Iijima observó estructuras tubulares únicas mientras realizaba estudios sobre materiales basados en carbono. Este hallazgo presentó grandes propiedades físicas y químicas de

los nanotubos, prometedoras para aplicaciones avanzadas en la industria (Sumio Iijima, 1991). Se distinguen dos tipos de nanotubos, el primero de pared simple (SWCNT, por sus siglas en inglés), los cuales están formados por una red hexagonal cilíndrica, que es equivalente a una lámina de grafito enrollada sobre si misma para formar un tubo. Sus extremos pueden estar cerrados por media esfera de fullereno o pueden estar abiertos. Los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, por sus siglas en inglés) tienen una estructura similar a varios SWCNT concéntricos con diferentes diámetros (Yesudhas Jayakumari et al., 2023). El hallazgo de Iijima en 1991 corresponde a los nanotubos de pared múltiple. Luego en 1993, en colaboración con Ichihashi, identificaron los nanotubos de pared simple, al introducir hierro en electrodos de carbono en un ambiente de metano y argón. Ambos descubrimientos revolucionaron el campo de los materiales a nano escala y marcaron una nueva era en los materiales (Burstein, 2003).

Figura 2-1. Esquema de una lámina de grafito (a) Nanotubos de pared simple (SWCNT) (b) y de pared múltiple (MWCNT) (c).



Fuente: Kreupl et al. 2004.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, existen dos tipos de nanotubos, de pared simple y múltiple. Sin embargo, los nanotubos de pared múltiple se destacan frente a los de pared simple, debido a que cuentan con mayor estabilidad y resistencias mecánicas, ya que al estar compuestos por varias capas concéntricas ofrecen una estructura más robusta, que proporciona una mayor resistencia mecánica en comparación a los de pared simple. En cuanto a la dispersión, los nanotubos de pared múltiple tienen una menor área superficial que reduce la probabilidad de aglomeración en comparación con los de pared simple, permitiendo una mejor distribución y así favorecer la conductividad. Por último, la

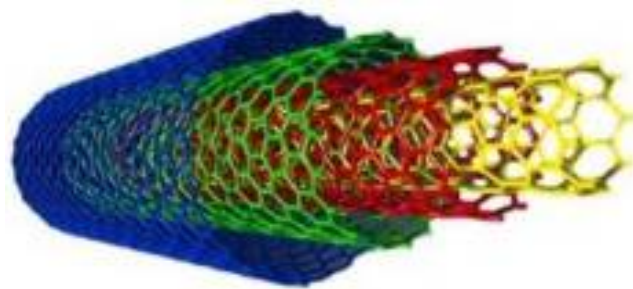
fabricación y costo comercial de los nanotubos de pared múltiple es más sencillo y económico, lo que los hace más accesibles para su uso en proyectos.

En resumen, los nanotubos de carbono de pared múltiple se resaltan por su mayor robustez, facilidad de dispersión y fabricación, convirtiéndolos así en la opción más utilizada para distintas aplicaciones como el diseño de sensores (Siahkouhi et al., 2021a; Vafaeva & Zegait, 2024).

Nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT)

Los MWCNT se caracterizan por ser estructuras cilíndricas compuestas por múltiples capas de grafeno (**Figura 2-1 (a)**) enrolladas de manera concéntrica (**Figura 2-2**), con un diámetro que varía entre 5 y 100 nanómetros y longitudes que pueden alcanzar hasta 50 micrómetros. Esta configuración específica les otorga una serie de atributos realmente destacables, entre los que se incluye una resistencia mecánica notablemente elevada (con una tensión máxima de hasta 150 GPa), un módulo de Young demasiado alto y una conductividad eléctrica de $10^2 - 10^7$ Siemens por centímetro (S/cm). La utilización de estas propiedades mejora algunos aspectos del concreto o mortero (Del & Camacho Ballesta, 2013; Siahkouhi et al., 2021).

Figura 2-2. Estructura de MWCNT.



Fuente: Sulochana et al. 2024.

Como ya se mencionó los nanotubos presentan diversas propiedades. En el ámbito eléctrico, destacan por su baja resistencia, resultado de la estructura electrónica del grafito, lo que minimiza la dispersión de electrones. Mecánicamente, presentan una alta rigidez y resistencia axial gracias a sus enlaces carbono-carbono tipo sp^2 que brindan gran resistencia. En cuanto a la conductividad térmica, tienen una conductividad que supera la del diamante. Adicionalmente, poseen características cinéticas que facilitan el

deslizamiento de nanotubos internos sin fricción, generando posibles usos en nanomáquinas. No obstante, su toxicidad es un tema que necesita más investigaciones, dado que podrían tener la capacidad de infiltrarse en las células y provocar reacciones negativas, parecidas a las fibras de asbesto (Siddique & Mehta, 2014). En la **Tabla 2-2** se resumen las propiedades más relevantes de los nanotubos de pared múltiple.

Tabla 2-2. Propiedades de MWCNT. (Cerro-Prada et al., 2021; D'Alessandro et al., 2016; Del & Camacho Ballesta, 2013; Siahkouhi et al., 2021).

Propiedad	Valores
Módulo de elasticidad (TPa)	0.3 – 1
Resistencia a la tensión (GPa)	10 – 150
Conductividad Eléctrica (S/cm)	Hasta 10^7
Conductividad térmica (W/mK)	> 3000
Resistividad ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	5 – 50
Diámetro externo (nm)	5 – 100
Longitud (μm)	0.5 – 15
Relación de Aspecto (L/D)	10 – 500
Área Superficial (m^2/g)	40 – 300
Densidad (g/mL a 25 °C)	1.6 – 2.1
Pureza (%)	> 90
Apariencia	Polvo Negro
Promedio de capas de grafeno	7 – 15

Se ha expuesto previamente que los nanotubos de carbono de pared múltiple presentan ventajas en las propiedades de resistencia mecánica y conductividad eléctrica como adición en mezclas de cemento, lo que los convierte en una opción preferida para mejorar las propiedades de materiales cementantes sobre los nanotubos de pared simple. Adicionalmente, la dispersión de los nanotubos de pared múltiple ha resultado más sencilla en comparación con los de pared simple.

Los MWCNT reportaron incrementos de hasta un 25.4% en resistencia a la compresión y 20.3% en resistencia a la flexión a los 28 y 90 días de curado, respectivamente. Esto debido a que actúan como puentes en la matriz de cemento, reduciendo la formación de microgrietas y aumentando la densidad estructural. Se destaca que la adición de 0.05%

de MWCNT puede mejorar significativamente la resistencia mecánica y reducir el coeficiente de difusión de cloruros en un 24%, lo que protege el refuerzo de acero de la corrosión. Los MWCNT también ayudan a disminuir la resistividad eléctrica, lo que beneficia aplicaciones en estructuras inteligentes. Sin embargo, su efectividad depende de una dispersión uniforme, un desafío debido a la aglomeración natural por interacciones de Van der Waals. Para superar esto, se utilizan técnicas como la sonicación y surfactantes, que permiten una distribución más homogénea. También se observa que dosis superiores al 0.03% pueden provocar problemas de aglomeración y reducir la eficiencia (Ebrahim & Kandasamy, 2023).

En cuanto a la durabilidad del concreto los MWCNT fortalecen la matriz y su microestructura. Debido a su resistencia y habilidad para unir microgrietas, evitan la difusión de micro fisuras y potencian la resistencia frente a la absorción de agua y la penetración de cloruros, disminuyendo la porosidad y fortaleciendo la cohesión interna. Esto resulta en un aumento de la resistencia ante elementos ambientales perjudiciales, tales como ciclos de congelación-descongelación y agresiones químicas. No obstante, es crucial tanto la correcta dispersión de los nanotubos como la cantidad de inclusión para maximizar estos beneficios (Carriço et al., 2018; L. Lu et al., 2016).

Los diámetros de los MWCNT presentan una especial relevancia en las propiedades de los materiales base cemento, siendo los de diámetro menor más efectivos. Gao et al. (2020) encontraron que los MWNCT con diámetros de 10 nm a 20 nm tienen una mejora en la resistencia a la compresión y una microestructura de la matriz potenciada, al rellenar mejor los poros y reducir la porosidad, lo que genera una matriz más densa y compacta. Por otro lado, los MWCNT de 40 a 60 nm no reducen la porosidad como los nanotubos de diámetro menor, lo que impacta las propiedades mecánicas y la microestructura de las muestras.

La baja resistencia eléctrica de los MWCNT se debe a su estructura unidimensional y la forma en que los átomos de carbono están dispuestos en una red hexagonal. La peculiar forma de los nanotubos, donde su pequeño diámetro y gran longitud permite que los electrones puedan moverse a lo largo del eje del nanotubo disminuyendo la dispersión de estos, lo que se traduce en una conductividad más eficiente (Siddique & Mehta, 2014). Adicionalmente, se encontró un aumento considerable de la conductividad eléctrica en nano fluidos con MWCNT en comparación de fluidos base, esto al variar concentraciones

de nanotubos del 0.05 a 1%, el incremento de la conductividad se debe a la capacidad de formar conexiones o contactos de túnel entre los nanotubos (Rudyak et al., 2024).

Fabricación de MWCNT

El estudio presentado por Ebrahim & Kandasamy (2023) detalla la fabricación de MWCNT mediante diversos métodos. La deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizada y consiste en la descomposición catalítica de gas de hidrocarburos en presencia de un catalizador metálico a altas temperaturas (550 °C a 750 °C). La descarga de arco, usada por primera vez en 1992, genera un arco eléctrico entre los electrodos de grafito en un gas inerte para formar MWCNT, aunque su aplicación a gran escala es limitada. La ablación láser, introducida en 1995, irradia un blanco de carbono con un láser en presencia de gases inertes, permitiendo un control preciso del tamaño y estructura. Finalmente, el método de catalizador flotante, popularizado por Sumio Iijima, utiliza un precursor de catalizador vaporizado junto con una fuente de carbono, facilitando el crecimiento de MWCNT mediante un catalizador. Estos métodos varían en su control sobre las propiedades y la producción a gran escala de los nanotubos.

La fabricación de MWCNT utilizando técnicas como la descarga por arco o CVD presenta limitaciones como el control de algunos parámetros, tal como la presión del gas en la cámara, la corriente del arco y la pureza del producto al tener partículas de grafeno y carbón amorfo, lo que hace necesario un proceso de purificación adicional. Este proceso implica temperaturas muy elevadas entre 3000 °C y 4000 °C que resulta en una alta demanda de combustible y energía. En la técnica CVD la principal desventaja para el crecimiento de MWCNT son las altas densidades de defectos en su estructura, estos defectos se pueden deber a la baja temperatura en el proceso (Pérez Urbano, 2006). Sin embargo, el crecimiento de nanotubos de carbono se puede optimizar mediante el uso de plasma, ya que puede inducir energía adicional para que se vean favorecidas las reacciones en la superficie lo que conlleva al crecimiento de películas (Alzate López, 2010).

2.3 Materiales compuestos multifuncionales

Un material compuesto se define como la combinación de dos o más materiales distintos, que al ser mezclados forman un producto con características específicas. Los materiales como mortero, pasta o concreto, en la actualidad por muchos ingenieros no son considerados como materiales compuestos, ya que en la práctica siempre se habla de materiales cementantes (pastas, mortero y concreto) en donde su principal característica es la resistencia mecánica.

Los materiales multifuncionales se distinguen por su habilidad para desempeñar diversas funciones en un único sistema, lo que los distingue de los materiales convencionales, que usualmente tienen un único objetivo, como brindar características estructurales, conducción eléctrica, aislamiento térmico, entre otros. La combinación de múltiples funciones en un único material o estructura posibilita incrementar la eficiencia y disminuir la cantidad de componentes en un sistema, lo que a su vez reduce la necesidad de operaciones de unión y reduce el peso y volumen total del producto. Un material como los MWCNT sobresalen por su variedad de propiedades, principalmente la elevada resistencia mecánica y conductividad eléctrica. Estos tipos de materiales que posibilitan la innovación en el monitoreo estructural facilitan la detección de grietas o cambios repentinos de carga, dado que un único material puede desempeñar múltiples funciones al mismo tiempo. La adaptabilidad de los materiales multifuncionales no solo fomenta un comportamiento superior del sistema, sino que también brinda una mayor capacidad de adaptación a aplicaciones concretas, gracias a las extensas mezclas posibles de materiales y las características derivadas que se pueden adquirir de estas (Ferreira et al., 2016b).

La combinación de mortero y nanotubos de carbono se considera como un material compuesto multifuncional, donde las propiedades que sobresalen dependen de la cantidad de nanotubos en la mezcla. Como el incremento de la conductividad eléctrica. Al incorporar MWCNT el mortero adquiere capacidades como la de autodetección, debido a sus propiedades piezoresistivas, facilitando identificar la variación de la carga mediante los cambios de la resistividad eléctrica. El aumento de la conductividad eléctrica se debe a que los nanotubos forman caminos conductivos en la matriz del mortero, esto hace posible el monitoreo continuo de la integridad estructural (Jung et al., 2022; Zhan et al., 2020).

Un material compuesto multifuncional se debe diseñar con el fin de integrar las propiedades principales de varios materiales creando así un producto final que sea capaz de cumplir con las características más eficientes requeridas, este es el caso del mortero que aporta una matriz solida con buena resistencia y los MWCNT que brindan una mejora en las propiedades eléctricas, especialmente en la mejora de la conductividad eléctrica. En la **Figura 2-3** se puede evidenciar en forma esquemática el concepto de un material compuesto multifuncional.

Figura 2-3. Esquema de Formación de Material Compuesto Multifuncional.



2.4 Métodos de dispersión de nanopartículas

Para entender el propósito de la dispersión de nanopartículas, en especial los nanotubos de carbono, primero se debe conocer el fenómeno de las fuerzas de Van der Waals, las cuales son interacciones atractivas de corto alcance, estas fuerzas causan que las superficies de los MWCNT se atraigan entre sí, promoviendo su aglomeración. La teoría EDLVO (extensión de la teoría DLVO) evidencia que la energía de interacción polar, significativamente mayor que la electrostática, domina en la aglomeración. Dispersar eficazmente los MWCNT requiere superar estas fuerzas mediante técnicas y agentes dispersantes, mejorando la estabilidad y evitando la formación de conglomerados (J. Zhang et al., 2020).

La aglomeración de nanotubos de carbono en dispersiones acuosas influye en el comportamiento en etapas tempranas en compuestos de cemento. Para mitigar la aglomeración de los MWCNT, se pueden emplear varias estrategias. Funcionalizar la superficie de los MWCNT con grupos químicos que mejoran sus propiedades hidrofílicas también puede mejorar la dispersión al aumentar la compatibilidad con medios acuosos. La sonicación, es un procedimiento que emplea energía ultrasónica para deshacer los

aglomerados y separar las estructuras individuales, constituye una técnica frecuentemente empleada para la dispersión efectiva de los MWCNT. Un método para mejorar la sonicación se basa en la aplicación de agentes dispersantes o surfactantes, tales como superplastificantes a base de policarboxilatos, dado que estos pueden contribuir a la preservación de su estabilidad al prevenir la reagrupación de las nanopartículas. No obstante, la eficacia de estos métodos podría verse restringida si el ambiente se torna progresivamente más saturado con Ca(OH)_2 , que se une a los grupos funcionales y debilita sus propiedades de mantenimiento de dispersión (Mendoza et al., 2014).

2.4.1 Dispersión por funcionalización

La funcionalización de los MWCNT, en particular con grupos carboxílicos, transforma su naturaleza hidrofóbica en hidrofílica, lo que mejora la estabilidad en medios acuosos. Este proceso de modificación no solo incrementa la dispersión, sino que también permite una mejor interacción con la matriz del cemento (Lariza et al., 2012).

La solubilidad en agua de los MWCNT se ve reducida, lo que dificulta su dispersión uniforme en la bachada de mortero. Para tratar este desafío, se han fabricado nanotubos funcionalizados. Arrechea et al. (2020) llevaron a cabo una investigación sobre el impacto de la incorporación de MWCNT, tanto en su estado básico como funcionalizados con grupos carboxílicos (MWCNT-COOH) y tiazol (MWCNT-Thiazol), en las propiedades de compresión de un material basado en cemento Portland. Se realizó la caracterización de las muestras empleando métodos como: análisis termogravimétrico, Espectroscopía Raman, Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier y X-Ray Diffraction (XRD), se evaluó su resistencia a la compresión con proporciones de MWCNT de 0.01%, 0.03% y 0.05% respectivamente. Los resultados revelaron que el incremento más notable en la resistencia a la compresión se consiguió mediante la integración del 0.01% de MWCNT, lo que aumentó la resistencia en un 5.26% en comparación con la muestra de control a los 7 días. Las conclusiones señalaron que la composición química y la carga de los nanotubos funcionalizados ejercían una influencia significativa en las propiedades mecánicas del cemento, y que los nanotubos funcionalizados mantenían una interacción distinta con el superplastificante y la matriz del cemento, influyendo en la hidratación y, consecuentemente, en la resistencia.

Por su parte Mansouri Sarvandani et al. (2021) analizaron cómo los nanotubos de carbono modificados con grupos carboxílicos afectan la resistencia y durabilidad de morteros. Probaron diferentes proporciones de MWCNT, desde un 0.05% hasta un 0.4% del peso del cemento. Las muestras fueron expuestas durante un período de hasta 960 días a condiciones ambientales con sulfato de sodio y magnesio combinados, así como en agua saturada con caliza, donde se evidenciaron mejoras en las pruebas de compresión, flexión y absorción capilar. La funcionalización de los MWCNT mejoró su dispersión en la matriz del cemento, al hacerlos más hidrofílicos, reduciendo las fuerzas de Van der Waals y facilitando su integración uniforme en la matriz del mortero. También se mejoraron las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros ya que actuaban como agentes de refuerzo al reducir la permeabilidad y aumentar la resistencia al ataque de sulfatos. Se puede concluir que las ventajas de esta funcionalización incluyen una mejor dispersión y mayor adherencia a la matriz, potenciando las propiedades mecánicas y de durabilidad; sin embargo, las desventajas incluyen posibles alteraciones estructurales de los nanotubos si se funcionalizan en exceso, así como un aumento en los costos y la complejidad del proceso.

2.4.2 Dispersión por ultrasonido

La dispersión de nanotubos de carbono mediante ultrasonido es una técnica muy común en especial el ultrasonido por sonda, que ha demostrado mayor eficiencia. Es importante dispersar los nanotubos para que estos se integren correctamente en las matrices de cemento. Este proceso implica la aplicación de ondas ultrasónicas que generan cavitación en el medio líquido, separando así las aglomeraciones de los nanotubos, logrando una dispersión más homogénea. Durante el proceso de dispersión por ultrasonido se debe tener precaución con la energía aplicada, ya que debe ser controlada, un nivel insuficiente de energía no logra una buena dispersión, mientras que una dispersión con exceso de energía puede dañar la estructura de los nanotubos, rompiéndolos y afectando su relación de diámetro longitud (Espinosa et al., 2017; Marcondes et al., 2015).

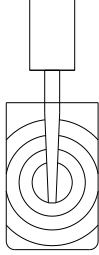
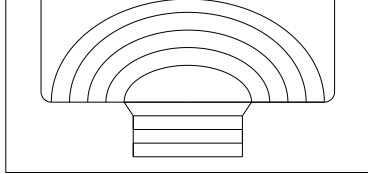
En términos de energía, la sonicación aplicada para dispersar los nanotubos puede ir desde niveles bajos hasta muy intensos, dependiendo de la concentración y las características del material de trabajo. Investigaciones han demostrado que energías de sonicación por debajo de ciertos umbrales pueden resultar ineficaces para separar los nanotubos de los aglomerados, lo que limita la mejora de las propiedades mecánicas y

eléctricas de la matriz de cemento (Jung et al., 2020; Marcondes & Medeiros, 2016). Por otro lado, energías extremadamente altas pueden inducir defectos en los nanotubos, como la creación de carbono amorfo o la reducción de su longitud, lo cual afecta su capacidad de refuerzo y conductividad. La selección de la energía adecuada es crucial, ya varios estudios han mostrado que una energía en el rango de 190 J/g a 440 J/g puede optimizar la dispersión sin comprometer la integridad de los nanotubos (Echeverry Cardona, 2020), Zou et al. (2015) identificaron una energía de dispersión óptima de 50 J/mL, Mendoza et al. (2013) aplicaron energías de hasta 170000 J.

Otra alternativa para aplicar ultrasonido es mediante equipos de baño ultrasónico, estos equipos generan ondas ultrasónicas que se propagan en un líquido (generalmente agua destilada) causando cavitación, rompiendo así las aglomeraciones de MWCNT. El baño ultrasónico suele ser menos eficiente porque las ondas no alcanzan a tener suficiente potencia para penetrar y separar eficientemente los aglomerados, lo que limita su capacidad para aplicar una alta concentración de energía en un área específica. Es por esta razón que la dispersión obtenida es menos homogénea y los MWCNT tienden a volver a aglomerarse más rápido, lo que reduce la calidad y estabilidad de la dispersión en comparación con el uso de una sonda ultrasónica, que proporciona una energía más focalizada y efectiva (Kanagaraj et al., 2024; Tugelbayev et al., 2023).

El baño de ultrasonido y el ultrasonido por sonda son capaces de introducir ultrasonido a un medio líquido, por lo cual se desarrollará el fenómeno de cavitación, donde las ondas crean ciclos de alta presión y baja presión, en los momentos de baja presión se crean burbujas de vacío las cuales en los ciclos de alta presión explotan, esto de manera alterna y mediante velocidades que dependerán de las frecuencias de los equipos. Entre estos dos métodos de ultrasonido sobresale la aplicación de ultrasonido por sonda, ya que se ha demostrado que es más eficiente y potente, de acuerdo con Asadi et al. (2019) los baños de ultrasonido generan una eficiencia de ultrasonido de 20 W/L a 40 W/L que resulta tener una distribución no tan uniforme, en cambio mediante una sonda de ultrasonido se puede tener hasta una eficiencia de 20000 W/L con una distribución mucho más uniforme, logrando así una dispersión más adecuada de nanopartículas. En la **Tabla 2-3** se presenta un resumen del comparativo entre el ultrasonido por baño y sonda.

Tabla 2-3. Comparación sonda y baño de ultrasonido.

Ultrasonido por sonda	Ultrasonido por baño
• Alta intensidad, hasta 20000 W/L • Cavitación concentrada	• Baja intensidad, aproximadamente 20 W/L a 40 W/L • Cavitación distribuida de forma incontrolada
	

2.4.3 Dispersión con surfactantes

Los surfactantes son sustancias químicas que actúan reduciendo la tensión superficial del agua, facilitando así la dispersión y estabilización de partículas en suspensión. El uso de surfactantes es importante para la dispersión de nanotubos en un medio acuoso, ya que las moléculas de surfactante se posicionan en la superficie de los nanotubos permitiendo que la parte hidrofílica del surfactante se oriente hacia la superficie de los nanotubos, mientras que la parte hidrofóbica queda expuesta al agua, creando una capa protectora en los nanotubos limitando a que se vuelvan a aglomerar. Este mecanismo hace posible que los MWCNT se mantengan dispersos uniformemente y se mezclen de una manera más homogénea en la matriz cementante (Echeverry Cardona, 2020; Mendoza Reales, Arias Jaramillo, et al., 2018).

Rodríguez et al. (2017) utilizaron tres tipos de surfactantes: SDS (aniónico), CPC (catiónico) y Triton X-100 (anfotérico), donde evaluaron el efecto de los MWCNT dispersos con surfactantes en pasta de cementos. Las conclusiones a que llegaron fue una disminución de las propiedades de la matriz de cemento, este efecto negativo se debió por un aumento de la porosidad causado por los surfactantes. Igualmente Mendoza Reales, Ocampo, et al. (2018) revisaron la influencia de los surfactantes como agentes dispersantes de los MWCNT en una matriz cementante, donde del mismo modo identificaron una reducción de las propiedades mecánicas de los especímenes ensayos a tensión y compresión con la presencia de surfactantes. En ambos estudios la metodología

de dispersión utilizó ultrasonido de sonda en conjunto a la adición de surfactantes en el momento de la dispersión.

En resumen, aunque los surfactantes ayudan a mejorar la dispersión de los nanotubos en el agua, al momento de analizar su influencia en matrices de cemento las propiedades se ven directamente afectadas.

Existe otra alternativa al uso de surfactantes, es el caso de los superplastificantes usados en la industria del concreto, que ayudan a estabilizar la dispersión de nanotubos de carbono al disminuir las fuerzas de atracción entre las partículas. Sin embargo, en presencia de Ca(OH)_2 se observaron aglomeraciones significativas (Mendoza Reales, 2013). El uso de superplastificantes PCE (Éter de policarboxilato) es muy utilizado junto con ultrasonido en la dispersión de los nanotubos para evitar la aglomeración debido a las fuerzas de Van der Waals, aunque los superplastificantes pueden tener un impacto negativo en la conductividad, a causa de su interacción superficial. Los superplastificantes pueden adherirse en la superficie de los nanotubos formando capas aislantes que podrían reducir la transferencia eléctrica entre nanotubos (Adhikary et al., 2021; Karpova et al., 2021).

2.5 Medición eléctrica de materiales compuestos multifuncionales

Los materiales cementantes con adición de MWCNT como ya se mencionó anteriormente son considerados materiales compuestos multifuncionales, donde una de las principales características por analizar son las propiedades eléctricas, ya que estos materiales tienen la capacidad de actuar como sensores. Las mediciones de la conductividad eléctrica permiten obtener datos de auto detención en tiempo real lo cual permite identificar deformaciones o daños por cambios en las condiciones estructurales (Hong et al., 2022).

Los sensores basados en cemento y nanotubos permiten medir características eléctricas de un material tales como la resistividad, conductividad y cambio de resistencia bajo carga (piezoresistividad). Estas características eléctricas dependen de la concentración y correcta dispersión de los MWCNT en la matriz cementante. Rao & Sasmal (2020) observaron que cuando el material está bajo cargas estáticas o dinámicas, los nanotubos dentro del material compuesto forman o alteran caminos conductivos, lo que resulta en

cambios medibles en la resistencia eléctrica. Este comportamiento es importante para las aplicaciones en monitoreo estructural, ya que convierte las fuerzas mecánicas en señales eléctricas.

Es importante mantener un control cuidadoso sobre las mediciones eléctricas de materiales compuestos multifuncionales, como por ejemplo usar un sistema de recolección de datos que permita medir de manera precisa la corriente y voltaje en los electrodos incrustados en el material. Esto es relevante porque al registrar los datos, mediante la ley de Ohm se puede calcular la resistencia eléctrica del material en diferentes condiciones (Castaneda-Saldarriaga et al., 2019).

2.5.1 Métodos de medición

La medición de las propiedades eléctricas de compuestos multifuncionales se basa en metodologías innovadoras que abarcan principios eléctricos y mecánicos para poder estudiar el comportamiento del material bajo condiciones particulares. Es importante contar con equipos que sean capaces de medir impedancia en corriente alterna o resistencia en corriente directa con configuraciones de electrodos de dos o cuatro puntos, lo que ha evidenciado su eficacia en la evaluación de la sensibilidad eléctrica de estos materiales. Esta metodología facilita la identificación de variaciones en las propiedades internas del material, estableciendo así los cimientos para su implementación en áreas como el monitoreo estructural y los sensores inteligentes.

Se debe tener en cuenta distintas variables con el fin de obtener una correcta medición; el material de los electrodos que es más comúnmente usado son los alambres de cobre, placas de cobre, mallas de acero inoxidable o electrodos de cobre cubiertos de pasta de plata, lo que se busca es que tengan una buena conductividad y que sean estables. La disposición de los electrodos puede ser de dos electrodos, uno enfrentado a otro o de cuatro electrodos. La medición se puede realizar en corriente directa que mide la resistencia eléctrica de los compuestos, corriente alterna que mide la impedancia del compuesto o métodos más sensibles como la espectroscopia de impedancia con corriente alterna. Por último los dispositivos de medición son importantes ya que mediante estos se realiza la adquisición de datos, es usual utilizar equipos LCR (inductancia, capacitancia y resistencia) que miden inductancia capacitancia y resistencia, sistemas de datos (DAQ) los cuales registran señales eléctricas y las convierten en datos digitales procesables,

multímetros de alta precisión o dispositivos de medición de espectroscopia de impedancia AC (D'Alessandro et al., 2016; Siahkouhi et al., 2021; Yoo, You, & Lee, 2018).

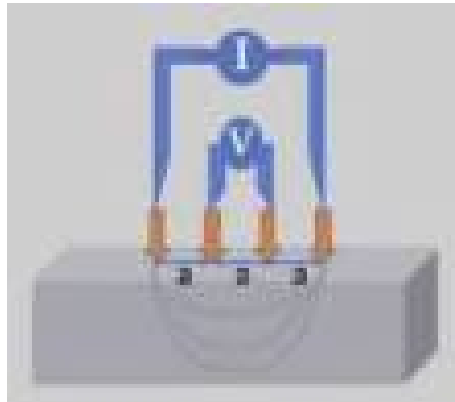
La configuración de los electrodos tiene gran relevancia en el momento de medir las propiedades eléctricas de los compuestos multifuncionales. Almeida Junior & Martini (2023) destacan que las propiedades eléctricas dependen de la configuración de los electrodos, las dimensiones y geometría de los especímenes de ensayo. El número de contactos eléctricos influye en la respuesta resistiva y capacitiva del compuesto. Aumentar el área de contacto de los electrodos reduce la dispersión del campo eléctrico, mejorando así la sensibilidad de las mediciones. Estos autores llegaron a la conclusión que es importante tener control sobre el área efectiva de contacto de los electrodos en los compuestos, de igual manera el tamaño de los especímenes y separación de los electros tiene una repercusión en las mediciones de impedancia eléctrica de los especímenes cementicos, a medida que aumenta la distancia entre los electrodos la resistencia del sistema se incrementa. Llegaron a la conclusión que lo ideal era tener especímenes con un factor geométrico de menos de 20 ($\text{Factor Geométrico} = A/d$), donde el factor geométrico está definido como la relación entre el área efectiva del electrodo (A) y la distancia de los electrodos (d).

En la configuración de los electrodos destacan dos formas, la primera corresponde a cuatro electrodos que es similar al método Wenner y la segunda configuración es de dos electrodos, ambas configuraciones son ampliamente utilizadas en distintas investigaciones.

La configuración de cuatro electrodos se resume en la utilización de dos electrodos que se ubican a los extremos encargados de aplicar corriente constante y los dos electrodos internos miden la diferencia de potencial inducido. El proceso de medición se describe de la siguiente manera: primero la una corriente eléctrica se introduce al material a través de los electrodos externos, esta corriente crea un campo eléctrico en el material, lo que genera una diferencia de potencial entre los electrodos internos, estos electrodos internos no transportan corriente solo detectan el potencial eléctrico, eliminado así las caídas de tensión asociadas con la resistencia de contacto en los electrodos exteriores (Liu & Cheng, 2022; Yoo, You, Youn, et al., 2018). En la **Figura 2-4** se muestra el esquema de una configuración de cuatro electrodos (o cuatro puntas) en un espécimen prismático, utilizado

para medir la resistividad eléctrica, donde se proporciona la corriente (I) a través de los electrodos externos, mientras los internos miden la diferencia de potencial (V), con una separación uniforme (a). Se observa también en la figura como serían las líneas de flujo de corriente.

Figura 2-4. Esquema de la Configuración de Cuatro Puntas para Medición de Resistividad Eléctrica.



Fuente: Cerro-Prada et al., 2021.

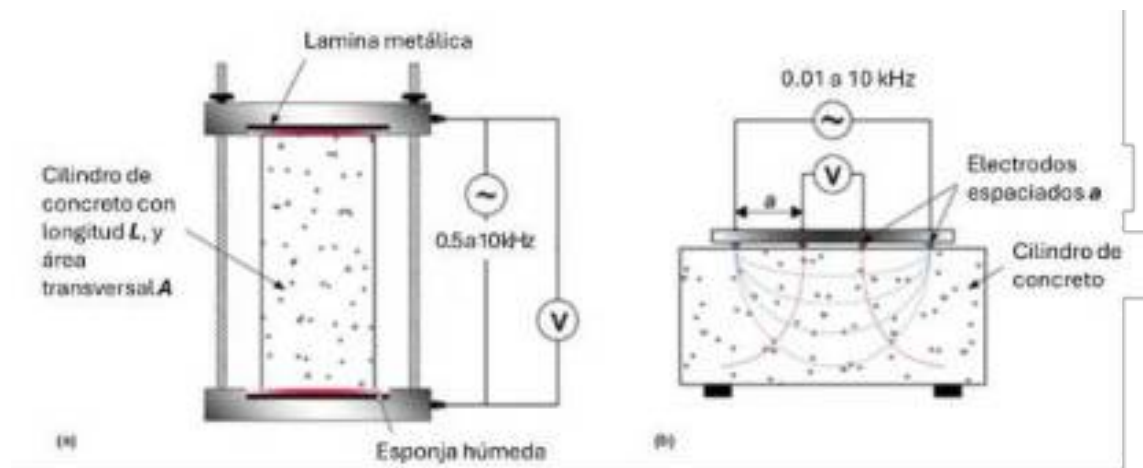
La medición en el montaje de cuatro electrodos fue ampliamente investigada por varios científicos en particular Wenner, quien desarrolló el uso de una disposición lineal de cuatro electrodos para medir la resistividad eléctrica, conocida actualmente como el método Wenner. Este método usa una sonda con cuatro electrodos dispuestos de manera equidistantes, donde los dos exteriores son aplicados con corriente y los dos interiores encargados de medir el potencial eléctrico generado (Morris et al., 1996). Esta metodología ampliamente usada está estandarizada como en la norma AASHTO TP 95-14 *Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* la cual determina la resistividad superficial del concreto.

En cuanto a la configuración de dos electrodos es usada para medir la resistividad eléctrica global del concreto. Esta configuración coloca entre los dos electrodos el espécimen a analizar, se aplica corriente y luego se mide el potencial. Normalmente se utiliza una esponja húmeda con el propósito de que el contacto entre los electrodos y el espécimen sea más efectivo, esto es útil cuando los electrodos no son embebidos. En la normativa ASTM se aplica la configuración de dos electrodos para determinar la resistividad eléctrica del concreto, como en el caso de la norma ASTM C1876 (anteriormente ASTM C1760), esta norma utiliza dos electrodos en los extremos del espécimen para aplicar un campo

eléctrico en toda la muestra, asegurando que la corriente fluya a través de todo el espécimen permitiendo una medición representativa de las propiedades del material, el método está diseñado para evaluar la resistividad o conductividad eléctrica del concreto, con el fin de proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de fluidos e iones agresivos disueltos.

Los métodos de dos electrodos (uniaxial), como los de cuatro electrodos (método de Wenner) son útiles para medir la resistividad eléctrica del concreto, ya que ambos evalúan la misma propiedad intrínseca del material. Se destaca el método uniaxial porque su medición y configuración es más sencillo. La **Figura 2-5** ilustra los dos métodos mencionados anteriormente donde en el método de dos electrodos se utiliza un cilindro de concreto con longitud (L) y área transversal (A), colocado entre dos placas metálicas paralelas con una esponja húmeda cada una, esto con el fin de mejorar el contacto del electrodo y el espécimen. Por el otro, lado se muestra el método de cuatro electrodos o puntos (método Wenner) el cual consiste en cuatro electrodos alineados sobre la superficie de concreto, espaciados uniformemente (Layssi & Alizadeh, 2015).

Figura 2-5. Técnicas de medición de la resistividad eléctrica: (a) método uniaxial de dos puntos y (b) método de cuatro puntos (Wenner).

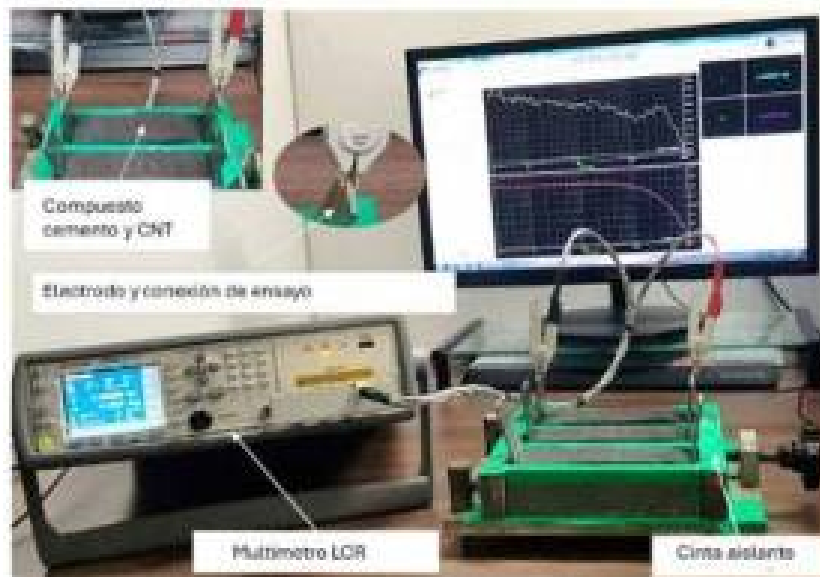


Fuente: adaptación de Layssi & Alizadeh, 2015.

El arreglo de los dos electrodos puede ser embebido o dispuesto en los extremos del espécimen, Tafesse et al. (2021) estudiaron la relación entre la fluidez y las propiedades eléctricas de compuestos base cemento con adición de nanotubos de carbono, la metodología para medir la resistividad eléctrica fue mediante dos electrodos ubicados en

los extremos del espécimen, el material de los electrodos era de acero inoxidable. El proceso del ensayo consistía en aplicar una corriente alterna y medir de la resistencia utilizando un multímetro LCR, como se muestra en la **Figura 2-6**. La configuración de los dos electrodos permitió evaluar la conectividad eléctrica dentro del compuesto, incluyendo el efecto de las resistencias de contacto.

Figura 2-6. Configuración experimental para la medición de la resistencia de AC.



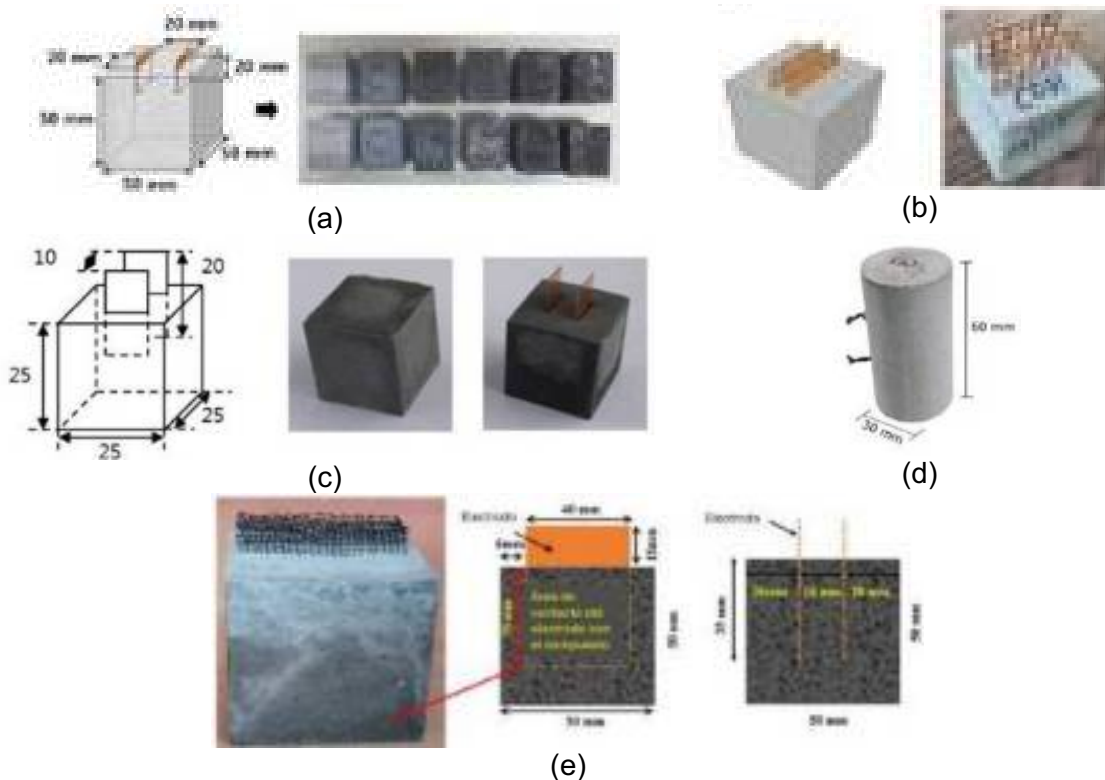
Fuente: adaptación de Tafesse et al., 2021.

Tener los electrodos en los extremos del espécimen genera una resistencia adicional denominada resistencia de contacto, la cual es la oposición del flujo de corriente eléctrica entre dos materiales en contacto, tal como ocurre entre el electrodo y el espécimen de ensayo, por lo cual en muchos casos se recomienda disminuir esta resistencia de contacto colocando esponjas húmedas entre los dos materiales. Una forma para disminuir la resistencia de contacto es embebiendo los electrodos en los especímenes de ensayo, ya que al estar en contacto permanente y homogéneo con el espécimen se elimina irregularidades o puntos de desconexión que podrían influir en la medición, también los electrodos embebidos permiten realizar mediciones contantes durante cargas cíclicas, esto genera mayor estabilidad y durabilidad (Jung et al., 2020; Rao & Sasmal, 2022).

En la **Figura 2-7** se observa distintos especímenes de ensayo desarrollados por diferentes autores con la configuración de electrodos embebidos, donde la medición con dos electrodos se basa en la aplicación de corriente (altera o continua) a través del material,

utilizando los electrodos como puros de contacto. Este sistema permite medir las propiedades eléctricas de los materiales compuestos multifuncionales.

Figura 2-7. Especímenes con electrodos embebidos por distintos autores.



Fuente: (a) Jung et al., 2020, (b) Rao & Sasmal, 2022, (c) Park et al., 2018, (d) Triana-Camacho et al., 2022, (e) Rao & Sasmal, 2020.

Ahora bien, en cuanto a la metodología de medición se pueden encontrar muchas alternativas, destacando la electromecánica de impedancia (EMI, por sus siglas en inglés) o la espectroscopia de impedancia, las cuales son técnicas versátiles para investigar y estudiar las propiedades eléctricas de materiales compuestos multifuncionales.

La técnica EMI es usada para el monitoreo en el desarrollo de propiedades mecánicas en morteros. Es un método no destructivo que es capaz de detectar daños en los materiales estructurales mediante la interacción entre señales eléctricas y vibraciones mecánicas. El método se basa en el uso de materiales piezoeléctricos, los cuales son aquellos que generan un campo eléctrico cuando se les aplica una deformación mecánica, estos vibran mecánicamente al tener una carga eléctrica, convirtiendo a los sensores en actuadores y

receptores simultáneos. Al medir la impedancia en un rango de frecuencias se obtiene una característica del estado mecánico del material, pudiendo así detectar daños en el compuesto. Los sensores pueden estar hechos de plomo circonato titanato (PZT) o materiales inteligentes como cemento con nanotubos de carbono (Taha et al., 2023). El funcionamiento radica en cuando se aplica un campo eléctrico a un sensor piezoeléctrico embebido en un espécimen de ensayo, este vibra produciendo ondas mecánicas que interactúan con las propiedades físicas del material. Estas interacciones alteran la respuesta eléctrica del sensor, específicamente la impedancia, la cual, al medir en un rango de frecuencias, obteniendo un panorama de las del estado mecánico del espécimen (Pan & Huang, 2020).

Por otro lado, se encuentra la técnica EIS utilizada para estudiar las propiedades eléctricas de los materiales, al analizar su respuesta a un estímulo eléctrico de corriente alterna. La técnica EIS se destaca por ser un método más sensible al medir propiedades eléctricas de los materiales y poder aplicar frecuencias específicas que maximicen las mediciones de impedancia.

2.5.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica EIS

La técnica de medición de la espectroscopia de impedancia ha incrementado su uso en los últimos años por su amplia variedad de información que se puede obtener. Esta técnica experimental es capaz de medir la capacidad de un material o sistema a una señal de corriente alterna aplicada, en donde se puede variar su frecuencia. La EIS se utiliza para analizar propiedades eléctricas en compuestos multifuncionales como la impedancia y capacitancia. Para entender mejor el funcionamiento de la técnica EIS primero es importante tener claro las propiedades eléctricas que se analizan y sus aplicaciones.

Propiedades eléctricas

Las propiedades eléctricas como la impedancia y capacitancia describen como los materiales responden al aplicar un flujo de corriente eléctrica, esta corriente eléctrica puede ser alterna o continua, para efectos de la presente investigación se aplicó corriente alterna. A continuación, se explican de manera simple los términos impedancia y capacitancia:

- **Impedancia (Z)**

La impedancia es un concepto de resistencia en circuitos eléctricos de corriente alterna y representa la oposición al flujo de la corriente. En un circuito de corriente continua la ley de Ohm establece que la resistencia (R) es una relación entre voltaje (V) y la corriente (I), esta relación se representa mediante la ecuación (2.1).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Sin embargo, en el caso de circuitos de corriente alterna, se debe tener en cuenta elementos como inductores y capacitores que generan efectos denominados reactancias. La reactancia puede ser de dos tipos: reactancia inductiva X_L la cual está relacionada con la oposición que causa un inductor al paso de la corriente alterna, y la reactancia capacitiva X_C que esta relaciona con la oposición a la corriente alterna causada por un condensador, la reactancia total (X) es la suma de los dos tipos de reactancias. Por lo tanto, la impedancia es la combinación de la resistencia (R) y reactancia (X) en un circuito de corriente alterna, donde la parte real (R) representa la resistencia y la parte imaginaria (jX) representa la capacitancia. La medición de la impedancia es en ohmios (Ω) y varia en función de la frecuencia de la señal eléctrica aplicada al circuito (Fiore, 2024).

$$Z = R + jX \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) se representa la impedancia en términos de reactancia y resistencia. Es importante destacar que la impedancia depende también de la frecuencia en la señal aplicada, expresada en Hertz (Hz).

Una equivalencia con la ley de Ohm con respecto a la impedancia se puede representar en la ecuación (2.3).

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

La impedancia resulta útil para determinar la capacidad de un material de resistir el flujo de una corriente eléctrica. La cuantificación de la impedancia se puede realizar mediante el uso de electrodos al aplicar una corriente alterna y la medición del

voltaje. Factores como la relación agua/cemento, la uniformidad del material y la solución de poros influyen en la medición. Poder medir la impedancia en el concreto es clave para aplicaciones como el monitoreo estructural, detección de grietas o desarrollo de sensores inteligentes, especialmente en concretos con adición de MWCNT que mejoran la conductividad del material (Wansom et al., 2006).

- **Capacitancia (C)**

La capacitancia es una propiedad eléctrica que mide su capacidad de almacenar carga eléctrica cuando se aplica un voltaje, generalmente un condensador cumple esta función. La ecuación (2.4) que describe esta propiedad.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.4)$$

Donde:

C es la capacitancia

Q es la carga almacenada

V es el voltaje aplicado

Esta propiedad permite que los condensadores regulen el flujo de corriente en circuitos de corriente alterna, la medida de la capacitancia es en faradios (F). Recordando los tipos de reactancia, la reactancia capacitiva es la oposición al flujo de corriente que presenta un condensador. Este fenómeno es causado por el almacenamiento y liberación de energía en el campo eléctrico del condensador, su valor depende de la frecuencia de la señal y de la capacitancia del condensador, ecuación (2.5) (Fiore, 2024).

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.5)$$

En donde:

X_c es la reactancia capacitiva (Ω)

f es la frecuencia de la corriente alterna (Hz)

C es la capacitancia (F)

En resumen, la impedancia, en un circuito de corriente alterna, la magnitud de la impedancia total (Z) de un componente que tiene resistencia (R) y capacitancia (C) en serie se puede calcular usando la ecuación (2.6):

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{wC}\right)^2} \quad (2.6)$$

Donde:

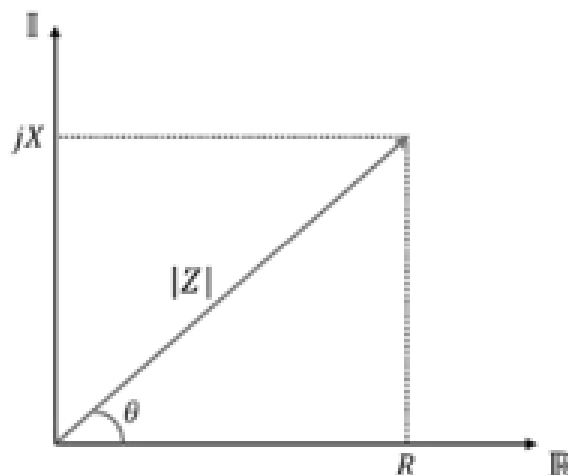
w es la frecuencia angular de la corriente alterna $w = 2\pi f$

La capacitancia está relacionada con las propiedades del concreto en ciertas aplicaciones. En el contexto del concreto, la capacitancia puede estar relacionada con la capacidad de almacenar y liberar energía eléctrica, lo que puede ser relevante en aplicaciones como el monitoreo del concreto. Chung & Ozturk (2024) demostraron la capacidad de sensor del concreto basada en la capacitancia, enfocándose en como esta varía bajo esfuerzos de compresión aplicados. Se identificó que la capacitancia disminuye de manera reversible y monotónica con el aumento del esfuerzo. Por otra parte, Han et al. (2022) desarrollaron un sensor capacitivo para detectar barras de refuerzo en concreto, en este caso la capacitancia cambia en función de la presencia de refuerzos debido a diferencias en las constantes dieléctricas entre el concreto y acero. Donde se pudo observar el aumento de la capacitancia al acercarse a una barra de refuerzo, permitiendo determinar su posición, diámetro y el espesor de la cubierta de concreto.

Una vez expuesto ciertas propiedades eléctricas se puede definir y entender la EIS como una técnica no destructiva que permite la caracterización de las propiedades eléctricas de materiales mediante la medición de la impedancia en función de la frecuencia de una corriente alterna aplicada. En el caso de materiales multifuncionales, la EIS es útil para evaluar microestructuras internas, porosidad, detectar fisuras o la posibilidad de monitorear procesos de autocuración en el concreto. Entre sus principales beneficios la EIS permite una sensibilidad a detectar cambios microestructurales y la capacidad de ofrecer información sin dañar los especímenes de cemento adicionados con nanotubos, lo que la hace ideal para aplicaciones en el monitoreo estructural y estudios de autodetección (Wang et al., 2019).

El funcionamiento de la EIS se basa en la aplicación de una señal de corriente alterna a un espécimen y medir la respuesta eléctrica, esto variando la frecuencia. Esta técnica analiza como el material se opone al flujo de corriente en función de su microestructura y las propiedades de transporte de iones en su interior. El principio básico que sigue la técnica de EIS es aplicar una pequeña señal de voltaje al espécimen de estudio y medir la corriente resultante. A partir de esto se calcula la impedancia, que es una medida compleja de la oposición al flujo de corriente, en donde la impedancia real es representada por la resistencia (R) y la impedancia imaginaria es relacionada con la reactancia (X), que depende de la frecuencia y refleja fenómenos de almacenamiento de energía en campos magnéticos o eléctricos (como capacitores o inductores). La **Figura 2-8** representa en el plano complejo la impedancia, en donde (θ) es el ángulo de fase. La respuesta se representa típicamente en gráficas de Nyquist (parte real vs parte imaginaria de la impedancia) o diagramas de Bode (magnitud de la impedancia vs frecuencias). Durante el ensayo de EIS, la corriente alterna interactúa con diferentes componentes del material y en presencia de agentes conductores disminuye la resistencia, causando así un aumento en las conductividad.

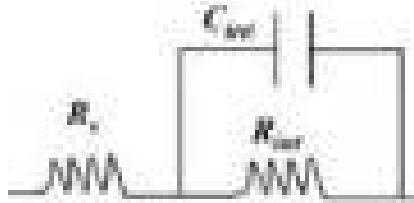
Figura 2-8. Representación en el plano complejo de la impedancia.



La respuesta eléctrica del material puede representarse mediante circuitos equivalentes formados por resistencias, capacitores y elementos de difusión, que simulan fenómenos como la conducción iónica y el almacenamiento de carga en la microestructura (Fan et al., 2018; Ren et al., 2020). En la **Figura 2-9** se muestra un ejemplo de circuito equivalente aplicado a este tipo de materiales. En la presente investigación, debido a los de objetivos propuestos y alcance, no se desarrollaron modelos de circuitos equivalentes; sin embargo,

los datos de los diagramas de Nyquist obtenidos permiten plantearlos y ajustarlos para describir el comportamiento eléctrico de la matriz.

Figura 2-9. Circuito equivalente simplificado para pasta de cemento en hidratación.



Fuente: (Zhu et al., 2017)

Peñaranda Sanjuán (2022) usó la EIS para monitorear los cambios eléctricos que ocurren durante la hidratación del cemento, a medida que el cemento se hidrata, la resistividad eléctrica cambia debido al desarrollo de los productos de hidratación, como el gel C-S-H y la Pórtlandita, que alteran la microestructura y distribución de poros. Estos cambios se pudieron reflejar en medidas de impedancia, permitiendo identificar etapas clave del proceso de hidratación y correlacionarlos con propiedades térmicas. Para medir la resistividad eléctrica en las pastas de cemento este trabajo utilizó electrodos serigrafiados con base de polipropileno (**Figura 2-10**). Estos electrodos fueron empleados como una alternativa de bajo costo y fácil implementación a los métodos tradicionales, con el fin de monitorear los cambios fisicoquímicos en las mezclas en edades tempranas y tardías.

Figura 2-10. Montaje de ensayos de resistividad eléctrica para electrodos serigrafiados.



Fuente: Peñaranda Sanjuán, 2022.

2.5.3 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica (ρ) se define como una propiedad intrínseca de los materiales compuestos, con ella se puede medir la capacidad del material para resistir el flujo de corriente eléctrica (el inverso de la resistividad es la conductividad). La resistividad eléctrica en compuestos de cemento depende de la formación de una red conductora homogénea dentro de la matriz cementante, esta red se logra mediante agentes conductores como los MWCNT o fibras de carbono, los cuales interactúan para mejorar la conectividad entre partículas conductoras. La resistividad se analiza como un inductor clave de las propiedades eléctricas del material y se mide mediante el método de dos puntas, transformando la resistencia medida en resistividad usando una relación matemática que considera las dimensiones geométricas del material, ecuación (Park et al., 2018). La resistividad eléctrica se define mediante la ecuación (2.7).

$$\rho = R \cdot k \quad (2.7)$$

Donde:

ρ es la resistividad eléctrica ($\Omega \cdot cm$)

R es la resistencia eléctrica medida (Ω)

k es el factor geométrico, para geometría de placas paralelas $k = \frac{A}{L}$

A es el área de la sección transversal (cm^2)

L es la longitud del material entre los dos puntos de medición (cm)

La resistividad eléctrica del concreto se describe como la capacidad inherente del material para resistir el movimiento de iones cuando se aplica un campo eléctrico. Está directamente relacionado con la microestructura del concreto, como el tamaño y la conectividad de poros, y también de factores externos como el de contenido de agua y la composición de la solución de poros. El contenido de agua resulta ser un factor importante ya que puede cambiar de un concreto aislante (concreto seco) o un concreto conductor (concreto saturado). La resistividad es utilizada para evaluar la durabilidad del concreto, especialmente en términos de su resistencia a la penetración de cloruros (Layssi & Alizadeh, 2015).

En materiales compuestos multifuncionales, como concretos con adición de MWNCT, la resistividad eléctrica no solo permite evaluar la propiedades de durabilidad del material,

sino también sienta bases para explorar su respuesta ante estímulos externos. Este comportamiento evoluciona cuando se introduce la piezoresistividad, una propiedad que habilita la detección de deformaciones mecánicas a través de cambios en la resistividad eléctrica (Parvaneh & Khiabani, 2019).

- **Piezoresistividad**

La piezoresistividad se define como el cambio de la resistividad eléctrica de un material en respuesta a deformaciones mecánicas. El fenómeno que se produce en la piezoresistividad se basa en la creación de una red conductora formada por nanomateriales como los MWCNT, nano fibras de grafito y óxido de grafeno, estos materiales permiten que la resistividad eléctrica cambie bajo deformaciones mecánicas. Cuando el material se ve sometido a un esfuerzo como el de compresión, las partículas conductoras se acercan, aumentando la conectividad eléctrica y reduciendo la resistividad. Bajo tensión las partículas se separan, lo que incrementa la resistividad (Layssi & Alizadeh, 2015).

Piro et al. (2023) estudiaron como la adición de escoria de acero mejora las propiedades piezoresistivas y mecánicas del cemento. Los ensayos mostraron que un 15% de escoria de acero aumenta la piezoresistividad en un 71% y proporciona una buena correlación entre los cambios en resistividad eléctrica y los esfuerzos mecánicos. Para este estudio se usaron métodos de medición de resistividad de dos y cuatro puntas. Por otra parte, Azhari & Banthia (2012) desarrollaron sensores cementicios incorporando fibras y nanotubos de carbono para detectar deformaciones mediante cambios de la resistividad eléctrica. Los sensores híbridos (fibras y nanotubos) mostraron repetibilidad y sensibilidad bajo cargas cíclicas, donde se destacó su capacidad para monitorear esfuerzos estructurales con alta fidelidad.

Un factor mencionado anteriormente que afecta en gran medida las medidas de piezoresistividad en los materiales compuestos es el contenido de agua en la matriz, ya que a un mayor contenido de agua disminuye la resistividad eléctrica, esto se debe a que el agua actúa como conductor iónico, facilitando el flujo de la corriente. Este fenómeno ocurre porque los iones del agua en el concreto asumen la conductividad del material, reduciendo la sensibilidad de los cambios en la resistividad asociados a cargas mecánicas. Además, la redistribución del agua dentro

de la matriz cementante durante cargas repetidas puede alterar la conectividad de los nanotubos, afectando la respuesta piezoresistiva y limitando su reproducibilidad (Yu et al., 2024).

En cuanto al tipo de corriente a usar, Coppola et al. (2013) estudiaron como las corrientes alternas y directa afectan la piezoresistividad en compuestos cementicios con adición de MWCNT. Coppola encontró que se prefiere la corriente alterna sobre la directa para medir la piezoresistividad debido a su capacidad para reducir los efectos de la polarización iónica y electroquímica en la matriz del compuesto, los cuales pueden distorsionar las mediciones con corriente directa. La corriente directa tiende a generar un fenómeno de migración iónica que forma un campo eléctrico opuesto al aplicado, alterando las mediciones de resistividad. En cambio, la corriente alterna minimiza estos efectos al cambiar la polaridad rápidamente, lo que permite tener mediciones más precisas y estables de las propiedades piezoresistivas bajo deformaciones mecánicas.

- **Cambio Fraccional en la Resistencia FCR**

Para evaluar las propiedades piezoresistivas de los sensores basados en concreto se mide el cambio fraccional en la resistencia (FCR, por sus siglas en ingles), esta es una medida para describir como cambia la resistencia eléctrica de una material cuando está sometido a esfuerzos mecánicos, en comparación con la resistencia inicial (Dong et al., 2021).

La ecuación (2.8) muestra la definición de FCR en términos de resistividad, en donde: ρ_0 representa la resistividad inicial del material antes de aplicarle una carga, deformación o cualquier perturbación externa y, ρ es la resistividad medida después de aplicarle una carga o experimentar una deformación. En los materiales piezoresistivos cuando se aplica una carga de compresión o tensión, la resistividad eléctrica cambia debido a la alteración en la red conductora del material, como la separación o unión de caminos conductivos por efectos de las cargas. Un FCR positivo indica un aumento en la resistividad debido a tensiones que interrumpen la red conductora, en cambio un FCR negativo señala un comportamiento más conductor por alguna carga de compresión en donde se acortan o se unen caminos conductores (Yin et al., 2020).

$$FCR = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (2.8)$$

Si se reemplaza la ecuación (2.7) en la ecuación (2.8), se puede cancelar el factor geométrico, con ello se expresa el FCR en términos de resistencia eléctrica (R), ecuación (2.9).

$$FCR = \frac{R \cdot k - R_0 \cdot k}{R_0 \cdot k} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (2.9)$$

Donde:

R_0 es la resistencia eléctrica inicial (Ω)

El FCR se ha utilizado como una herramienta para evaluar y monitorear el comportamiento piezoresistivo de materiales compuestos multifuncionales. L. Wang & Aslani (2023) utilizaron el FCR para monitorear daños por flexión en vigas de concreto reforzado, reflejando cambios de esfuerzos mediante sensores impresos en 3D. Mientras S. H. Lee et al. (2018) usaron el FCR para analizar el efecto híbrido de fibras de acero y nanotubos de carbono en concreto de ultra alto desempeño, correlacionando los cambios en resistividad con el comportamiento en tracción, incluyendo la detección de tensiones, lo que facilitó la evaluación de microfisuras y la simulación de curvas de esfuerzo-deformación. Por último, Yu et al. (2024) monitorearon la permeabilidad al agua de compuestos a base de cemento, empleando los cambio del FCR para evaluar la progresión de la humedad, identificar el nivel de penetración del agua y proporcionar advertencias tempranas sobre posibles daños por corrosión en estructuras sumergidas o expuestas a ambientes acuáticos.

2.5.4 Diagrama de Nyquist

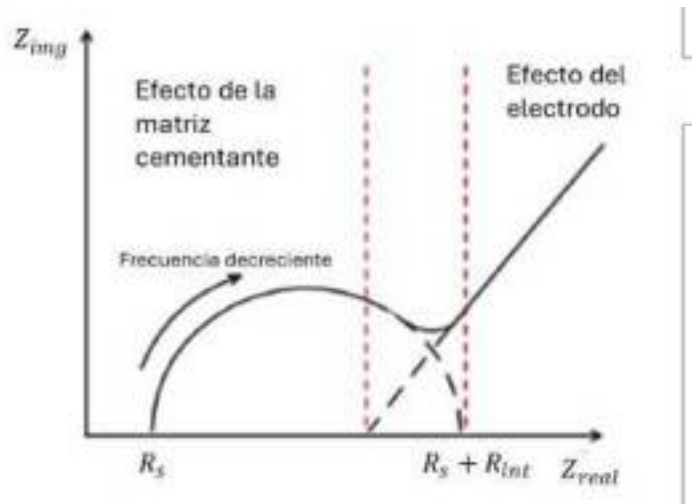
El diagrama de Nyquist también conocido como gráfico de impedancia compleja es una representación gráfica útil para analizar la respuesta de la impedancia eléctrica. Esta gráfica muestra la parte imaginaria frente la parte real de la impedancia, medidas en múltiple frecuencias. El diagrama de Nyquist es una herramienta clave para la caracterización de materiales compuestos, en donde se puede interpretar fenómenos como la conducción, polarización, formación de redes de conectividad, efectos de agentes dispersantes y comportamiento bajo diferentes condiciones ambientales. Su aplicación permite evaluar la

microestructura, el transporte de carga, la estabilidad eléctrica y las interacciones químicas en los materiales compuestos (Triana-Camacho et al., 2022; Wansom et al., 2006).

La **Figura 2-11** muestra el diagrama de Nyquist, en donde en el eje X se representa la impedancia real (resistencia) y en el eje Y se representa la impedancia imaginaria (reactancia). Se evidencia un semicírculo seguido por una línea inclinada, cada una representando diferentes fenómenos eléctricos en el materiales. El semicírculo está asociado con procesos de polarización y transferencia de carga, típicos en la matriz del material. Su forma y tamaño reflejan propiedades como la resistencia de la matriz y la capacitancia interfacial, indicando cómo las partículas o fases dentro del material almacenan y transfieren carga. La línea inclinada que aparece en las frecuencias más bajas representa el comportamiento de difusión Warburg, la cual relaciona la interacción del material con los electrodos. Los puntos clave a analizar es la resistencia R_s , que es la representación la red porosa del cemento parcialmente hidratado, con iones inmovilizados en las capas del gel de C-S-H, cuando está saturado la muestra, el agua líquida llena los poros del cemento, lo que resulta en un sistema con baja resistencia R_s .

La resistencia de la interfaz solido-liquido (R_{int}), es la resistencia asociada a la transferencia de carga en la frontera entre las partículas solidadas del cemento y la solución líquida (Zhu et al., 2017). En una matriz de cemento con adición de nanotubos la resistencia de interfaz adquiere un papel central debido a la interacción de los MWCNT, la matriz de cemento y el agua presente en los poros, su valor dependerá en gran medida de la dispersión y conectividad de los nanotubos en la matriz, una deficiente dispersión o aglomeraciones incrementaran la R_{int} . Por último, la zona entre las líneas rojas en el diagrama de Nyquist representa la transición entre el efecto de la matriz cementante (bulk) y el efecto del electrodo (Huang et al., 2023; Triana-Camacho et al., 2022).

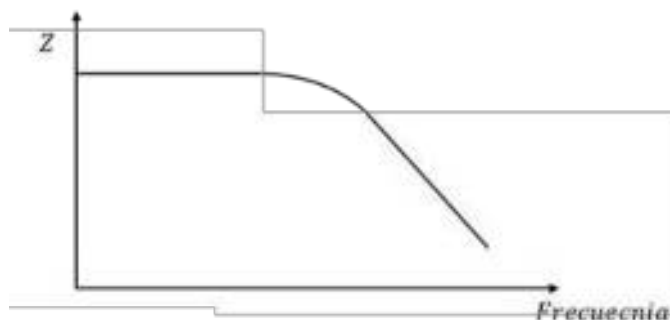
Figura 2-11. Diagrama de Nyquist.



Fuente: Adaptación de Zhu et al. 2017.

Complementario al diagrama de Nyquist se presenta el diagrama de Bode (**Figura 2-12**), el cual es una representación gráfica que muestra como varía la impedancia (Z) en función de diferentes frecuencias. Ambos gráficos, el de Nyquist y el de Bode derivan de los mismos datos de impedancia medidos en el sistema, muestras el diagrama de Nyquist es útil para identificar procesos globales, como resistencia de transferencia de carga o difusión, el diagrama de Bode facilita el análisis de estos procesos en términos de su respuesta a la frecuencia (Ramírez Arrieta, 2017).

Figura 2-12. Diagrama de Bode.



Fuente: Adaptación de Ramírez Arrieta, 2017.

3. Metodología

Con el fin de alcanzar el objetivo general y los objetivos específicos establecidos en el presente documento, la metodología utilizada se divide en cinco fases. La primera fase corresponde a actividades preliminares, en la cual se recolecta toda la información base para poder contextualizar el problema y es guía para establecer una ruta de seguimiento de los ensayos; las dos fases siguientes corresponden al diseño de mezclas y posteriores ensayos, estas fases pretenden dar cumplimiento a los dos primeros objetivos específicos; la cuarta fase, correspondiente al procesamiento de datos, que pretende establecer la correlación de las mediciones eléctricas de los ensayos con las condiciones de carga a las cuales fueron sometidos los especímenes; por último en la quinta fase, se establece la realización del documento final y artículos.

Actividades Preliminares (Fase 1): esta fase resulta de gran relevancia porque permite la recopilación, la selección y la evaluación de información ya existente relacionada con el tema de estudio. La revisión de las investigaciones y estudios publicados proporciona una base sólida para fundamentar teóricamente esta investigación y colocarla en el contexto adecuado. La importancia de esta revisión tiene como fin el comprender investigaciones anteriores y evitar la duplicación de esfuerzos, permitiendo identificar el nivel actual de conocimiento en el tema de estudio, además, ofrece una visión general completa de los muchos puntos de vista, ideas, procedimientos y resultados relacionados con el tema, lo que ayuda en la articulación exacta de los objetivos y preguntas de la investigación.

De lo anteriormente mencionado, la recopilación de información y datos en el uso de nanotubos en mezclas es el primer paso para estudiar, con el objetivo de identificar el proceso y los avances que se han desarrollado a nivel nacional e internacional. Se evidencia que la primera problemática a resolver es la forma de dispersión de los nanotubos para el diseño de mezclas. En este sentido, la compilación de información sobre métodos de dispersión es una parte muy importante para poder enfocar los métodos y que las mezclas sean las más óptimas, teniendo en cuenta las condiciones del laboratorio, en especial los

instrumentos de ultrasonido como los dispositivos para determinar la dispersión. En este trabajo se pretende explorar otras alternativas y ponerlas a discusión. Seguidamente se debe proceder con un análisis del tipo de respuesta que se pretende analizar, esto quiere decir que como la propiedad a determinar es el cambio de la resistencia eléctrica en los especímenes, más precisamente la medición de impedancia eléctrica. La recopilación de datos sobre las mediciones de impedancia y como se relaciona con las propiedades mecánicas de los especímenes de ensayo se debe comprender en primera medida para así poder realizar los ensayos de una manera más clara y concisa. Con esto en claro se elaboraron especímenes preliminares y ensayos exploratorios.

En esta fase se destaca el proceso y discusión del lugar de donde adquirir los nanotubos de carbono, pues resulta importante evaluar la calidad y procedencia del producto, su costo y la facilidad de abastecimiento.

Diseño de mezcla (Fase 2): el diseño de las mezclas se basa principalmente en los porcentajes de adición de nanotubos delimitados en la bibliografía, pero con la particularidad que no se pretende analizar la mayoría de los porcentajes si no los más relevantes. Adicional a esto, se realizan los ensayos establecidos por las normas técnicas colombianas e internacionales. Se efectúa una comparación con una mezcla de referencia que no contendrá nanotubos. De lo anterior y una vez revisada la bibliografía se considera como porcentajes de nanotubos a utilizar en las mezclas el 0.5 % y 1.0 % de la masa del cemento.

En esta fase también se identifica el método de dispersión que sea más conveniente y eficaz posible, dado la disponibilidad de instrumentación en cuanto a ultrasonidos. En particular esta fase va ligada a la tercera, la cual es de ensayos, ya que, para determinar la mejor mezcla, se debe realizar un diseño experimental que permita obtener mediciones de conductividad consistentes. Esto tiene como propósito identificar cual método de dispersión es más efectivo en función de la resistencia eléctrica.

Se evaluaron cuatro métodos de dispersión, los cuales el primero es mediante un baño de ultrasonido, que se llevó a cabo en un dispositivo que se utiliza para limpiar y descontaminar objetos mediante el uso de ondas ultrasónicas de alta frecuencia (también conocido como ultrasonido por baño). Estas ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas generadas por un transductor que convierte energía eléctrica en energía ultrasónica, con

frecuencias generalmente entre 20000 Hz y 40000 Hz. Estas ondas se transmiten a través del líquido de limpieza presente en el baño, que puede ser agua destilada u otro solvente adecuado, actuando como un medio de transmisión para las ondas ultrasónicas.

La clave del funcionamiento del ultrasonido radica en la cavitación, un fenómeno en el cual las ondas ultrasónicas generan ciclos de compresión y rarefacción en el líquido, formando microburbujas que luego implosionan. En las zonas de rarefacción, se forman burbujas microscópicas de vapor debido a la baja presión. Estas burbujas continúan creciendo durante los ciclos de vibración ultrasónica hasta alcanzar un tamaño crítico. Cuando esto sucede, las burbujas colapsan rápidamente en las zonas de alta presión durante los ciclos de compresión, generando un colapso violento conocido como cavitación. Este colapso provoca micro chorros de líquido y turbulencias en el líquido circundante. Estos micro chorros son extremadamente efectivos para eliminar partículas, grasa, suciedad y otros contaminantes de las superficies de los objetos sumergidos en el baño. La acción de la cavitación disgrega las aglomeraciones de nanotubos, propiciando una dispersión más homogénea.

El segundo método de dispersión que se utilizó fue mediante una sonda ultrasónica, que al igual que el baño ultrasónico crea burbujas por cavitación, lo que resulta en una mejor dispersión, esto debido a que la sonda permite concentrar más eficientemente la energía.

Por último, se realizaron dos métodos manuales; utilizando un agitador magnético por un tiempo determinado, y el otro método se realizó adicionando un agente dispersante igualmente utilizando el dispositivo de agitación magnética.

Ensayos (Fase 3): una vez se definan los tipos de mezclas, donde la principal variación se presenta en el porcentaje de adición de nanotubos y el método de dispersión se precede a realizar los ensayos concluyentes. Con el método de dispersión seleccionado y las masas de los distintos materiales definidas para las mezclas de mortero, se procede a los ensayos de compresión y tensión en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. En estos ensayos se modificó la forma de medición de la impedancia, específicamente en lo relacionado con el tipo de montaje utilizado, incorporando electrodos serigrafiados, láminas de acero o malla de alambre, con el fin de comparar resultados e identificar en primer lugar los especímenes que tengan la capacidad de tener buenas lecturas con cantidades optimas de nanotubos.

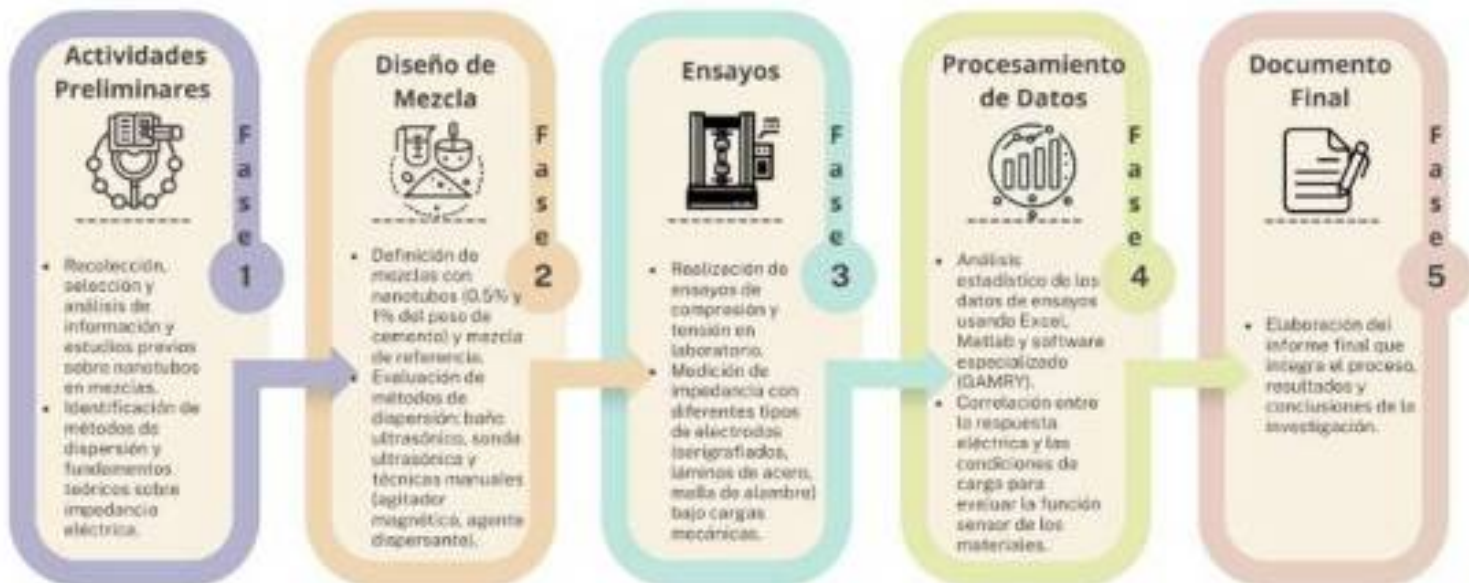
Procesamiento de datos (Fase 4): la recolección de datos se realizó en el transcurso de cada ensayo. Luego, los datos se procesaron y analizaron utilizando métodos estadísticos y herramientas de software (como por ejemplo uso de Excel, Matlab y el software del potenciómetro GAMRY). Por consecuencia las fases (2), (3) y (4) se encuentran muy ligadas y se llevaron a cabo al mismo tiempo.

Con las mezclas ya definidas y elaborados los ensayos, se procedió a realizar la correlación entre la respuesta eléctrica medida por cada ciclo de carga y como los materiales multifuncionales pueden actuar como sensores en el monitoreo estructural.

Realización del documento final (Fase 5): como última fase, se contempló la elaboración del documento final de la investigación. Como parte de los avances, se presentó un artículo y ponencia derivado de esta investigación en el Congreso Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Expotech UNAD, y se tiene proyectada la elaboración de dos artículos científicos adicionales basados en los resultados de esta tesis.

En resumen, el diagrama de la **Figura 3-1** ilustra de forma esquemática y condensan las cinco fases desarrolladas en la investigación. En todas las fases de la investigación se realizaban reuniones periódicas con el director y codirector, con el fin de presentar avances y toma de decisiones.

Figura 3-1. Fases Metodológicas de la Investigación.



En el desarrollo de esta investigación la elección de los equipos y materiales son clave para su correcta ejecución, ya que de ellos depende que los resultados sean confiables y puedan replicarse en el futuro. A continuación, se proporciona una descripción detallada de los dispositivos y materiales empleados, detallando sus propiedades y procedencias. Al registrar estos elementos de forma clara, se asegura claridad para su replicación, a la vez que resalta la exactitud y el rigor empleado en el presente estudio.

3.1 Equipos

Los equipos utilizados en la presente investigación fueron escogidos en función de disponibilidad, especificaciones técnicas y correspondencia con las necesidades experimentales. Los dispositivos primordiales empleados son aquellos fundamentales para la preparación y caracterización de las mezclas como de los materiales.

3.1.1 Ultrasonido por sonda

El ultrasonido por sonda o también conocido como *sonifier/sonicator* (**Figura 3-2**) es un dispositivo ultrasónico utilizado en laboratorios para disrupción celular, nanopartículas, ensayos en microchips y emulsificación de muestras. Además, optimiza procesos críticos como la homogeneización de mezclas, lisis de células, procesamiento de biomoléculas (ADN y proteínas), aceleración de reacciones químicas, lixiviación, y desgasificación de mezcla fina.

Figura 3-2. Ultrasonido por sonda Branson Digital Sonifier 450.



El modelo del dispositivo utilizado es Branson Digital Sonifier 450, los principales parámetros de este dispositivo de ultrasonido se presentan en la **Tabla 3-1**.

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas. Adaptado de Branson Ultrasonics Corporation (2001).

Parámetros	Descripción
Potencia máxima	400 W
Frecuencia de operación	19.850 kHz - 20.050 kHz
Control de Amplitud	10 % - 100 %
Pantalla LCD	Muestra amplitud, tiempo, temperatura y estado del proceso en tiempo real
Modos de operación	- Continuo: Sonicación ininterrumpida - Temporizado: Operación por tiempo definido - Pulsado: Ciclos de encendido y apagado para evitar sobrecalentamiento - Temperatura controlada: Detiene la sonicación al alcanzar un umbral (requiere sonda opcional)
Línea de voltaje	115 V $\pm$ 10 % @ 50/60 Hz
Temperatura	En funcionamiento: de 5 °C (41°F) a 40 °C (104 °F)

Complementariamente se utilizó otro dispositivo de sonda ultrasónica ubicado en la universidad de los Andes (**Figura 3-3**), este dispositivo de referencia Q125 Sonicator® cumple el mismo propósito que el anteriormente mencionado. Las especificaciones técnicas de este procesador ultrasónico se describen en la **Tabla 3-2**.

Figura 3-3. Ultrasonido por sonda QSONICA Sonicator Processor Q125.**Tabla 3-2.** Especificaciones técnicas. Adaptado de QSONICA, (2023)

Parámetros	Descripción
Potencia nominal	125 W
Frecuencia de operación	20 kHz
Control de Amplitud	10 % - 100 %
Pantalla LCD	Muestra amplitud, cantidad de energía como porcentaje de 125 vatios, tiempo y cantidad acumulada de energía en julios entregada a la sonda.
Modos de operación	- Continuo: Sonicación ininterrumpida - Temporizado: Operación por tiempo definido - Pulsado: Ciclos de encendido y apagado para evitar sobrecalentamiento
Línea de voltaje	110 V @ 50/60 Hz
Temperatura	En funcionamiento: de 5 °C (41°F) a 40 °C (104 °F)

3.1.2 Ultrasonido por baño

El baño ultrasónico es un dispositivo diseñado para la limpieza, homogenización y preparación de muestras mediante cavitación ultrasónica. El modelo utilizado es el Branson M1800H (**Figura 3-4**), el cual permite una cavitación uniforme, incorpora un sistema de calentamiento, su fabricación es en acero inoxidable, utilizado en laboratorios de química, electrónica y biotecnología. La **Tabla 3-3** presenta las especificaciones técnicas del baño ultrasónico.

Figura 3-4. Ultrasonido de baño Branson M1800H.



Tabla 3-3. Especificaciones técnicas ultrasonido de baño. Adaptado de Branson Ultrasonics Corporation (2013).

Parámetro	Descripción
Potencia	70 W
Frecuencia de operación	40 kHz
Peso	4 kg (9 lb)
Capacidad del tanque	1/2 galón (1.91 L)
Dimensiones del tanque (L × W × H)	150 mm × 140 mm × 100 mm
Línea de voltaje	120 V ± 10 %, 50/60 Hz
Temperatura	En funcionamiento: de 5 °C (41 °F) a 40 °C (104 °F))

3.1.3 Agitador magnético

Este dispositivo está diseñado para la mezcla y calentamiento simultaneo de reactivos químicos en laboratorios. La placa de calentamiento asegura una distribución uniforme de calor, mientras su sistema de agitación motorizado permite un control de la velocidad, facilitando la homogeneización de soluciones (**Figura 3-5**). Es útil para aplicaciones en química, biotecnología y farmacéutica, donde se requiere mantener mezclas a temperaturas controladas.

Figura 3-5. Agitador magnético con placa calefactora Boeco MSH 130 y barra de agitación magnética.



El agitador magnético utilizado proviene del fabricante BOECO Germany, modelo MSH 130, sus especificaciones técnicas se presentan en la **Tabla 3-4**.

Tabla 3-4. Especificaciones Agitador magnético con placa calefactora Boeco MSH 130, adaptada de BOECO Germany, (2024).

Parámetro	Descripción
Rango de velocidad	250 rpm - 1500 rpm
Temperatura máxima de la placa	370 °C
Volumen máximo de agitación	Hasta 5.0 L
Tamaño de la plataforma caliente	130 mm de diámetro
Material de la plataforma caliente	Aluminio
Control	Termostático
Tamaño total	173 mm (ancho) x 281 mm (profundidad) x 101 mm (alto)
Potencia de calentamiento	220 W

Parámetro	Descripción
Peso	3.1 kg

3.1.4 Conductímetro

El conductímetro de mesa Lab 945 es un dispositivo de medición precisa elaborado para analizar conductividad en soluciones líquidas, permitiendo la determinación de parámetros como sólidos disueltos totales y salinidad. Su funcionamiento se basa en la medición de la capacidad de una solución para poder conducir electricidad. Es ideal para aplicaciones en laboratorios de química, control de calidad de aguas y procesos industriales donde se requiere un monitoreo constante de conductividad. El conductímetro está compuesto principalmente por; una unidad principal, que contiene la pantalla y los controles del dispositivo, un sensor de conductividad, el cual es un electrodo encargado de medir la conductividad de la solución (**Figura 3-6**).

Figura 3-6. Conductímetro de mesa Lab 945.



Las especificaciones técnicas del conductímetro de mesa Lab 945 se presentan en la **Tabla 3-5**, donde se observan los rangos de medición, resolución, precisión y otras características relevantes.

Tabla 3-5. Especificaciones técnicas del conductímetro de mesa Lab 945. Adaptado de SI Analytics (2016).

Parámetro	Descripción
Rango de medición	0 $\mu\text{S/cm}$ a 200 $\mu\text{S/cm}$ 0 $\mu\text{S/cm}$ a 2000 $\mu\text{S/cm}$ 0 $\mu\text{S/cm}$ a 20 mS/cm 0 $\mu\text{S/cm}$ a 500 mS/cm
Resolución	0.1 μS ; 1 μS ; 0.01 mS ; 0.1 mS ; 0.1 $^{\circ}\text{C}$
Precisión	± 1 dígito, $\pm 0.5\%$ del rango de medición, $T [^{\circ}\text{C}] \pm 0.1$ (5...50 $^{\circ}\text{C}$)
Conectores	Conector de brida de 8 pines, puerto USB de interfaz de 4 pines
Calibración	Entrada directa
	Compensación de temperatura
	Punto único
	Automático (DIN19266, TechDIN19267, Merck, Mettler)
Alanceamiento de datos	4000 registros con fecha, hora, valores 1+2 y temperatura

3.1.5 Sistema PROOVE'it de 8 canales

El sistema PROOVE'it es un dispositivo (**Figura 3-7**) diseñado para evaluar la resistencia del concreto hidráulico frente a la penetración de iones cloruro, importante en el control de calidad y estimación de la durabilidad de las estructuras de concreto. Este dispositivo permite realizar tres métodos de ensayo:

- Método de ensayo estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones de cloruro (ASTM C1202), más conocido como ensayo de permeabilidad rápida a cloruros (RCPT, por sus siglas en inglés).
- Método de ensayo estándar para la resistividad eléctrica en volumen o la conductividad en volumen del concreto hidráulico (ASTM C1876) que reemplaza la norma ASTM C1760.

- Ensayo para determinar el coeficiente de migración de cloruro a partir de experimentos de migración en estado no estable (NT BUILD 492).

Figura 3-7. Dispositivo PROOVE'it de 8 canales.



El sistema integrado de hardware y software permite obtener resultados precisos mediante celdas de ensayo. La **Tabla 3-6** presenta las especificaciones principales del dispositivo.

Tabla 3-6. Especificaciones técnicas del dispositivo PROOVE'it de 8 canales. Adaptado deGermann Instruments (2021).

Parámetros	Descripción
Unidad de ensayo	8 canales para ensayos simultáneos
Fuente de alimentación	110 V AC / 50 Hz
Conexión	RS-232 serial a PC, convertible a USB
Protección	Protección contra cortocircuitos y opción de bloqueo de canal
Compatibilidad	Windows 7 / 8 / 10
Ajuste de voltaje	Configurable de 5 V a 60 V en pasos de 5 V (aplicable a NT BUILD 492 o EN 12390-18)
Corriente máxima de ensayo	500 mA por canal
Precisión de corriente	$\pm 0.5 \%$ en el rango de 1 a 500 mA
Precisión de voltaje	± 0.1 V en el rango de 5 a 60 V

3.1.6 Potenciostato

Uno de los dispositivos clave para llevar a cabo esta investigación es el potenciostato, adecuado para aplicaciones en electroquímica física, sensores, recubrimientos y corrosión.

Figura 3-8. Potenciostato/galvanostato/ZRA de la empresa Gamry Instruments referencia 600+(derecha), computador con software Gamry (izquierda).



El dispositivo utilizado es un potenciostato/galvanostato/ZRA de la empresa Gamry Instruments referencia 600+ (**Figura 3-8**). Este potenciostato de alto rendimiento diseñado para mediciones rápidas de baja corriente ofrece un equipamiento completo para realizar espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), el software ofrece una variedad de rutinas experimentales:

- EIS potenciostático: realiza un barrido de impedancia a lo largo de un rango de frecuencias manteniendo la celda en control potenciostático en configuraciones de dos o tres electrodos. Se puede ajustar la amplitud del voltaje de corriente alterna (AC), el desfase del voltaje de corriente continua (DC), las frecuencias de inicio y fin, y la densidad de datos por década.
- EIS galvanostático: adquiere un espectro de impedancia en un rango de frecuencias bajo control galvanostático. Permite configurar la corriente alterna, la compensación de corriente continua, así como los límites de frecuencia y la cantidad de puntos medida por frecuencia de década.
- EIS galvanostático híbrido: es una versión variable del control galvanostático en la que se especifica la amplitud máxima permitida de voltaje AC. El software ajusta automáticamente la amplitud de corriente para mantener el potencial deseado, evitando valores extremos a lo largo del rango de frecuencia. Se controla el

potencial AC, la corriente DC, las frecuencias de inicio y fin, y los puntos por década.

- EIS de frecuencia simple: mide la impedancia a una frecuencia fija y se registra en función del tiempo. Se define la frecuencia, la amplitud del voltaje en AC y el intervalo de repetición en el tiempo.
- Mott-Schottky: realiza un voltamograma AC en pasos discretos, midiendo la impedancia de la celada a una única frecuencia mientras varía el voltaje DC. Se grafican en tiempo real la resistencia y la capacitancia de la celda, siendo muy útil en estudios de semiconductores y análisis de recubrimientos.
- OptiEIS Potentiostatic: utiliza la técnica multiseno exclusiva de Gamry en modo potencioestático para obtener espectros de impedancia con una excelente relación señal-ruido.
- OptiEIS Galvanostatic: aplica la técnica multiseno en modo galvanostático, optimizando la adquisición de espectros de impedancia.
- EIS potencioestático multiplexado: emplea un multiplexor ECM8 para ejecutar escaneos de impedancia en hasta ocho muestras simultáneamente, lo que aumenta significativamente la productividad del ensayo.

En la **Tabla 3-7** presenta las especificaciones técnicas del potencioestato utilizado, detallando parámetros importantes.

Tabla 3-7. Especificaciones técnicas del dispositivo potencioestato/galvanostato/ZRA de la empresa Gamry Instruments referencia 600+. Adaptado de Gamry Instruments (2022).

Parámetro	Descripción
Potencioestato	Si
Galvanostato	Si
Amperímetro de resistencia cero	Si
Flotante (aislado de la tierra)	Si
Conexiones celulares	2, 3, 4, 5 o 6 (incluye canal auxiliar)
Corriente máxima	± 600 mA
Voltaje máximo aplicado	± 11 V
Base de tiempo mínima	3,333 μ s
Peso	3 kg
EIS	10 μ Hz - 5 MHz

Parámetro	Descripción
Amplitud de voltaje AC	3 V máximo
Amplitud de corriente alterna actual	600 mA máximo

3.1.7 Máquina universal

La máquina universal SHIMADZU tipo AG-X plus 250 kN / 300 kN (**Figura 3-9**) evalúa el comportamiento mecánico de materiales bajo diversas condiciones de carga. Su diseño permite la realización de ensayos de tracción, compresión y flexión en una gran variedad de materiales como: metales, maderas, polímeros, cerámicos y compuestos como el cemento o concreto. Este equipo es utilizado desde industrias hasta laboratorios de investigación, gracias a su tecnología de medición y su interfaz intuitiva permite la obtención de datos confiables para caracterizar propiedades mecánicas y así poder garantizar el cumplimiento de estándares internacionales. La **Tabla 3-8** presenta los parámetros más relevantes de la máquina universal.

Figura 3-9. Máquina universal SHIMADZU tipo AG-X plus 250 kN / 300 kN (derecha), computador con software (izquierda).



Tabla 3-8. Especificaciones técnicas del equipo SHIMADZU tipo AG-X plus 250 kN / 300 kN. Adaptado de SHIMADZU (2014).

Parámetro	Descripción
Capacidad de carga máxima	250 kN y 300 kN

Parámetro	Descripción
Control de esfuerzo y deformación	Sistema de alta precisión con husillo de bolas sin holgura
Velocidad del cabezal móvil	Ajustable entre 0.0005 mm/min y 500 mm/min
Calibración automática	Para ensayos de tensión y compresión con opción de calibración de alta precisión
Rigidez del bastidor	Mínimo 300 kN/mm, garantizando estabilidad en los ensayos
Sistema de medición	Encoder óptico con pantalla digital
Cumplimiento de normas	Certificaciones JIS B7721, EN 10002-2, ISO 7500-1 y ASTM E4
Precisión del desplazamiento	Dentro de $\pm 0.1\%$ del valor indicado
Precisión de la carga	Dentro de $\pm 0.5\%$ del valor de carga mostrado

3.1.8 Espectrofotómetro UV/Vis

El espectrómetro SPECORD 50 PLUS fabricado por Analytik Jena (**Figura 3-10**), es un dispositivo de UV/Vis (Ultravioleta-visible) de doble haz con división interna del rayo que ofrece mediciones precisas, reproducibles y robustas, incluso en muestras turbias o difíciles. La aplicación más común del espectrómetro es la medición de absorción, en la que se puede medir cuanto absorbe una muestra la luz al pasar a través de ella. Esto permite identificar y cuantificar la concentración de sustancias según la intensidad de la luz absorbida en ciertas longitudes de onda.

Figura 3-10. Espectrómetro SPECORD 50 PLUS, Universidad de los Andes.



En la **Tabla 3-9**. Especificaciones del espectrómetro SPECORD 50 PLUS. Adaptado de se visualiza las especificaciones técnicas del dispositivo espectrómetro SPECORD 50 PLUS.

Tabla 3-9. Especificaciones del espectrómetro SPECORD 50 PLUS. Adaptado de Analytik Jena (2020).

Parámetro	Descripción
Diseño óptico	Espectrofotómetro de doble haz con tecnología <i>Split Beam</i>
Rango de longitud de onda	190 nm - 1100 nm
Ancho de banda espectral	1.4 nm
Capacidad de resolución espectral de tolueno/hexano a 20 °C –25 °C	1.6 - 1.8
Requisitos eléctricos del instrumento	85 - 264 V/AC 50 - 60 Hz
Desviación de la línea base en la absorbancia	±0.0005 (200 nm - 1000 nm; Slit 1.4 nm)
Precisión fotométrica VIS en absorbancia (a 546 nm con filtro de vidrio neutro Hellma® F4) *	± 0.003
Precisión fotométrica UV en absorbancia (dicromato potásico) *	± 0.01
Reproducibilidad fotométrica en absorbancia (a 546 nm con filtro de vidrio neutro Hellma® F4, RMS) *	≤ 0.0005
Intervalo mínimo de datos	0.02 nm
*Teniendo en cuenta las tolerancias de las normas aplicadas	

3.1.9 Equipos y herramientas auxiliares

Además de los equipos principales descritos anteriormente, se utilizaron equipos y herramientas adicionales que complementaron las mediciones y procesos en los distintos ensayos. La **Tabla 3-10** describe los dispositivos auxiliares más relevantes.

Tabla 3-10. Dispositivos auxiliares.

Dispositivo	Descripción
Mezcladora	 Mixer Ecomax by Hobart modelo A200C-1161. 3 velocidades: 107 rpm, 198 rpm, 361 rpm. Capacidad: 20 litros.
Balanzas	 Balanza TRÚMAX modelo MIX A, clase III. Capacidad: máxima de 3000 g, mínima de 2 g. División: 0.1 g.
	 Balanza TRÚMAX modelo MIX H, clase III. Capacidad: máxima de 600 g, mínima de 0.2 g. División: 0.01 g.
	 Balanza Sartorius, modelo QUINTIX224-1CEU. Capacidad: 220 g. División: 0.1 mg.
Moldes estandarizados	 Molde tipo cubo de 50 mm, cumple con lo establecido en la norma NTC 220 emitida por INCONTEC (2022b) y es equivalente a ASTM C109.

Dispositivo		Descripción
		Molde tipo briqueta (forma de hueso), cumple con lo establecido en la norma ASTM C190 emitida por ASTM International (1885).
		Molde prismático de 40 mm x 40 mm x 160 mm, cumple con lo establecido en la norma NTC 120 emitida por INCONTEC (2022a) y es equivalente a ASTM C348.
		Molde prismático de 20 mm x 25 mm x 285 mm, cumple con lo establecido en la norma NTC 3938 emitida por INCONTEC (2022d) y es equivalente a ASTM C490.
Calibrador digital (pie de rey)		Rango: 0 mm a 300 mm. Resolución: 0.01 mm. Precisión: ± 0.025 mm.
Datalogger de humedad y temperatura		Rango de temperatura -40 °C a 70 °C. Precisión de temperatura: ± 1 °C. Rango de humedad: 0 %RH a 100 %RH. Precisión de humedad: ± 2 %RH
Termómetro visual de infrarrojos		Rango de temperatura: desde -25 °C hasta 300 °C. Pantalla LCD: de 2.4 pulgadas. Distancia máxima medición: 26 cm. Precisión: ± 1.5 °C. Resolución: 0.1 °C.

	Dispositivo	Descripción
Tubos de plástico para almacenar muestras líquidas		Vaso de transparente con tapa de presión Capacidad: 9 mL. Diámetro: 19.4 mm. Altura interna : 33.5 mm.
		Tubos para centrifuga tipo Falcon, estéril con tapa y gradilla. Nest Capacidad: 50 mL.

Se emplearon herramientas auxiliares como enrasadores y apisonadores para la nivelación y compactación de los especímenes, mientras que espátulas, cucharones y jeringas facilitaron la dosificación y manipulación de los materiales. Adicionalmente, la utilización de recipientes de vidrio, como vasos precipitados, matraces, picnómetros, tamices, mesa de fluidez y comparador de longitud permiten la correcta ejecución de las normas de ensayo. Por último, se utilizó un equipamiento de iluminación y de soportes para fotografías.

3.2 Materiales

Los materiales utilizados fueron seleccionados bajo criterios de disponibilidad, propiedades físicas y compatibilidad con los objetivos experimentales. Los principales materiales utilizados son los que conforman el mortero; cemento, arena y agua. Seguidamente los nanotubos de carbono de multi pared y por ultimo los electrodos usados para las mediciones eléctricas.

3.2.1 Cemento

El cemento utilizado en la elaboración de los especímenes es un cemento comercial de la empresa Argos (**Figura 3-11**), cuya clasificación es estructural (Tipo ART). El cemento

cumple con la NTC 121 emitida por INCONTEC (2023a) y su equivalencia internacional ASTM C1157. La selección de este cemento se justifica bajo dos criterios; el primero es la facilidad de adquisición y el segundo es la diferencia frente al cemento de uso general, que suelen contener mayores proporciones de adiciones, mientras el cemento ART mantiene una composición optimizada con menor contenido de adicciones. La **Tabla 3-11** muestra un resumen de los requisitos físicos del cemento utilizado según normas nacionales e internacionales.

Figura 3-11. Cemento Argos tipo ART.



Tabla 3-11. Especificaciones técnicas. (Argos, 2024)

Parámetros Físicos		Norma de ensayo	NTC 121	ASTM C1157	Cemento Argos
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat	Inicial, no menor a, minutos	NTC 118	45	45	90
	Inicial, no mayor a, minutos		420	420	360
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx. (%)		NTC 4927	0.020	0.020	0.020
Resistencia mínima a la compresión, (MPa)					
1 día		NTC 220	11	12	12
3 días			22	24	24

3.2.2 Arena

Arena 20-30 (**Figura 3-12**), clasificada como un agregado fino, es una arena normalizada natural de sílice, que cumple con lo establecido en la norma NTC 3937 emitida por INCONTEC (2022c) y es equivalente a ASTM C778. Donde la mayor parte de las partículas pasan por el tamiz 850 μm (nro. 20) y son retenidas en el tamiz 600 μm (nro. 30).

Figura 3-12. Arena 20-30



La granulometría se verificó siguiendo el ensayo de la norma NTC 1522 emitida por INCONTEC (1979) y es equivalente a la norma ASTM D422, esta norma establece el procedimiento para realizar el tamizado de agregados. Los resultados de la granulometría se presentan en la **Tabla 3-13** y la **Figura 3-13**, en los que se ve reflejado que el mayor porcentaje pasa por el tamiz nro. 20 y es retenido en el tamiz 30. En la **Tabla 3-12** se presentan los requisitos establecidos en la norma NTC 3937 para la arena 20-30.

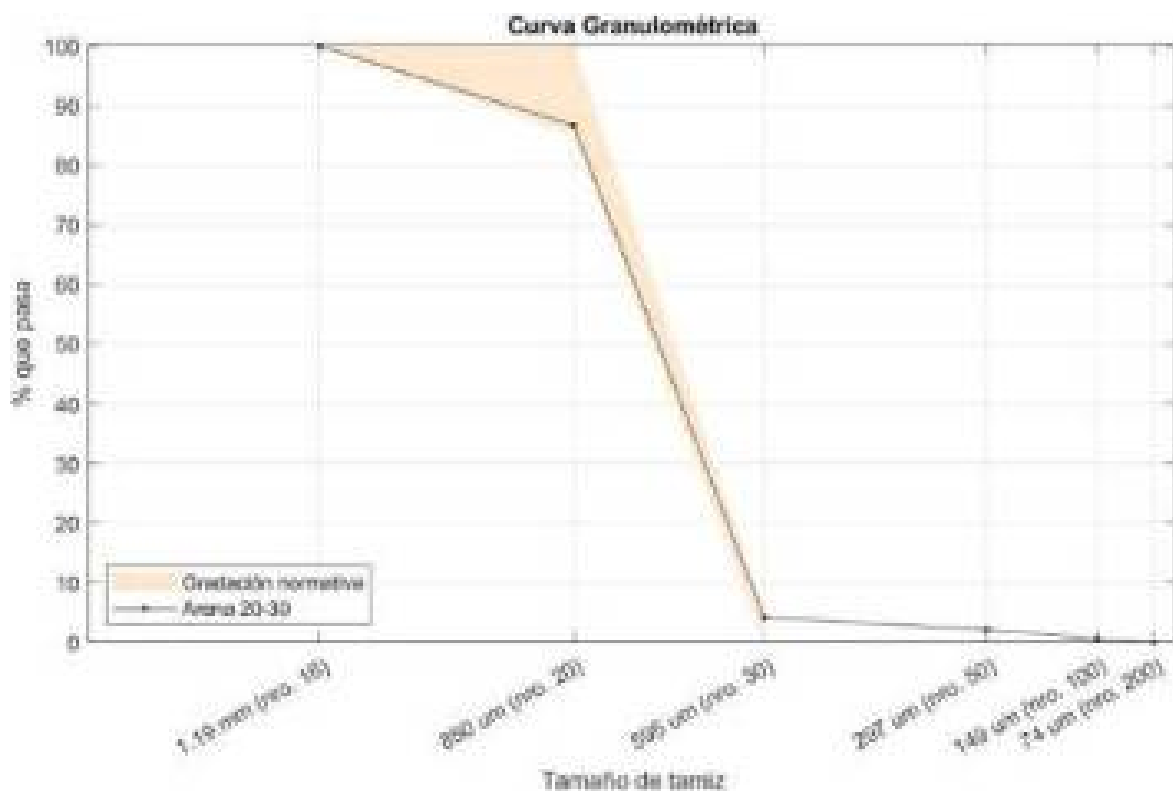
Tabla 3-12. Gradación normativa, porcentaje que pasa a través del tamiz para la Arena 20-30.

Tamiz	% Pasa
1.19 mm (nro. 16)	100
850 μm (nro. 20)	85 a 100
595 μm (nro. 30)	0 a 5

Comparando los valores presentados en las **Tabla 3-12** y **Tabla 3-13** se validan los requisitos de granulometría para la arena utilizada.

Tabla 3-13. Granulometría de la Arena sílice 20-30.

Tamiz	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Pasa	% Retenido Acumulado
1.19 mm (nro. 16)	0.0	0.0	100.0	
850 μ m (nro. 20)	66.7	13.3	86.7	13.3
595 μ m (nro. 30)	412.8	82.5	4.2	95.8
297 μ m (nro. 50)	9.7	1.9	2.2	97.7
149 μ m (nro. 100)	7.3	1.5	0.7	99.2
74 μ m (nro. 200)	3.7	0.7	0.0	-
Total	500.2	100%	MF	3.06

Figura 3-13. Curva granulométrica de la Arena sílice 20-30.

Se determinó la gravedad específica (Densidad Relativa) y la absorción del agregado fino mediante el método del picnómetro, según lo estipulado en la norma NTC 237 emitida por INCONTEC (2020), equivalente a la norma ASTM C128. Este ensayo consiste en sumergir la muestra en agua por 24 horas, secarla superficialmente y pesarla. Luego, se introduce

en un picnómetro con agua, eliminando burbujas de aire antes de registrar su masa total. Posteriormente, la muestra se seca en horno hasta alcanzar masa constante y se pesa nuevamente. Con estos valores, se calculan la gravedad específica seca al horno (SH), gravedad específica saturada y superficialmente seca (SSS), gravedad específica aparente y la absorción, los cuales se muestran a continuación:

- Gravedad específica SH: 2.58
- Gravedad específica SSS: 2.59
- Gravedad específica aparente: 2.62
- Porcentaje de absorción: 0.64 %

El contenido de agua de la arena fue de 0.06 %, la humedad relativa del laboratorio en los ensayos y almacenamiento del material fue del 61.6 % y la temperatura de 18.7 °C.

Adicionalmente, para garantizar que la arena presente un alto contenido de sílice, lo que significa que esta compuesta en su mayoría por granos de cuarzo de alta pureza. Su composición mineralógica se determinó mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX). Este análisis fue realizado en el laboratorio de fluorescencia de la Universidad Nacional de Colombia. En la **Tabla 3-14** se presentan los resultados obtenidos, donde se identificó una predominancia de cuarzo ($\text{SiO}_2 > 95\%$). Esta arena color beige proviene de la cantera II-BL-Sogamoso.

Tabla 3-14. Resultados de fluorescencia de rayos X (FRX).

Nombre	Elemento y/o Compuesto	% en peso
Silicio	SiO_2	97.41
Aluminio	Al_2O_3	1.52
Hierro	Fe_2O_3	0.31
Azufre	SO_3	0.21
Sodio	Na_2O	0.18
Cloro	Cl	0.10
Potasio	K_2O	0.08
Titanio	TiO_2	0.07
Magnesio	MgO	0.04

Nombre	Elemento y/o Compuesto	% en peso
Fosforo	P ₂ O ₅	0.04
Calcio	CaO	0.02
Cromo	Cr	0.01
Zinc	Zn	75 ppm
Vanadio	V	64 ppm
Plomo	Pb	44 ppm
Zirconio	Zr	42 ppm

3.2.3 Agua desionizada

El agua desionizada es un tipo de agua tratada a la que se le han eliminado casi todos los iones (partículas con carga eléctrica), diferente del agua destilada (purificación por evaporación y condensación). Para lograr obtener agua desionizada el proceso es mediante osmosis inversa, el cual utiliza membras semipermeables para filtrar impurezas. Este proceso se llevó a cabo mediante el equipo de osmosis del laboratorio de ambiental de la Universidad Nacional de Colombia **Figura 3-14**. El resultado es una agua con una conductividad extremadamente baja ($< 10 \mu\text{S/cm}$), lo que la hace ideal para poder utilizarla en diferentes aplicaciones por una alta pureza.

Figura 3-14. Equipo de osmosis inversa del laboratorio de ambiental de la universidad Nacional de Colombia



3.2.4 Nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT)

En la adquisición de los nanotubos de carbono se tuvieron en cuenta diversos proveedores, los dos principales en consideración fueron la empresa Nanocyl SA y VOME Store, los precios por gramo corresponden a 0.34 dólar/gramo y 0.83 dólar/gramo respectivamente. Las principales diferencias son el lugar de fabricación, la empresa Nanocyl ubicada en Bélgica y VOME Store en China, los costos de transporte de los nanotubos de VOME Store son gratis ya que supera el monto mínimo, en cambio para la empresa Nanocyl el costo de traerlos a Colombia los hace inviables. Sumado a esto, para Nanocyl se debía realizar una compra mínima de mil gramos. Ambos proveedores utilizan la misma técnica de fabricación mediante el proceso de deposición química de vapor catalítico (CVD). Por lo anterior, el criterio de adquisición de los MWCNT utilizados en esta investigación se basó en la facilidad comercial que ofrecía VOME Store, de los cuales se adquirieron 3 lotes provenientes del mismo proveedor (**Figura 3-15**), 30 gramos por cada lote. En la **Tabla 3-15** se presenta los parámetros de los MWCNT descritos por el proveedor.

Figura 3-15. Lotes de nanotubos, cada uno de 30 g.



Tabla 3-15. Parámetros de los MWCNT reportado por el fabricante VOME Store.

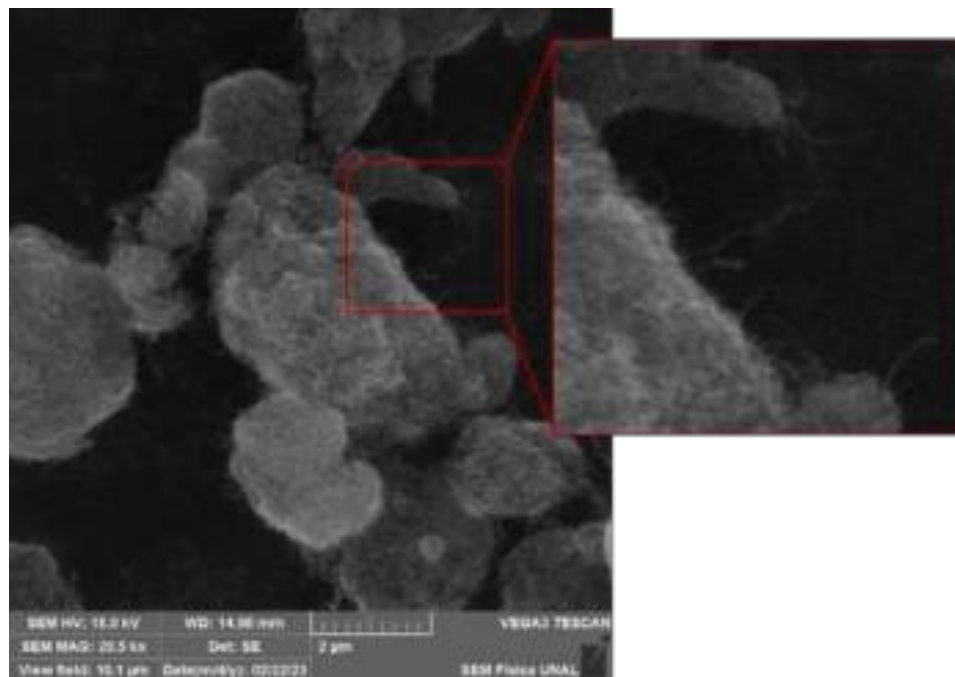
Parámetro	Valor
Pureza	>95 %
Diámetro interior	3 nm - 5 nm
Diámetro exterior	8 nm - 15nm
Longitud	2 μm - 12 μm
Superficie específica	>233 m^2/g
Densidad	2.1 g/cm^3
Resistividad	1412 $\mu\Omega\cdot\text{m}$

Parámetro	Valor
Método de fabricación	CVD
Aspecto	Polvo negro

Para verificar la morfología y composición elemental de los MWCNT, se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), lo cual confirmó la forma tubular y alargada de los nanotubos. Al no poder realizar un mayor aumento por la limitación del equipo (36000 como aumento máximo), para lograr magnificar los diámetros de los nanotubos es necesario realizarlo con un microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) al cual no se tiene acceso en la universidad, por esta razón se tuvo que enviar las muestras a la universidad de Cauca para poder realizar unas fotografías mediante TEM.

Para cada lote de MWCNT se efectuó una serie fotográfica mediante el SEM. La **Figura 3-16** muestra el primer lote, en donde se evidencia aglomeraciones de nanotubos y se observa la presencia de algunos nanotubos individuales.

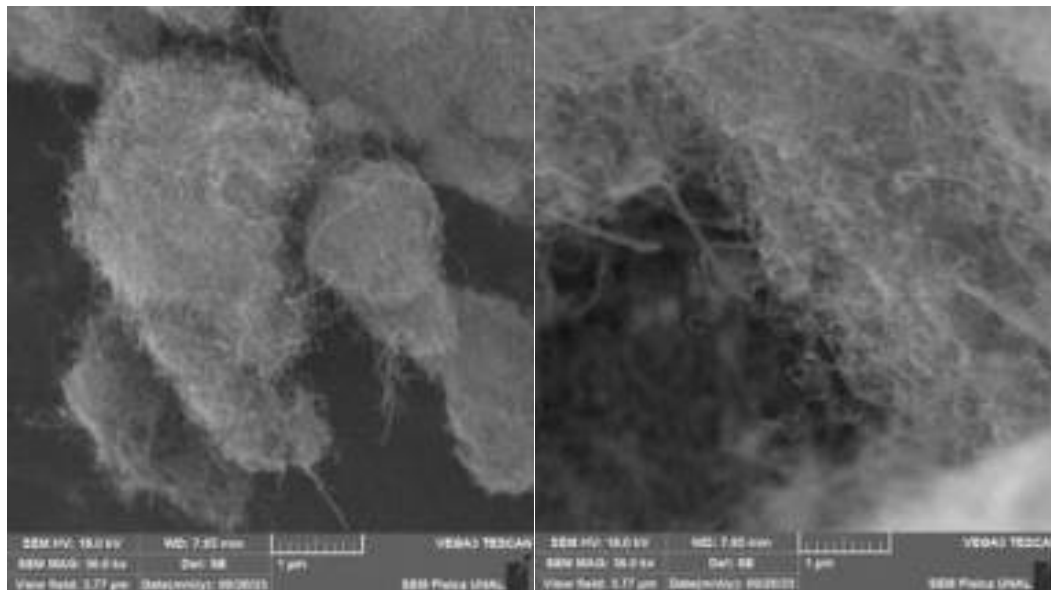
Figura 3-16. Fotografía SEM de aglomerados de MWCNT, primer lote.



La **Figura 3-17** corresponde al segundo lote de MWCNT, en esta ocasión se pudieron obtener imágenes con mayor resolución ya que la muestra y el microscopio lo permitieron,

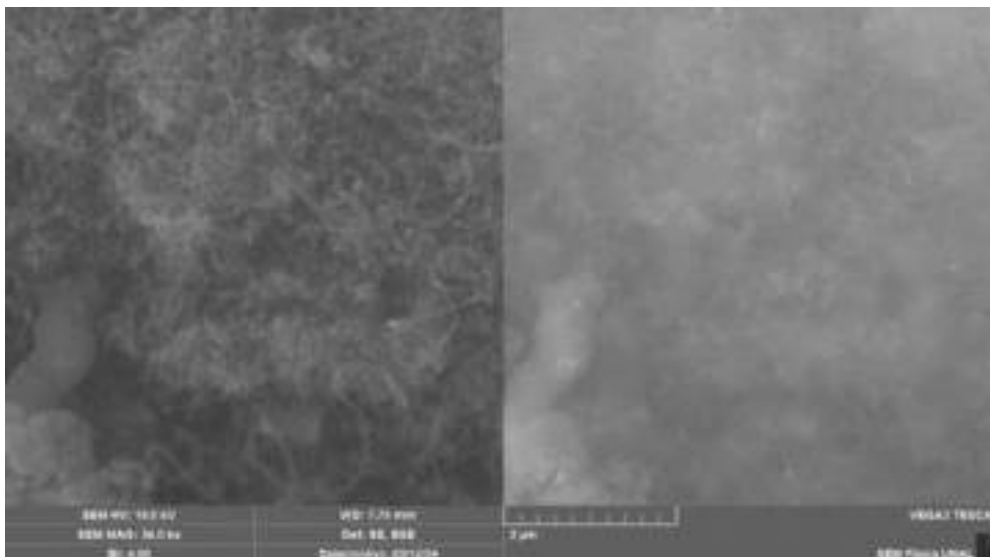
donde se evidencia de mejor forma la morfología de los nanotubos, unas estructuras enmarañadas y aglomeraciones en forma de racimos.

Figura 3-17. Fotografías SEM de aglomerados de MWCNT, segundo lote.



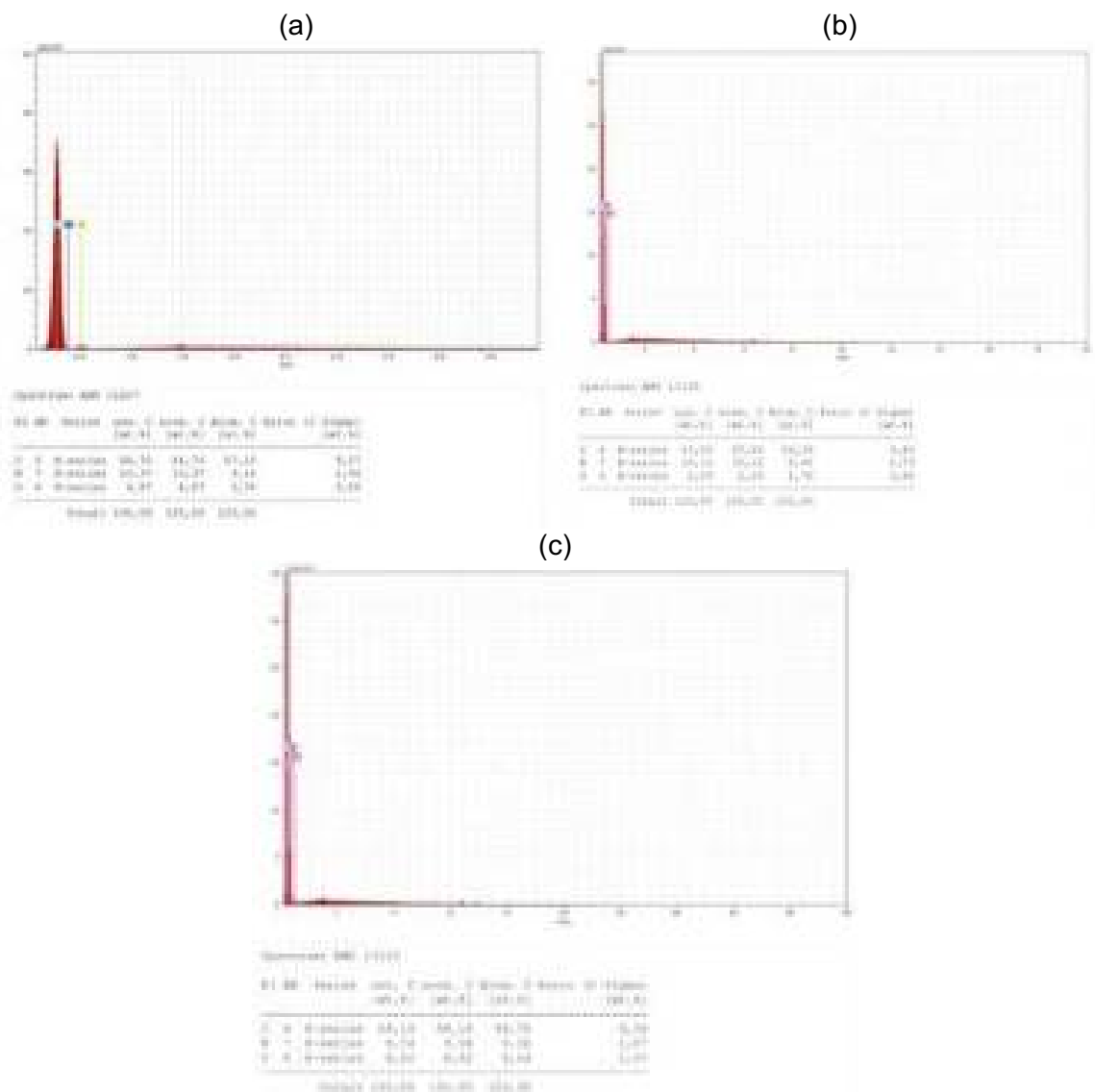
En el último lote **Figura 3-18** se vuelve a presentar las misma estructura de aglomeración de los MWCNT, estas estructuras se forman típicamente por las fuerzas de Van der Waals, que hacen que los nanotubos tiendan a agruparse y generen esa morfología esponjosa o enredada.

Figura 3-18. Fotografía SEM de aglomerados de MWCNT, tercer lote.



Adicionalmente para cada lote se tomó una muestra con el propósito de realizar un análisis de composición elemental mediante espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDX, por sus siglas en inglés), esta técnica es utilizada para determinar la composición elemental de la muestra. En el caso de los MWCNT según el proveedor, se garantiza que su composición sea solo de carbono. En la **Figura 3-19** se presentan para los tres lotes los resultados de EDX.

Figura 3-19. Espectro EDX de MWCNT para los lotes (a) primero, (b) segundo y (c) tercero



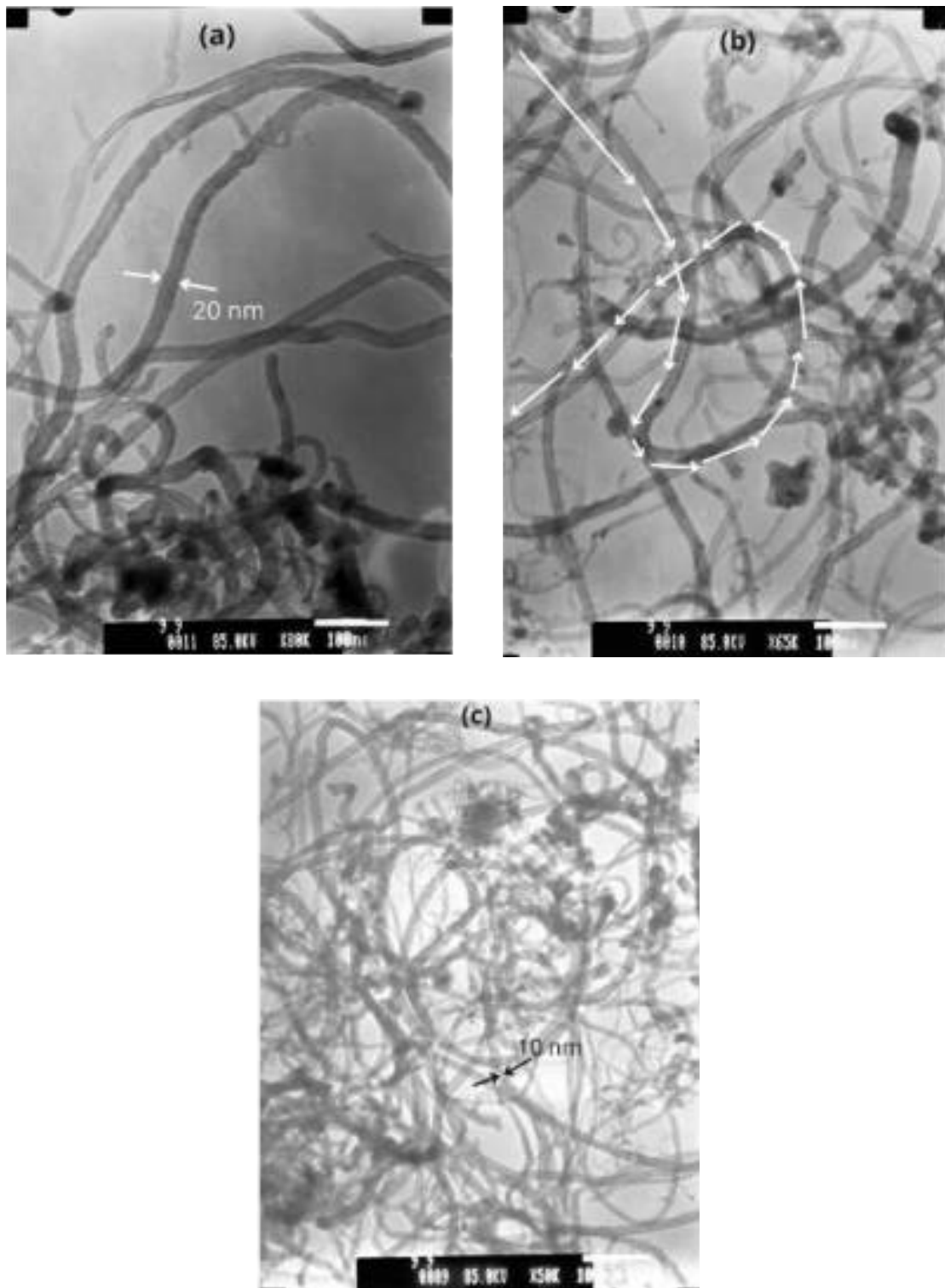
De acuerdo con los resultados obtenidos de los distintos espectros EDX, se puede notar que el mayor elemento identificado es el carbono (C) con un valor aproximado de 90 % del

peso, los demás elementos observados corresponden al nitrógeno (N) y oxígeno (O) pero en un porcentaje mucho menor. Esto se debe a que son elementos presentes en el ambiente y son muy difíciles de apartarlos del espacio donde se realiza el análisis, teniendo en cuenta esto se puede concluir que se garantiza la pureza de la muestra.

Aunque por su pequeño tamaño se dificultaba distinguir con precisión la estructura de los MWCNT en las fotografías en el SEM, si se pudo evidenciar el fenómeno de aglomeración de los MWCNT. La **Figura 3-20** incluye fotografías en el TEM de los distintos lotes, estas imágenes ayudan a determinar la estructura de los MWCNT. Las fotografías revelan los MWCNT de forma más clara. Se distinguen por su forma tubular con diámetros externos bastante similares, de entre 10 nm y 20 nm. Estos nanotubos tienen paredes continuas, homogéneas y bien definidas, rasgos comunes de los MWCNT. Las fotografías también revelan que estos nanotubos crean redes tridimensionales complejas. Debido a las interacciones de Van der Waals y a la flexibilidad de estas construcciones tubulares, los nanotubos suelen tener redes entrelazadas.

La **Figura 3-20 (a)** muestra que los MWCNT tienen una forma alargada con longitudes mucho mayores en relación con su diámetro. Una característica única de los nanotubos de carbono y una prueba estructural para su identificación es su gran relación longitud-diámetro. El recorrido de un MWCNT se indica en la **Figura 3-20 (b)** mediante flechas. La red de MWCNT entrelazados se observa en la **Figura 3-20 (c)**, en esta fotografía se muestra una clara evidencia de aglomeración y construcción de redes. La complejidad del entrelazado evidente en esta fotografía representa un claro contacto físico entre los MWCNT individuales, lo que podría mejorar el comportamiento mecánico al funcionar como puentes dentro de la matriz cementosa, aumentando así la conductividad. Sin embargo, debido a la notable interacción de los MWCNT podría llevar a dificultades en la dispersión, haciendo necesario una dispersión óptima.

Figura 3-20. Fotografías de MWCNT en el TEM, lote 1 (a), lote 2 (b), lote 3 (c).



Estas imágenes proporcionan evidencia directa de la morfología típica esperada para MWCNT, así como de los retos y ventajas en su uso como en materiales compuestos multifuncionales.

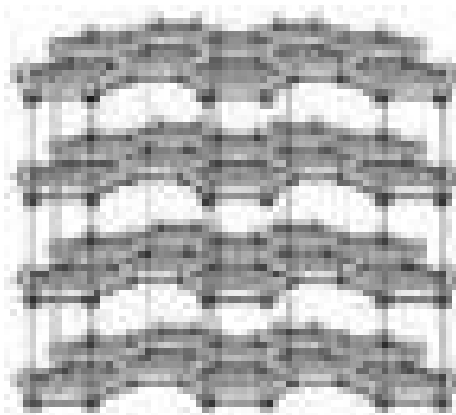
3.2.5 Grafito en polvo

Figura 3-21. Grafito Polvo 18 g.

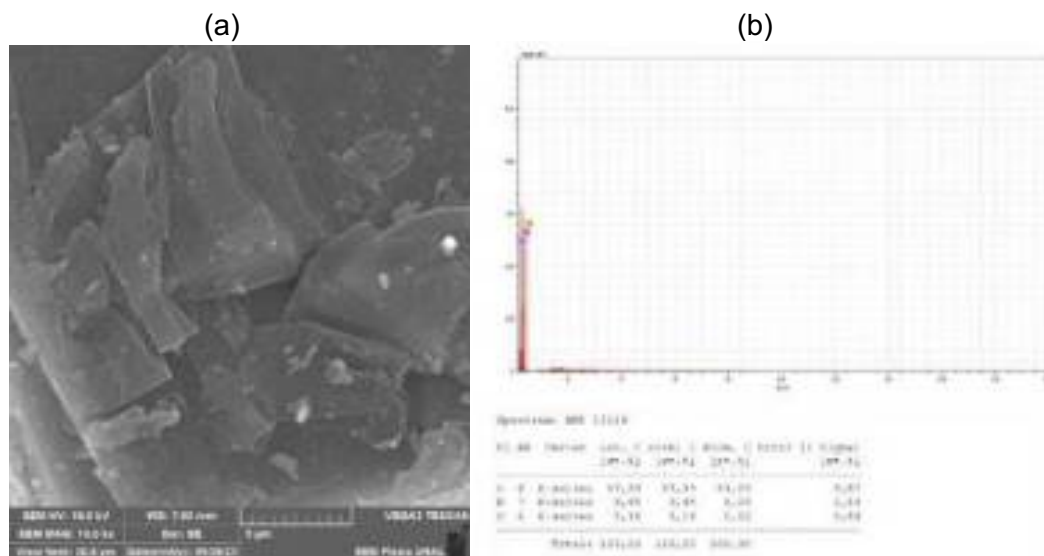


El grafito en polvo (**Figura 3-21**) se compone de partículas pequeñas de carbono dispuestas en una estructura laminar. La **Figura 3-22** muestra su estructura formada por capas de grafeno), lo que proporciona una buena conductividad eléctrica. Su utilidad va desde lubricante sólido hasta fabricación de electrodos. En términos de conductividad puede presentar una resistividad de $0.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ hasta $70 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. El grafito utilizado fue adquirido en una tienda por departamento. La estructura del grafito se muestra en la **Figura 3-23**: fotografía mediante SEM y análisis EDX, en donde se evidencia una forma laminar y una predominancia del elemento carbono.

Figura 3-22. Estructura del grafito.



Fuente: Ocampo Ruiz (2011).

Figura 3-23. Fotografía SEM (a) y espectro EDX (b) del polvo de grafito.

3.2.6 Electroodos

Los ensayos de la investigación incluyeron diferentes tipos de electrodos, donde se varió su forma y material, particularmente se estudiaron también un tipo de electrodos ya fabricados los cuales corresponden a electrodos serigrafiados producidos por la empresa Pine Research Instrumentation ubicada en Durham Estados Unidos.

Serigrafiados

Los electrodos serigrafiados son dispositivos electroquímicos fabricados con tintas de carbono, oro o platino sobre sustratos de plástico o cerámico. Las tintas son combinadas con aglutinantes minerales o polímeros aislantes para mejorar su adhesión a los sustratos. Estos electrodos se destacan por su facilidad de uso y versatilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones en biosensores y análisis electroquímico en volúmenes pequeños o entornos de alta temperatura.

Los electrodos serigrafiados cuentan con tres electrodos fundamentales que trabajan en conjunto para realizar mediciones electroquímicas; electrodo de trabajo, electrodo de referencia y electrodo auxiliar o contraelectrodo que cierra el circuito lo que facilita el flujo de corriente en la celda.

Se estudiaron dos tipos de electrodos, los cuales fueron de sustrato de polímero (PET) y con tinta de carbón y de sustrato de cerámica con tinta de platino.

- **Sustrato de polímero PET (Tereftalato de Polietileno)**

El PET es un tipo de plástico ampliamente utilizado en la fabricación de electrodos desechables debido a su bajo costo y facilidad de procesamiento. Se destaca la flexibilidad propia del material, pero su resistencia química no es tan efectiva como la de los electrodos de cerámica. La tinta que se utiliza en estos electrodos está compuesta por partículas de carbono. Las dimensiones de los electrodos serigrafiados son de 15 mm x 61 mm. En la **Figura 3-24** se muestra el electrodo serigrafiado PET, donde la zona de contacto solo son las líneas de color negro, las cuales son de tinta de carbón y el electrodo de referencia se fabrica con tinta de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl). Este material es ampliamente utilizado porque proporciona un potencial estable en soluciones acuosas.

Figura 3-24. Electrodo serigrafiado en PET con tinta impresa de carbono.



Las aplicaciones de los electrodos PET son comunes en el desarrollo de biosensores, en medios acuosos, investigaciones que no requieren electrodos reutilizables, etc. Sin embargo, la conductividad de los electrodos de carbono puede ser menor de los metales.

- **Sustrato de cerámica**

La cerámica es un material inorgánico, no metálico, conocido por su alta resistencia térmica y química. Se destaca este tipo de electrodos por su durabilidad, ya que los sustratos de cerámica pueden soportar condiciones de trabajo más exigentes, hasta 200 °C y es un material muy estable en soluciones acuosas y no acuosas. Las dimensiones de estos electrodos es igual a los PET, con la diferencia del material del sustrato es cerámica y la tinta empleada es de platino, formada por nanopartículas de platino en una matriz de resina conductora. Al igual que el electrodo PET en el electrodo cerámico (**Figura 3-25**) existe

una zona contacto donde trabajan los electrodos de trabajo, contraelectrodo y electrodo de referencia, este último fabricado con tinta de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).

Figura 3-25. Electrodo serigrafiado en cerámica con tinta impresa de platino.



Los electrodos cerámicos de platino presentan alta conductividad, resistencia a la corrosión y estabilidad química, sus aplicaciones son avanzadas debido a su estabilidad térmica y química. Esto los hacen ideales para electrocatálisis, estudios de corrosión, detección de neurotransmisores y análisis en medios acuosos o no acuosos. Ambos tipos de electrodos se emplean en el monitoreo ambiental, la industria farmacéutica, investigación en celdas de combustible y baterías, así como en análisis electroquímicos de alta precisión en laboratorios, destacando que los electrodos cerámicos son reutilizables.

Lamina de Acero inoxidable

Las láminas de acero utilizadas provienen de la empresa colombiana Cía, General de Aceros, referencia Maxdur 304 - 304L (**Figura 3-26**). Estas láminas de acero son aleaciones con altos contenidos de cromo (18 % - 20 %) y níquel (8% - 12%), lo que les proporciona una capa pasiva que protege contra la corrosión. Su buena resistencia a diversos agentes químicos las hacen ideales para aplicaciones en la industria alimenticia, farmacéutica, arquitectónica, automotriz, química y criogénica, empleándose en equipos de procesamiento de alimentos, mobiliario urbano, intercambiadores de calor, recipientes de líquidos corrosivos y componentes estructurales expuestos a ambientes agresivos.

Figura 3-26. Láminas de acero Maxdur 304 - 304L.



En la **Tabla 3-16** se presentan las propiedades físicas del acero, según la ficha técnica del fabricante. Se destaca la baja resistividad eléctrica, lo cual lo convierte un material altamente conductor.

Tabla 3-16. Propiedades físicas del acero Maxdur 304 - 304L. (Cía, 2024).

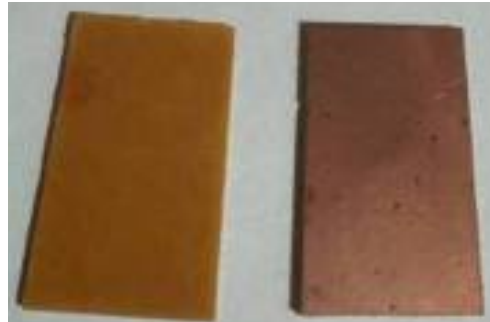
Parámetro	Valor
Densidad	7.9 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	193 Gpa
Módulo de Poisson	0.26
Conductividad térmica	A 100 °C 16.2 W/mK
	A 500 °C 21.5 W/mK
Resistividad Eléctrica	0.725 $\mu\Omega\cdot m$

Baquelita de cobre

La baquelita de cobre es una lámina compuesta de dos materiales, por una cara es un polímero termoestable derivado de la resina fenólica (baquelita), por la otra cara una lámina adherida de cobre (**Figura 3-27**). La baquelita proporciona rigidez mecánica y actúa como un aislante eléctrico, mientras que el cobre posee una baja resistividad. Las baquelitas de cobre son ampliamente utilizadas en la elaboración de circuitos eléctricos. La baquelita de cobre fue adquirida en Ssdielect Electronica S.A.S, el espesor de la baquelita es de 1 mm en donde la lámina de cobre es de 35 μm de espesor. Al no contar con una ficha técnica, se revisó la bibliografía para encontrar la resistividad de la lámina de cobre, en donde

Radoeva & Radoev (1995) estudiaron como la resistividad del cobre varia con el espesor, para espesores del orden de $35\text{ }\mu\text{m}$ es aproximadamente $1.67\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Figura 3-27. Baquelita de cobre, cara de resina (izquierda), cara de cobre (derecha)



Alambre de acero al carbono

El alambre dulce o negro como es conocido en Colombia es un alambre de acero al carbono de baja dureza que se usa en una variedad de aplicaciones gracias a su flexibilidad y resistencia a la corrosión (**Figura 3-28**). Se destaca su trabajabilidad, permitiendo doblarse sin problema y no se rompe con facilidad, por tal razón es muy usado en la construcción, en especial para amarrar varillas en estructuras de concreto. También es utilizado en zonas rurales, la industria e incluso en manualidades. Su resistencia es suficiente para muchas tareas y al ser económico, se convierte en una opción bastante práctica. El alambre utilizado para la elaboración de electrodos fue adquirido de la empresa Acero y Mallas de Colombia S.A.S, este acero es de grado AISI 1006 cumpliendo con la norma NTC 115 emitida por INCONTEC (2019) y es equivalente a ASTM A853. La resistividad eléctrica es de $14.3\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ a $17.4\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (MFG Robots, 2024).

Figura 3-28. Trozo de alambre de acero al carbono.



Para unir los distintos tramos de alambre se utilizó una soldadura 95/5, lo que significa un 95 % de estaño (Sn) y un 5 % de antimonio (Sb), esta soldadura ofrece una resistencia a la tensión de 40 MPa y una resistividad de $0.145 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (Weldcote Metals, 2024).

3.2.7 Superplastificante

Para poder mejorar la trabajabilidad de las mezclas dosificadas con nanotubos, se utilizó un aditivo superplastificante para concreto de ultra alto poder, el aditivo fue adquirido de la empresa Sika, cuya referencia es ViscoCrete®-3100 y corresponde a un reductor de agua de alto rango (HRWR, por sus siglas en inglés), basado en policarboxilatos (**Figura 3-29**). Este aditivo es ampliamente utilizado en la industria del concreto premezclado y prefabricado, donde se requiere una mezcla fluida y de alto desempeño. Ideal para concreto autocompactante, elementos estructurales con gran densidad de acero de refuerzo y en donde sea necesario una mayor plasticidad. La dosificación recomendada por el fabricante esta entre 0.15 % al 0.8 % de la masa del cementante (Sika Colombia S.A.S, 2025).

Figura 3-29. Superplastificante ViscoCrete®-3100.



3.3 Diseño experimental

En la investigación científica la formulación de una hipótesis o de un problema es común, por ende, su aceptación o rechazo debe ser sustentada por un conjunto de observaciones mediante un proceso definido. Este proceso se conoce como diseño experimental, el cual es una herramienta importante para desarrollar cualquier investigación, ya que al ser una técnica estadística permite planificar y estructurar experimentos de manera eficiente, facilitando la identificación y cuantificación del efecto de una variable de interés en una

muestra. Esta metodología permite maximizar la información obtenida con los recursos disponibles, reduciendo el número de ensayos necesarios o de muestras sin comprometer la calidad de los resultados.

Se destaca el diseño completamente aleatorizado (DCA), que corresponde a un tipo de diseño experimental. El DCA se caracteriza por asignar los tratamientos de manera completamente aleatoria a las unidades experimentales (especímenes/muestras) sin restricciones, esto garantiza que todas las unidades tengan la misma probabilidad de recibir cualquier tratamiento, eliminando posibles sesgos sistemáticos. Este tipo de diseño es ideal cuando las unidades experimentales son homogéneas, ya que permite evaluar de manera efectiva las diferencias entre tratamientos sin que factores externos interfieran. El análisis de los datos obtenidos se realiza comúnmente mediante el análisis de varianza - ANOVA (Melo et al., 2020).

Box (1990) menciona cuatro procesos o etapas básicas en el desarrollo experimental, los cuales se interrelacionan y forman una estructura que permite un enfoque iterativo, en donde los hallazgos de una etapa pueden retroalimentar las anteriores, mejorando el proceso continuamente para lograr un enfoque eficiente. Estas etapas son:

- Conjetura: donde se plantea una hipótesis o problema basados en conocimientos previos u observaciones iniciales. En esta etapa se identifican variables clave y se define el propósito del experimento.
- Diseño: se estructura el experimento para probar la conjetura. Aquí se seleccionan los factores a estudiar, se determinan los niveles de cada uno y se define el tipo de diseño experimental a utilizar.
- Experimento: se realiza el diseño experimental, recolectando datos de acuerdo con la metodología necesaria. Es importante mantener control sobre las variables y seguir el plan definido en el diseño.
- Análisis: se interpretan y analizan los datos obtenidos para validar o refutar la conjetura inicial. Esta última fase se aplican métodos estadísticos y se extraen conclusiones de los resultados como también se puede dar ajustes del proceso o generar nuevas hipótesis.

En el marco de esta investigación se llevaron a cabo dos experimentos en particular; primero la selección del método de dispersión óptimo y el segundo establece la forma de

realizar mediciones del cambio de resistividad de los especímenes sometidos a cargas mecánicas. Las etapas del desarrollo experimental para estos experimentos se establecen en la **Tabla 3-17**:

Tabla 3-17. Etapas del desarrollo experimental para los experimentos propuestos.

Selección para el método de dispersión óptimo	
Etapas	Descripción
Conjetura	El método de dispersión influye en la conductividad eléctrica de los nanotubos en el agua, por ende, su selección debe basarse bajo la optimización de esta propiedad.
Diseño	Se estructura el experimento con el fin de medir la conductividad eléctrica variando el método de dispersión, se destaca también el porcentaje de nanotubos utilizados, los cuales fueron el 0.5 % y el 1.0 % de la masa del cemento para una relación de agua/cemento igual 0.57. El tipo de diseño experimental es el CDA (Diseño Completamente Aleatorizado). Variable: método de dispersión.
Experimento	El experimento se lleva a cabo midiendo la conductividad y resistencia eléctrica en un medio acuoso, el cual es la mezcla de los nanotubos y el agua. Se llevan a cabo dos modalidades de medición, la medición cualitativa, en donde por medio de registro fotográfico se observa la sedimentación de las partículas y la medición cuantitativa, la cual se realiza mediante el uso de electrodos serigrafiados - potencióstato y un conductímetro de mesa.
Análisis	Para el análisis se considera como método óptimo aquel que presente el mayor valor de conductividad, el menor valor de resistencia y una menor sedimentación visual. En cuanto al procesamiento estadístico, se empleó principalmente ANOVA.
Medición del cambio de resistividad de los especímenes sometidos a cargas mecánicas	
Etapas	Descripción
Conjetura	Al aplicar una carga mecánica sobre un espécimen de mortero ya sea de tensión o compresión, se obtiene una respuesta eléctrica, la cual se mide mediante un electrodo, este electrodo se puede elaborar de distintos materiales como tener formas variables. El rendimiento del electrodo varía según su diseño, por lo cual se requiere identificar cual es más eficiente.
Diseño	La estructura del experimento se fundamenta en variar los tipos de electrodos usados para la medición de la respuesta eléctrica de los especímenes bajo la aplicación de cargas. Los especímenes utilizados son realizados con el mejor método de dispersión y los porcentajes de nanotubos usados fueron del 0.0 %, 0.5 % y 1.0 % de la masa del

	cemento para una relación de agua/cemento igual 0.57. El tipo de diseño experimental es el CDA. Variable: tipo de electrodo.
Experimento	El experimento utiliza el potenciostato para medir el cambio de la impedancia ante la aplicación de cargas, esta es una medición cuantitativa a través de la rutina experimental EIS de frecuencia simple.
Análisis	En el análisis se evalúa el diseño del electrodo más sensible y preciso, con el que se pueda obtener una respuesta estable y confiable. El procesamiento estadístico de los datos se realizó principalmente con ANOVA.

Al momento de diseñar un experimento, es importante clasificar los diferentes factores que se involucran en este (como las entradas, los factores controlados, los que no y la respuesta de salida), teniendo lo anterior se presenta la siguiente clasificación para cada experimento:

3.3.1 Entradas

Dentro del diseño experimental se entienden como entradas los factores que se mantienen constantes a lo largo del proceso. En los dos experimentos realizados en el presente estudio las entradas son:

Selección para el método de dispersión óptimo

- Conductímetro: este dispositivo descrito en el numeral 3.1.4, permite realizar mediciones de conductividad.
- Potenciostato y electrodo serigrafiado: a través del ensayo EIS potencioestático, es posible medir la resistencia a partir de los diagramas de Nyquist. Para lograr esta medición se utilizaron un potenciostato (ver numeral 3.1.6) y un electrodo serigrafiado cerámico (ver numeral 3.2.6).

Medición del cambio de resistividad de los especímenes sometidos a cargas mecánicas

- Maquina universal: con el fin de implementar cíclicos de carga constantes y estables, todos los ensayos de aplicación de cargas de tensión y compresión se realizaron en la maquina universal SHIMADZU descrita en el numeral 3.1.7.

- Potenciostato: la medición de impedancia se realizó mediante el potenciostato con el ensayo EIS de frecuencia simple, que evalúa la respuesta de impedancia a una única frecuencia mientras se monitorea su evolución en el tiempo.

3.3.2 Factores controlables

Los factores que son controlados dentro de los experimentos son:

Selección para el método de dispersión óptimo

- Volumen de muestras: el contenido de agua desionizada (171 gramos) y geometría del recipiente (recipientes de 200 mL) fueron constantes en todos los ensayos.
- Cantidad de MWCNT: la masa utilizada de MWCNT corresponde al 0.5 % y 1.0 % de la masa del cemento para una relación de agua/cemento igual 0.57.
- Dispositivos de dispersión: la dispersión de las muestras fueron realizadas con los dispositivos descritos en los numerales 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3.
- Energía de dispersión: se varían los tiempos y potencias de dispersión en los distintos dispositivos.

Medición del cambio de resistividad de los especímenes sometidos a cargas mecánicas

- Mezcla: los diseños de mezclas empleados en la elaboración de los especímenes de ensayos permanecieron constantes, esto en cuanto a la cantidad de arena, cemento y agua. La única variación se presentó en la adición de MWCNT, en donde se usaron 0.0 %, 0.5 % y 1.0 % de la masa del cemento. El método de dispersión de los MWCNT en el agua fue el seleccionado en el experimento anterior, este método fue usado para todas las mezclas.
- Contenido de agua en los especímenes: para ensayar los especímenes y que la pérdida de agua de estos no represente una variable adicional, los especímenes fueron secados al ambiente del laboratorio hasta alcanzar una masa constante. En la normativa se establece que una muestra puede considerarse constante respecto a la pérdida de contenido de agua cuando la diferencia entre mediciones consecutivas es igual o inferior al 0.1 %, según lo establecido en la norma

NTC 4024 emitida por INCONTEC (2023b) y es equivalente a la ASTM C140. Por otro lado, la norma NTC 5653 emitida por INCONTEC (2008), equivalente a la ASTM C642, permite considerar valores inferiores al 0.5 %. En lo que respecta a los especímenes ensayados en esta investigación se considerara que han alcanzado el equilibrio con el ambiente cuando las mediciones sucesivas no superen el 0.1 % de diferencia.

- Geometría: los especímenes ensayados a compresión fueron cubos de mortero de dimensiones de 50 mm x 50 mm x 50 mm, esto de acuerdo con la norma NTC 220, en cuanto los especímenes sometidos a tensión se utilizaron los moldes especificados en la norma ASTM C190.
- Electrodo: se usaron 3 tipos de electrodos, los cuales varían de material y forma (ver el numeral 3.6.3).

3.3.3 Factores no controlables

Los factores no controlables corresponde a aquellas variables las cuales no se puede tener manipulación directa durante el proceso de experimentación. Para el caso de ambos experimentos se presentan los mismos factores no controlables:

- Humedad relativa (% HR): la humedad relativa es un factor externo y no directamente controlado en los ensayos experimentales. Sin embargo, dado que los ensayos se llevaron a cabo en condiciones controladas de laboratorio que garantizaron la estabilidad en este parámetro ambiental, midiendo la humedad en cada ensayo, no se presentando varianzas significativas. La HR durante los ensayos estuvo en un rango de 60 % a 70 %.
- Temperatura ambiente (T): igualmente que la humedad relativa la temperatura ambiente es un factor no controlable. No obstante, gracias al entorno controlado del laboratorio, las variaciones de temperatura no eran relevantes. Esta estabilidad permitió garantizar la reproducibilidad y validez de los ensayos experimentales, al reducir al mínimo cualquier influencia potencial derivada de cambios en la temperatura. La T durante los ensayos estuvo en un rango de 18.6 °C a 21.1 °C.

3.3.4 Respuesta de salida

La principal respuesta en la selección para el método de dispersión óptimo son los diagramas de Nyquist, los cuales permiten obtener el valor de la resistencia de cada muestra según su método y energía de dispersión. Adicional a esto se realiza una medida de la conductividad utilizando un conductímetro y se realizó una observación visual del comportamiento de las muestras.

En relación con el experimento que mide la variación de resistividad en especímenes sometidos a cargas mecánicas, la respuesta obtenida corresponde a los cambios de impedancia registrados en los especímenes a lo largo del tiempo.

En la **Figura 3-30** se presenta el esquema general del experimento diseñado para la selección del método óptimo de dispersión, mientras que en la **Figura 3-31** se muestra el esquema correspondiente al experimento para evaluar la variación de resistencia en los especímenes sometidos a cargas mecánicas.

Figura 3-30. Esquema del diseño experimental para la selección del método óptimo de dispersión.



Figura 3-31. Esquema del diseño experimental para evaluar la variación de resistividad en los especímenes sometidos a cargas mecánicas a lo largo del tiempo.



3.4 Dispersión de MWCNT

Se llevaron a cabo cuatro métodos distintos de dispersión para los nanotubos como se ha mencionado previamente, estos métodos fueron escogidos debido a su reiterado uso en la bibliografía consultada, siendo los equipos de ultrasonido los más efectivos en cuanto a la dispersión de nanopartículas. Los métodos de dispersión y la metodología utilizada por cada método se describe a continuación:

3.4.1 Método manual

Este método consiste en utilizar un agitador magnético para dispersar los nanotubos en agua desionizada. El proceso consiste en usar una píldora que es introducida dentro de un vaso precipitado con agua desionizada y MWCNT (**Figura 3-32**). La velocidad del dispositivo se estableció aproximadamente en 825 rpm. La ventaja de la agitación magnética introduce una energía mecánica relativamente baja en el sistema, suficiente para mezclar, pero con menos intensidad que dispositivos de ultrasonido, esto significa que los nanotubos no se dañen en el proceso de dispersión.

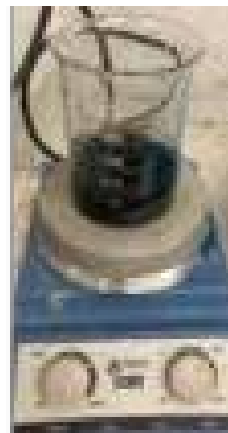
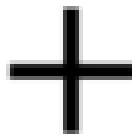
Figura 3-32. Método manual de dispersión, uso de agitador magnetico.



3.4.2 Método manual con superplastificante

El método manual con superplastificante sigue el mismo proceso del método manual descrito anteriormente, con la diferencia que se agregó un aditivo dispersante para cementos (**Figura 3-33**). En esta investigación se empleó el superplastificante descrito en el numeral 3.2.7. La cantidad del aditivo utilizado fue de 0.5 % de la masa del cemento, este porcentaje se encuentra dentro del intervalo recomendado por el fabricante.

Figura 3-33. Método manual con aditivo superplastificante.



3.4.3 Método de ultrasonido por baño

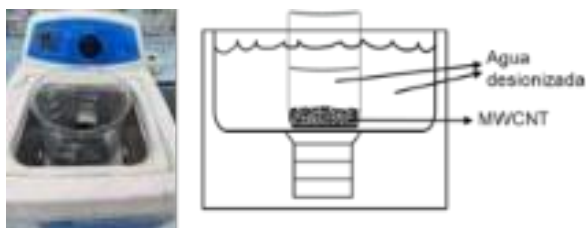
Tal como se ha indicado anteriormente, las técnicas de dispersión mediante dispositivos ultrasónicos resultan ser muy eficientes, en este caso se empleó un baño ultrasónico, este dispositivo se describe en el numeral 3.1.2. En la **Figura 3-34** se ilustra el funcionamiento del baño ultrasónico, el cual consiste en emitir ondas sonoras de alta frecuencia (ultrasónicas) mediante un transductor y que se propagan a través de la solución en el tanque, estas ondas crean fluctuaciones de presión que forman millones de burbujas microscópicas que luego implosionan liberando grandes cantidades de energía, este proceso es conocido como cavitación. La energía liberada puede usarse para homogenizar diversas soluciones, en este caso particular el agua desionizada con los MWCNT.

Figura 3-34. Principios de operación de un baño ultrasónico.



La dispersión de los MWCNT se realizó vertiendo agua desionizada junto a MWCNT en un vaso precipitado, este vaso se introduce dentro del valde con agua igualmente desionizada, siempre teniendo precaución que el nivel del valde sea mayor al nivel del vaso (**Figura 3-35**).

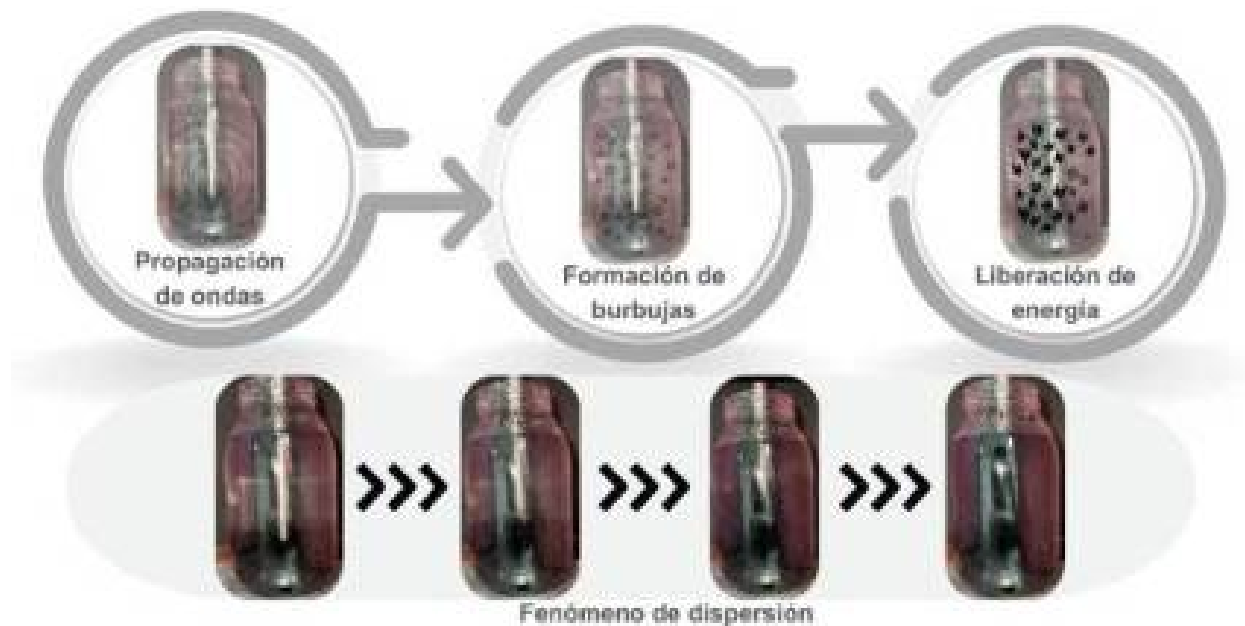
Figura 3-35. Montaje de muestras para dispersión por baño de ultrasonido.



3.4.4 Método de ultrasonido por sonda

La dispersión por sonda ultrasónica es de los métodos más utilizados en múltiples investigaciones, debido a su alta eficiencia en la dispersión de nanopartículas, en especial los MWCNT. El dispositivo descrito en el numeral 3.1.1 se utilizó para llevar a cabo este método de dispersión. El ultrasonido por sonda convierte la energía eléctrica en vibraciones de alta frecuencia, estas vibraciones generan ondas ultrasónicas directamente dentro de la muestra, provocando ciclos rápidos de alta y baja presión que intensifican el fenómeno de cavitación (**Figura 3-36**), resultando en una dispersión superior a la lograda por el método de baño. Una de las ventajas de utilizar un *sonifier* es la posibilidad de variar la potencia aplicada a la muestra, sin embargo, es recomendable no superar del 80 % de la amplitud del dispositivo ya que puede causar daños en las muestras.

Figura 3-36. Principios y fenómeno del ultrasonido por sonda.



El procedimiento contemplado en esta metodología se basa en introducir la sonda en un recipiente de vidrio con agua desionizada y MWCNT (**Figura 3-37**), el *sonifier* tiene la posibilidad de ajustar el tiempo de dispersión y una opción del dispositivo es realizar pulsos. El modo de pulso es especialmente útil en muestras sensibles al calor, ya que permite que la energía ultrasónica se suministre en intervalos en lugar de una aplicación continua, minimizando el sobrecalentamiento.

Figura 3-37. Procedimiento de dispersión por sonda ultrasónica.

3.5 Diseño de mezcla

Con el propósito de cumplir parte del primer objetivo específico, que consiste en diseñar y evaluar mecánicamente mezclas de mortero con nanotubos de carbono, el punto de partida consistió en una revisión bibliográfica. Esta recopilación de información permitió seleccionar los porcentajes de adición más adecuados y aclarar el panorama, evitando pruebas innecesarias con múltiples proporciones. En la **Tabla 3-18** se presentan algunos valores relevantes de adición, esto en función porcentual de la masa total del cemento. En esta investigación se optó por seleccionar dos porcentajes: 0.5 % y 1.0 %. Adicionalmente se realizaron muestras de control, las cuales no contaban con ninguna adición de MWCNT.

Tabla 3-18. Valores de adición de MWCNT reportados en la literatura.

Referencia	% MWCNT de la masa de cemento
Hawreen & Bogas (2019)	0.5 %
Vesmawala et al. (2019)	0.5 %
Farias de Medeiros et al. (2015)	0.5 %
Ruan et al. (2018)	0.5 %
(J. Zhang et al., 2020)	0.5 %
Siahkouhi et al. (2021)	1.0 %
Parvaneh & Khiabani (2019)	1.0 %
Reis et al. (2023)	2.0 %

La selección del 0.5 % y 1.0 % se basó en principio por su amplio uso en las investigaciones consultadas. La adición del 1.0 % se consideró como máxima ya que, en ensayos exploratorios donde se realizaron mezclas con este porcentaje se identificó una disminución significativa en la trabajabilidad de la mezcla. Esto provocaba que tuviera un grado de complejidad, sumado a esto al ser un porcentaje relativamente alto se pretende evaluar si su conductividad es sustancialmente mayor. En cuanto al 0.5 % se consideró igualmente por su gran uso y una trabajabilidad adecuada. Este porcentaje se ha considerado como el más adecuado ya que se puede lograr una alta conductividad eléctrica sin verse afectada su resistencia mecánica. El principal objetivo no es encontrar un porcentaje de adición o un método de dispersión, ya que estos han sido estudiados previamente, en lugar de eso, uno de los objetivos es diseñar la mezcla seleccionando un método de dispersión y el porcentaje añadido de MWCNT que sean convenientes para la elaborar especímenes de mortero con una conductividad eficiente.

El diseño de mezcla elaborado mediante la metodología propuesta por Sánchez & Martínez (2025) se presenta en el **Anexo D**. Los resultados de este procedimiento se resumen en dos tablas: la **Tabla 3-19** muestra las proporciones requeridas para producir un metro cúbico de mortero, mientras que la **Tabla 3-20** recoge las proporciones ajustadas a una masa constante de 300 g de cemento, a efectos de los ensayos de laboratorio y la fabricación de especímenes.

Tabla 3-19. Masas de los distintos materiales del mortero para un volumen de 1 m³.

Material	Masa kg
Cemento	430.6
Agua	244.4
Arena	1181.8
Total	1856.8

Tabla 3-20. Masas de los distintos materiales del mortero con masa constante de cemento de 300 g.

Material	Masa kg
Cemento	300.0
Agua	823.4

Material	Masa kg
Arena	170.3
Total	1293.6

Aunque el diseño preliminar indicaba 823.4 g de arena y 170.3 g de agua, en la fase experimental se adoptaron las proporciones de referencia que se determinan por la norma NTC 220 (825 g de arena y 171 g de agua para 300 g de cemento) con el fin de situar el estudio dentro de un protocolo normalizado y adicionalmente se encuentra respaldado por un diseño metodológico. Esta decisión no introdujo variaciones significativas en las relaciones arena/cemento ni agua/cemento. Las pruebas de compresión y fluidez corroboraron que, aunque se ajustaron las cantidades finales de la mezcla se alcanzó la resistencia objetivo y la trabajabilidad prevista, demostrando que la alineación con la norma garantiza la comparabilidad con otros estudios sin comprometer los resultados del diseño original.

3.5.1 Selección metodología de dispersión de MWCNT

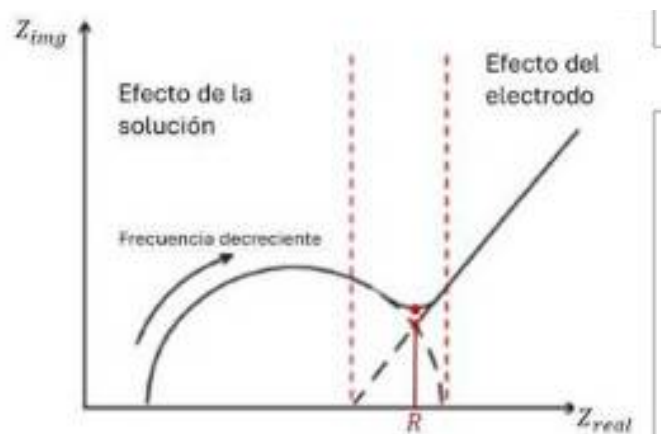
Se exploraron cuatro formas de dispersión de los MWCNT en el agua, estos métodos son descritos en el numeral 3.4, en donde para seleccionar el método más adecuado, se realizó un diseño experimental el cual prioriza la conductividad y resistencia eléctrica como propiedades de interés. Por lo tanto, el método de dispersión que presente la mayor conductividad y menor resistencia será el escogido para realizar la dispersión de los MWCNT.

El experimento para la selección del método óptimo de dispersión consiste en medir la conductividad y resistencia eléctrica en una solución acuosa compuesta por la mezcla de MWCNT y agua desionizada. Se emplean dos modalidades de medición de la conductividad:

La primera consiste en utilizar un electrodo serigrafiado y mediante el potenciostato realizar un ensayo de EIS potenciostático, el cual mide el espectro de impedancia en un rango de frecuencias mientras se mantiene un voltaje constante de corriente alterna. A partir de los datos obtenidos se pueden generar un diagrama de Nyquist que permite identificar que muestra presenta mayor resistencia eléctrica, entre mayores sean los semicírculos de la gráficas, mayor será la resistencia, lo que implica una menor conductividad, ya que ambas

propiedades son inversamente proporcionales. En espectroscopía EIS es común que los semicírculos no sean perfectos debido a la superposición de efectos, como los generados por la matriz cementante y los electrodos. Esta transición indica un comportamiento combinado en la interfaz electrodo-materia, debido a la existencia de esta zona de transición se opta tomar el valor de la resistencia R como se muestra en la **Figura 3-38**, donde este valor representa la resistencia total del material.

Figura 3-38. Identificación de la resistencia en Diagrama de Nyquist para una solución acuosa.



En la **Figura 3-39** se ilustra el montaje para el ensayo de EIS potencioestático mediante un electrodo serigrafiado cerámico, donde el potencioestado se conecta a el kit de conexión universal que permite garantizar una conexión adecuada. El electrodo se introduce 30 mm en el recipiente, asegurando que la zona de contacto quede en el centro del volumen de la solución para mantener una altura constante en las mediciones. Esta ubicación se eligió porque los nanotubos tienden a sedimentarse tras su dispersión, y dependiendo del método empleado, este proceso puede acelerarse o ralentizarse, haciendo que el punto medio sea el más adecuado. En todas las muestras se mantuvo esta disposición. Luego de dispersar los MWCNT en agua, los recipientes se llenaron hasta alcanzar una altura de 28 mm, equivalente a 8.28 mL, de acuerdo con las dimensiones del recipiente.

Figura 3-39. Montaje de electrodos en recipientes de muestras dispersas.



Se realizó un análisis de variabilidad utilizando tres electrodos cerámicos de la misma referencia. El resultado del coeficiente de variación (COV) de los datos obtuvo un valor máximo de 0.96 % para los datos de Z_{Img} (eje Y) y 0.88 % para datos de Z_{Real} (eje X) (**Figura 3-40**), lo que demuestra que la variabilidad debida al cambio de electrodo no es significativa. Con respecto al número de ensayos, se evaluó la repetibilidad a partir de tres pruebas, se analizaron los datos mediante un análisis de COV obteniendo un valor máximo de 0.79 % para los datos de Z_{Img} y 0.86 % para datos de Z_{Real} (**Figura 3-41**). Este análisis permitió confirmar que con un solo ensayo por muestra es suficiente, lo que resulta útil considerando el número de muestras y la necesidad de recolar datos en intervalos de 0 h, 1 h, 3 h, 17 h, 24 h, 48 h y 144 h. Además, debido a que el ensayo EIS potenciostático tiene una duración aproximada de tres a cuatro minutos, optimizar el número de ensayos mejora la eficiencia del proceso. El ensayo se configuró con un rango de frecuencias de 3 MHz a 10 Hz, utilizando un voltaje de corriente alterna constante de 30 mV.

Figura 3-40. Análisis de la repetibilidad de Series de datos variando el electrodo serigrafiado con barras de Error y COV Máximo.

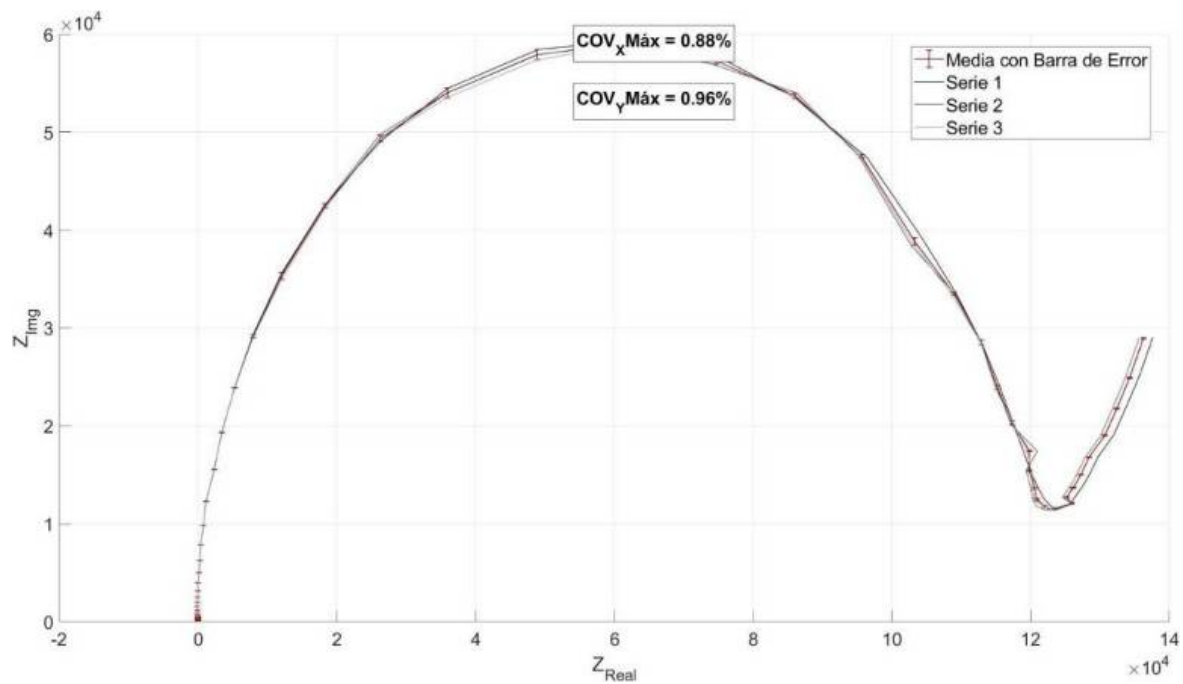
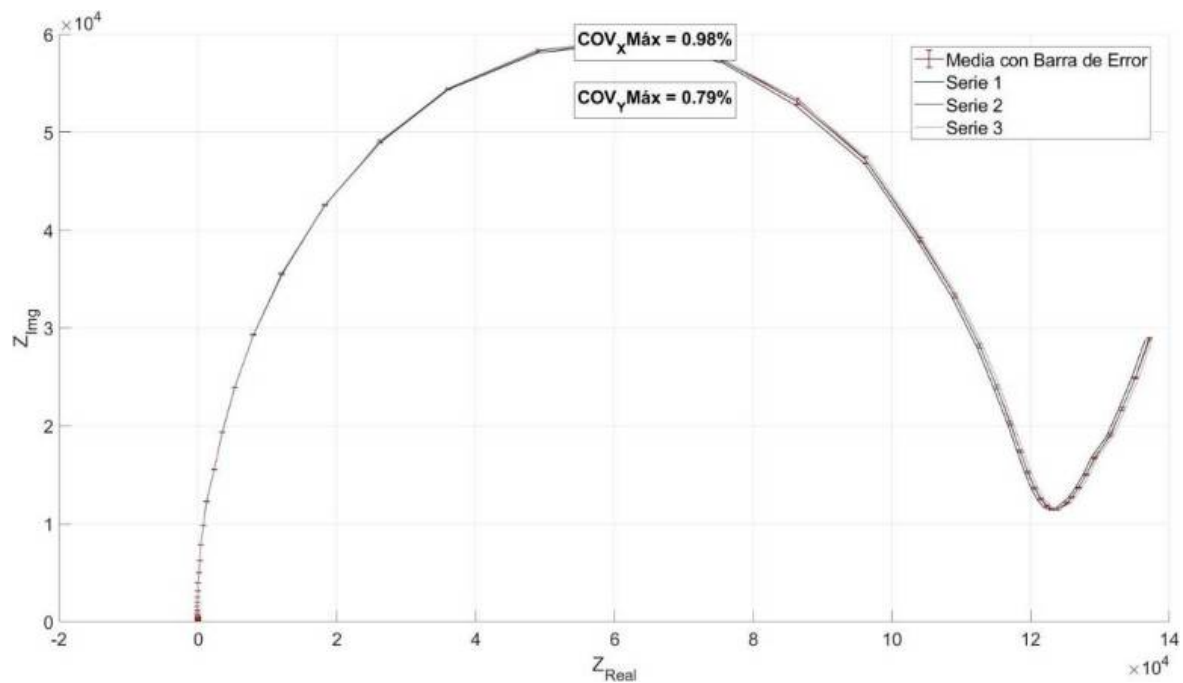


Figura 3-41. Análisis de la repetibilidad de Series de datos de una sola muestra con barras de Error y COV Máximo.



La segunda metodología emplea un conductímetro de mesa (ver numeral 3.1.4) para medir la conductividad eléctrica de la solución de forma cuantitativa. El objeto de esta medición es verificar la relación entre la resistencia obtenida de los semicírculos de los diagramas de Nyquist y la medida del conductímetro en la solución. En este sentido, una menor resistencia obtenida en el diagrama de Nyquist indica una mayor conductividad y el valor obtenido con el conductímetro permite respaldar esa correlación.

La medición de conductividad en las distintas muestras se realizó bajo el siguiente proceso (**Figura 3-42**); inmediatamente después de la dispersión de los MWCNT en el agua desionizada se vertió esta solución en tubos graduados para centrifuga tipo Falcon, llenándolos hasta un volumen de 40 mL. Durante la medición la conductividad, cada tubo se colocó en un montaje dispuesto para mantener el conductímetro en una posición fija y constante. Al igual que en la metodología utilizada con los electrodos serigrafiados y el potencióstato, la medición se realizó a la mitad del volumen del recipiente.

Figura 3-42. Procedimiento para la medición de conductividad eléctrica.



Complementario a las dos metodologías cuantitativas de medición descritas anteriormente, se realizó un registro fotográfico de las muestras para llevar un seguimiento visual. Las fotografías de los tubos se tomaron en los mismos intervalos de tiempo establecidos en las mediciones cuantitativas, permitiendo un análisis comparativo de su evolución.

Se implementó un montaje que permitió obtener la misma distancia focal en todas las fotografías, acompañado de una iluminación uniforme para minimizar diferencias en la

exposición lumínica. Este montaje se presenta en la **Figura 3-43**. Además, se utilizó una hoja milimetrada como referencia dimensional.

Figura 3-43. Montaje para toma de fotografías.



Los parámetros de los diferentes métodos de dispersión se presentan en la **Tabla 3-21**, especificando el método aplicado y la duración de cada dispersión. En particular, para el método de ultrasonido por sonda se detalla el porcentaje de amplitud, que permite variar la potencia suministrada por el dispositivo. La energía reportada en la tabla fue calculada multiplicando la potencia (en vatios, W) del dispositivo por la duración del ensayo (en segundos). Posteriormente, se calculó la relación energía-masa dividiendo esta energía total entre la masa combinada del agua desionizada y los MWCNT utilizados en cada muestra. Para todas las muestras la cantidad de agua fue de 171 g, determinada para mantener una relación agua/cemento de 0.57, con lo cual se estableció una masa constante de cemento de 300 g. La cantidad de MWCNT empleados en cada muestra fueron determinados como un porcentaje respecto a la masa del cemento. Además, en los casos que se incluye un aditivo superplastificante, su cantidad fue siempre del 0.5 % respecto a la masa del cemento. Por último, también se reportan las temperaturas inicial y final registradas antes y después de la dispersión para cada método evaluado.

Tabla 3-21. Parámetros utilizados en los métodos de dispersión evaluados.

	Método de dispersión	ID	Tiempo (min)	Amplitud (%)	Energía (J)	MWCNT (g)	J/g	Aditivo superplastificante (g)
	Ultrasonido por baño	1	60	-	252000	1.50	1460.87	-

	Método de dispersión	ID	Tiempo (min)	Amplitud (%)	Energía (J)	MWCNT (g)	J/g	Aditivo superplastificante (g)
0.5 % MWCNT	Ultrasonido por baño	2	30	-	126000	1.50	730.43	-
	Ultrasonido por baño	3	10	-	42000	1.50	243.48	-
	Ultrasonido por baño	4	5	-	21000	1.50	121.74	-
	Ultrasonido por sonda	5	5	50	60000	1.50	347.83	-
	Ultrasonido por sonda	6	5	60	72000	1.50	417.39	-
	Ultrasonido por sonda (pulsos)	7	5	50	60000	1.50	347.83	-
	Ultrasonido por sonda	8	5	70	84000	1.50	486.96	-
	Manual	9	5	-	-	1.50	-	-
	Manual	10	10	-	-	1.50	-	-
	Manual con aditivo	11	5	-	-	1.50	-	1.50
	Ultrasonido por sonda (pulsos)	12	5	50	60000	1.50	344.83	1.50
1.0 % MWCNT	Ultrasonido por baño	13	5	-	21000	3.00	120.69	-
	Ultrasonido por sonda (pulsos)	14	5	50	60000	3.00	344.83	-
	Manual	15	5	-	-	3.00	-	-
	Manual con aditivo	16	5	-	-	3.00	-	1.50

En la etapa preliminar se realizaron ensayos exploratorios para evaluar el desempeño de los dispositivos y analizar el comportamiento de las muestras durante la dispersión. A partir de estos ensayos, se establecieron los parámetros detallados en la **Tabla 3-21**, lo que permitió una medición y evaluación más eficiente de cada método.

El porcentaje de 0.5 % fue seleccionado para realizar variaciones en los parámetros de dispersión debido principalmente a dos razones: primero, porque una mayor concentración implicaría más cantidad de MWCNT y su disponibilidad era limitada; segundo, porque este porcentaje es ampliamente utilizado en la bibliografía consultada. Para este porcentaje específico se realizaron ensayos adicionales variando el tiempo y la amplitud según el método empleado. En el método de ultrasonido por baño se evaluaron tiempos de dispersión de 60 min, 30 min, 10 min y 5 min, con el objetivo de analizar si una mayor energía suministrada mejora significativamente la calidad de la dispersión. En el método de ultrasonido por sonda, se optó por mantener un tiempo constante de 5 minutos, variando únicamente la amplitud del dispositivo para analizar su efecto. Además, con el ultrasonido por sonda se realizó una dispersión mediante pulsos (sonificación intermitente cada 20 segundos), con la finalidad de controlar la temperatura de la muestra. Por otro lado, el

método manual fue evaluado únicamente con dos tiempos (5 min y 10 min), ya que pruebas preliminares mostraron que tiempos mayores no generaban mejoras significativas. Finalmente, se estudió la influencia del aditivo superplastificante, incorporándolo al método manual y también al método de dispersión mediante ultrasonido por sonda, con el fin de evaluar su efecto sobre la dispersión.

En cuanto a las muestras con de 1.0 % de MWCNT se ensayaron los cuatro métodos de dispersión, manteniendo un tiempo fijo de 5 minutos en cada uno. En el caso del método por sonda, se implementó un sistema de pulsos de 20 segundos para evitar elevaciones excesivas de temperatura.

3.5.2 Elaboración de mezcla de morteros

La cantidad de agua necesaria para la realización de la mezcla se debe determinar con los valores obtenidos en el ensayo de fluidez. La norma NTC 5784 emitida por INCONTEC (2021) y equivalente a ASTM C1437, establece el procedimiento para la determinación de la fluidez en morteros de cemento hidráulico. El proceso se inicia con la disposición del molde en el centro de la mesa de flujo, en la que el mortero se introduce en dos capas y cada una se compacta mediante 20 impactos del apisonador. Posteriormente, la superficie se alisa y, tras un lapso de un minuto, se procede a la extracción del molde. Luego, la mesa se somete a una caída de 25 veces en un periodo de 15 segundos, lo cual facilita la expansión del mortero. Finalmente, el diámetro se cuantifica en cuatro direcciones y se determina la fluidez como el porcentaje de incremento en relación con el diámetro inicial del molde (**Figura 3-44**). Este ensayo proporciona un criterio de evaluación para la trabajabilidad del mortero en condiciones controladas, el valor de la fluidez debe ser de $110 \% \pm 5 \%$. El porcentaje obtenido fue de 108.88 % (**Tabla 3-22**) lo que resulta en una relación agua/cemento (a/c) de 0.57 con el cemento descrito en el numeral 3.2.1 y agua desionizada sin ningún tipo de adición.

Figura 3-44. Determinación de la fluidez.**Tabla 3-22.** Datos y cálculo de la fluidez.

Medida	Diámetro (cm)
1	209.91
2	206.83
3	209.40
4	209.37
Promedio	208.88
Fluidez	108.88 %
Relación a/c	0.57

Una vez definido el método de dispersión óptimo, los MWCNT se dispersaron primero en la totalidad del agua desionizada utilizada en la mezcla. El proceso para la elaboración de la mezcla sigue los pasos de la norma NTC 112 emitida por INCONTEC (2017a) y es equivalente a la ASTM C305:

- Se agrega toda el agua con los MWCNT en el recipiente.
- Se incorpora el cemento y se mezcla a baja velocidad durante 30 segundos.
- Mientras continúa la mezcla, se añade la arena de forma gradual durante 30 segundos, la relación de arena/cemento es 2.75.
- Se cambia a velocidad media y se mezcla durante 30 segundos adicionales.
- Se detiene la máquina y se deja reposar la mezcla durante 90 segundos:
 - En los primeros 15 segundos, se raspa el material adherido a las paredes del tazón.
 - Durante el tiempo restante, se cubre el tazón para evitar la evaporación.

- Finalmente, se mezcla a velocidad media durante 60 segundos más.

Evaluación de la expansión por reacción álcali-sílice (RAS) en barras de mortero

El método de barras de mortero descrito en la norma NTC 6222 emitida por INCONTEC (2017b) y equivalente a ASTM C1260 se empleó para evaluar la reactividad potencial de un agregado altamente reactivo frente a los álcalis. El agregado usado es clasificado como tipo R3 según la guía ASTM C1778. Esta norma permite detectar en un periodo corto (16 días) la expansión interna que puede generar una reacción álcali-sílice.

Para explorar el efecto de los MWCNT, se fabricaron barras de mortero empleando cemento portland y un agregado silíceo de alta reactividad, ajustándose exactamente a los procedimientos de la norma. Se dosificaron tres mezclas: una de control sin MWCNT y otras con 0.5 % y 1.0 % de MWCNT en masa de cemento. Cada muestra se sumergió en una solución de NaOH a 80 °C y se midió su alargamiento periódicamente, con el fin de comprobar de qué modo la adición de MWCNT afecta la expansión provocada por la RAS.

Este ensayo es adicional ya que el objetivo de la investigación no es evaluar la durabilidad de la mezcla. Sin embargo, algunos autores han destacado su mejora en la durabilidad de morteros con adición de MWCNT.

3.6 Ensayos mecánicos

La evaluación de las propiedades mecánicas del mortero con adición de MWCNT es importante para comprender el efecto de los MWCNT en el comportamiento del material. En este sentido, se presenta la metodológica adoptada para los ensayos de compresión, tensión y flexión, destacando las técnicas y procedimientos utilizados para asegurar la validez técnica de los resultados. Estas metodologías y procesos se basan en normas nacionales como internacionales, por lo cual se siguieron cuidadosamente. A continuación, se describe la metodología de las normas utilizadas para los tres tipos de ensayos: compresión, tensión y flexión. Para cada uno, se elaboraron tres tipos de mezclas: una mezcla sin adición de MWCNT, la segunda con un 0.5 % y la tercera con un 1.0 %, en ambos casos en relación con la masa del cemento utilizado.

3.6.1 Compresión

La norma referente para la aplicación de este ensayo es la NTC 220, la cual establece el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de morteros preparados con cementos hidráulicos, mediante la fabricación y ensayo de especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas). Al medir la resistencia a la compresión, garantiza que la mezcla utilizadas pueda soportar adecuadamente las cargas previstas, proporcionando así criterios para aceptación o rechazo de los materiales.

El procedimiento para la elaboración de tres especímenes es el siguiente:

- Proporciones: 300 g de cemento (ver numeral 3.2.1), 825 g de arena 20 - 30 (ver numeral 3.2.2).
 - Para cementos tipo Portland, Portland con caliza y cementos con incorporadores de aire, se usa un contenido de agua fijo especificado. Para otros cementos, la cantidad de agua se ajusta hasta obtener una fluidez de $110 \pm 5 \%$ en la mesa de flujo. Con la relación de a/c determinada en el ensayo NTC 112 y respaldada en el diseño de mezcla, se puede calcular la cantidad de agua, esto se representa mediante la ecuación (3.1).

$$\frac{a}{c} = 0.57; a = 300 \times 0.57 = 171 \text{ g} \quad (3.1)$$

Donde:

a es la cantidad de agua (g)

c es la cantidad de cemento (g), 300 g

- Se mezclan los materiales mecánicamente según la metodología descrita en la norma NTC 112.
- Los cubos se llenan en dos capas y cada capa es compactada con 32 golpes distribuidos en cuatro rondas perpendiculares entre sí.
- Después del moldeado, los cubos permanecen un día en el molde en cámara húmeda (HR mínima de 95 %); luego se desmoldan y se sumergen en agua con cal hasta su ensayo.
- El intervalo máximo permisible entre especímenes de la misma mezcla y edad es del 8.7 % del promedio cuando se usan tres cubos.

Este procedimiento se lleva a cabo cuatro veces, con el objetivo de realizar los ensayos a las edades de 1, 3, 7 y 28 días. En la **Figura 3-45** se presenta esquemáticamente este proceso.

Condiciones para el ensayo:

- Antes del ensayo, se limpian y secan superficialmente los especímenes.
- La velocidad de carga especificada por la norma para el ensayo de compresión es de 900 N/s a 1800 N/s, la velocidad con la que se realizó el ensayo fue de 1500 N/s.
- Temperatura y humedad relativa en el laboratorio debe ser de 23 ± 3 °C y mínimo 50 % respectivamente.

La resistencia a la compresión (f_m) se calcula mediante la ecuación (3.2).

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Donde:

f_m es la resistencia a la compresión en MPa

P es la máxima carga aplicada en Newtons

A es la área del espécimen en mm²

3.6.2 Tensión

Si bien el ensayo de morteros a tensión directa ya no se realiza de forma habitual en la industria de la construcción, esta investigación tomó como referencia la última versión de la norma ASTM C190. El objetivo de esta norma es establecer un método estandarizado para medir la resistencia a la tensión de morteros hidráulicos utilizando especímenes tipo briqueta. Este método está orientado principalmente a investigaciones relacionadas con la resistencia a tensión y permite evaluar comparativamente la resistencia en tensión de distintas mezclas. La resistencia a tensión del mortero permite evaluar su capacidad frente a esfuerzos indirectos como la contracción y cambios térmicos.

El procedimiento para la preparación de estos moldes tipo briquetas es el siguiente:

- Proporciones: 300 g de cemento (ver numeral 3.2.1), 825 g de arena 20 - 30 (ver numeral 3.2.2).
- Agua de mezcla: relación a/c 0.57, para 300 g de cemento 171 g de agua desionizada, calculado a partir de la ecuación (3.1).
- Se mezclan los materiales mecánicamente según la metodología descrita en la norma NTC 112.
- Los especímenes tipo briqueta se moldean llenando los moldes en dos etapas, ejerciendo presión con el apisonador para asegurar compactación uniforme.
- Después del moldeo, los especímenes se almacenan durante 20 a 34 horas en un cuarto húmedo con humedad relativa superior al 95 %.
- Posteriormente se desmoldan e inmediatamente se sumergen en agua saturada con cal hasta el día del ensayo.

Al igual que el ensayo de compresión este procedimiento se lleva a cabo cuatro veces, con el objetivo de realizar los ensayos a las edades de 1, 3, 7 y 28 días. En la **Figura 3-45** se presenta esquemáticamente este proceso.

Condiciones para el ensayo:

- Antes del ensayo, se limpian y secan superficialmente los especímenes.
- La velocidad de carga especificada por la norma para el ensayo de tensión es 44.5 ± 1.83 N/s, la velocidad con la que se realizó el ensayo fue de 44 N/s.
- Temperatura y humedad relativa en el laboratorio debe ser de 23 ± 3 °C y mínimo 50 % respectivamente.
- Los especímenes que presenten fallas o desviaciones de más del 15% con respecto al promedio se consideran defectuosos y deben descartarse.

La resistencia a la tensión (f_t) se calcula mediante la ecuación (3.3).

$$f_t = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Donde:

f_t es la resistencia a la tensión en MPa

P es la máxima carga aplicada en Newtons

A es la área efectiva transversal en la sección central del espécimen briqueta en mm²

3.6.3 Flexión

El ensayo de flexión permite evaluar la capacidad de las mezclas de mortero para resistir esfuerzos de flexión, lo que ayuda a analizar el comportamiento del material. La norma NTC 120 establece el procedimiento que permite determinar la resistencia a la flexión de morteros fabricados con cemento hidráulico.

El procedimiento para la preparación de estos moldes tipo prismas es el siguiente:

- Proporciones: 625 g de cemento (ver numeral 3.2.1), 1718.75 g de arena 20 - 30 (ver numeral 3.2.2).
- Agua de mezcla: relación a/c 0.57, para 625 g de cemento 356.25 g de agua desionizada, calculado a partir de la ecuación (3.1).
- Se mezcla mecánicamente siguiendo los métodos indicados NTC 112.
- Moldeo de especímenes: prismas de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm.
- Compactación manual en dos capas, con 12 golpes por capa mediante un apisonador.
- Curado: los prismas permanecen en los moldes por 24 horas en cámara húmeda, con humedad relativa superior al 95 %.
- Luego se desmoldan e inmersión en agua con cal hasta el día del ensayo.

De forma similar al ensayo de compresión se ensayaron las muestras a edades de 1, 3, 7 y 28 días, con el fin de evaluar la evolución del comportamiento del material en el tiempo.

La **Figura 3-45** muestra este proceso de forma esquemática.

Condiciones para el ensayo:

- Antes del ensayo, se limpian y secan superficialmente los especímenes.
- La velocidad de carga especificada por la norma para el ensayo de flexión es de 2500 N/min y 2800 N/min, la velocidad con la que se realizó el ensayo fue de 2650 N/min.
- Temperatura y humedad relativa en el laboratorio debe ser de 23 ± 3 °C y mínimo 50 % respectivamente.
- Se deben descartar especímenes defectuosos cuyas resistencias difieran en más del 10% del promedio obtenido

La resistencia a la flexión (S_f) se calcula mediante la ecuación (3.4).

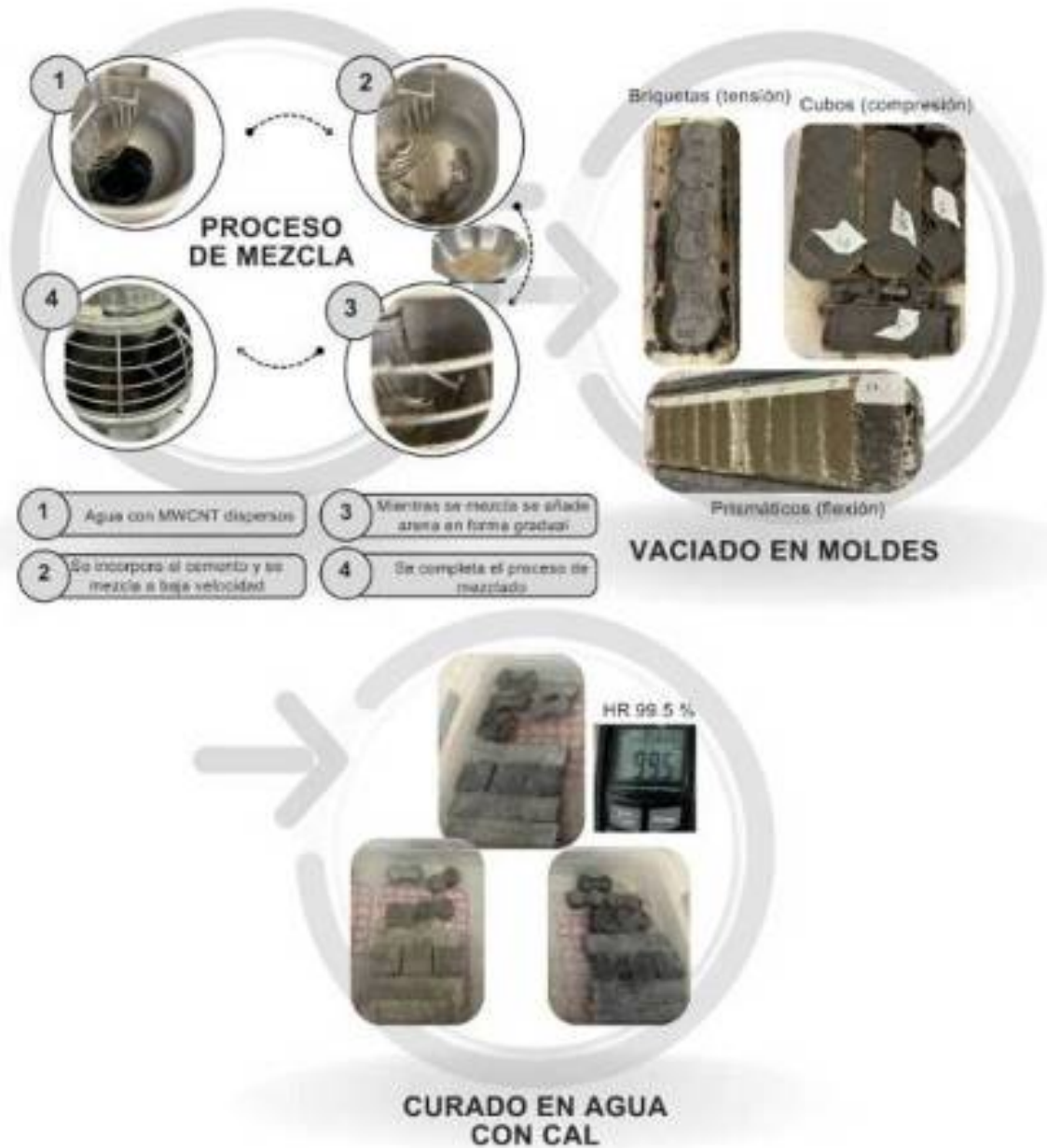
$$S_f = 0.0028 \times P \quad (3.4)$$

Donde:

f_t es la resistencia a la flexión en MPa

P es la máxima carga aplicada en Newtons

Figura 3-45. Proceso de elaboración de especímenes para ensayos mecánicos.



3.7 Diseño de electrodos

En los ensayos para medir la impedancia eléctrica en especímenes de concreto o mortero los electrodos juegan una función crucial, ya que son el medio a través del cual se induce la señal eléctrica en la muestra y se detectan las variaciones de impedancia debidas a la deformación.

La elección del material y forma de los electrodos comenzó con una revisión bibliográfica realizada en la fase 1, en donde se encontró que los electrodos más utilizados son láminas de cobre o láminas de baquelita con recubrimiento de cobre. No obstante, estas láminas presentaron inconvenientes relacionados con la oxidación al ser embebidas en los especímenes, lo cual afectó negativamente tanto las mediciones eléctricas como la integridad física de las muestras. Este fenómeno se muestra en la **Figura 3-46**, donde se observa la formación de burbujas en la superficie de baquelita, lo que provocó grietas e incluso la fractura de algunos especímenes. Debido a esto, se optó por usar láminas de acero inoxidable, que no mostraron estos inconvenientes. Adicionalmente, considerando que un electrodo demasiado grande podría alterar el comportamiento estructural del concreto, se optó por ensayar una malla fabricada con alambres de acero inoxidable. Esta configuración permitió mantener un área considerable de contacto eléctrico, al tiempo que se lograba una mejor integración con la matriz del mortero tras la hidratación. Por último, se ensayó un electrodo serigrafiado el cual no había sido utilizado anteriormente para ensayos de piezoresistividad.

Figura 3-46. Efecto de la oxidación en baquelitas de cobre embebidas en el mortero.



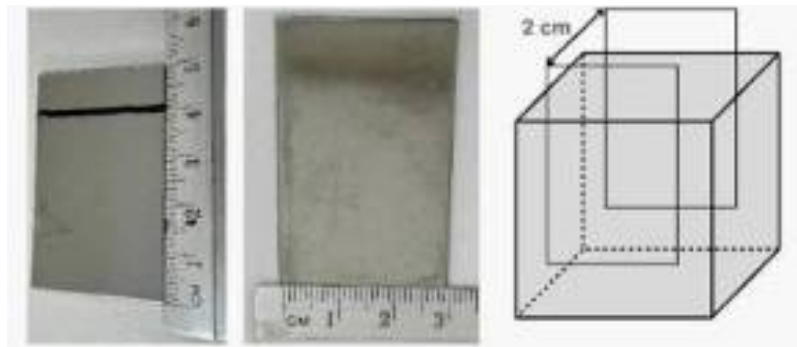
Dependiendo del objetivo del ensayo y del equipo disponible, se pueden emplear distintas configuraciones en cuanto al número de electrodos y su disposición geométrica en la muestra. Las configuración más común en materiales cementicos con MWCNT son de dos y cuatro electrodos, el electrodo serigrafiado en particular trabajan con tres electrodos. Los electrodos pueden ubicarse superficialmente o ser embebidos cuando la mezcla esta fresca, esta decisión afecta la precisión y el tipo de respuesta eléctrica obtenida. La ubicación embebida suele brindar una mejor representación del comportamiento electromecánico, por esta razón se prefirió embeberlos. La configuración de los electrodos fue de dos electrodos (2 puntos).

Los electrodos serigrafiados son relevantes en ensayos electroquímicos sobre materiales cementicos, debido a su configuración compacta. Esta configuración normalmente incluye tres electrodos impresos directamente sobre la superficie: un electrodo de trabajo, responsable directo de medir las propiedades del concreto modificado; un electrodo contador, que completa el circuito eléctrico facilitando la circulación de la corriente; y un electrodo de referencia, esencial para medir de manera independiente el potencial eléctrico del electrodo de trabajo, asegurando así una mayor exactitud en las mediciones. El electrodo fue embebido en los especímenes al igual que los demás electrodos (**Figura 3-51**).

Se optó por usar un electrodo serigrafiado con sustrato cerámico, debido a que en los ensayos preliminares demostró un desempeño más estable. Los electrodos con sustrato PET se descartaron porque: se desgastan con facilidad, arrojan lecturas menos precisas, exhiben una alta variabilidad y además no son reutilizables.

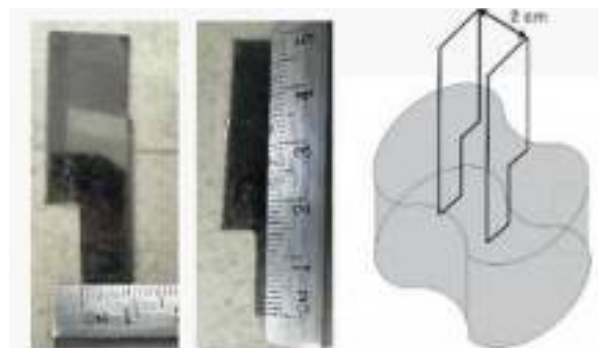
Las dimensiones de los electrodos de lámina de acero inoxidable fueron de 3 cm x 5 cm de los cuales 4 cm están embebidos dentro del espécimen. Esta área fue seleccionada a partir de la revisión bibliografía ya que proporciona mediciones eléctricas estables debido a una adecuada superficie de contacto permitiendo una distribución uniforme de la corriente eléctrica, sin alterar significativamente la resistencia mecánica del mortero (**Figura 3-47**).

Figura 3-47. Electrodo de lámina de acero inoxidable embebidos en cubos.



De igual modo los especímenes tipo briqueta se emplearon electrodos elaborados con lámina de acero inoxidable, pulidos previamente hasta alcanzar dimensiones finales de 1 cm x 1.5 cm, embebiendo completamente dicha área dentro del material. Este tamaño reducido responde a afectar en lo menor posible su estabilidad estructural y que cuente con una área de contacto eléctrico considerable (**Figura 3-48**).

Figura 3-48. Electrodo de lámina de acero inoxidable embebidos en briquetas.



La configuración de los electrodos en forma malla de alambre de acero tienen una sección de retícula de 3.5 cm por 3.0 cm cuando se utilizan en especímenes cúbicos de mortero, donde se embebieron a una profundidad de 4 cm (**Figura 3-49**). Para los especímenes tipo briqueta, los electrodos presentan una retícula más pequeña, de 1.5 cm x 1.0 cm, y se embebieron 2 cm dentro del espécimen (**Figura 3-50**). La cuadrícula está formada por cuadros de aproximadamente de 1 cm x 1 cm, la soldadura 95/5 se usó para unir estas mallas.

Figura 3-49. Electrodo tipo malla en especímenes cúbicos.

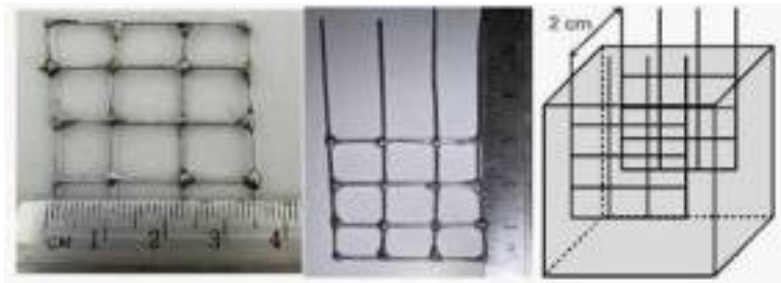
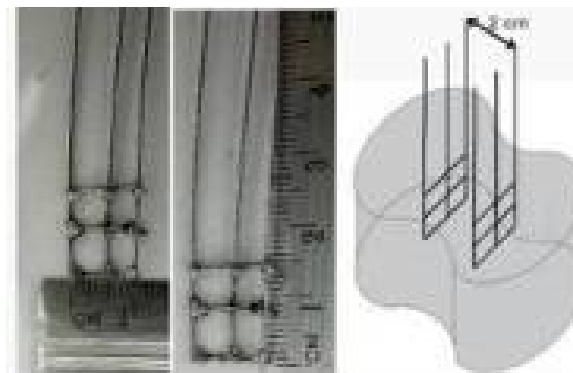
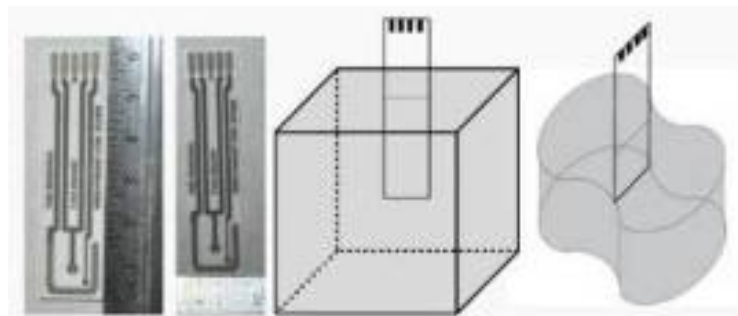


Figura 3-50. Electrodo tipo malla en especímenes en forma de briqueta.



Con respecto a los electrodos serigrafiados, sus dimensiones son de 1.5 cm x 6 cm, en donde se embebe 3.0 cm en los especímenes cúbicos y 2.0 cm en los de tipo briqueta. Esta disposición tiene como propósito garantizar que la región de contacto eléctrico del electrodo se sitúe en la parte central de los especímenes, lo que promueve una distribución equitativa de la corriente eléctrica. La selección de este emplazamiento central tiene como objetivo lograr resultados más representativos y precisos, minimizando los efectos de borde y optimizando la sensibilidad en las mediciones piezoresistivas (**Figura 3-51**).

Figura 3-51. Electrodo serigrafiado embebido en los especímenes.



La cantidad de especímenes ensayados se presenta en la **Tabla 3-23**, por cada electrodo y porcentaje de adición se elaboraron tres especímenes. Sin embargo, debido al alto costo y a la dificultad de adquisición de los electrodos serigrafiados cerámicos, únicamente se dispuso de cinco unidades. Por esta razón, para los especímenes cúbicos se utilizó un electrodo por cada nivel de adición de MWCNT evaluado (0.0 %, 0.5 % y 1 %), mientras que en los especímenes tipo briqueta se utilizaron los dos electrodos restantes para los porcentajes de 0.0 % y 0.5 %.

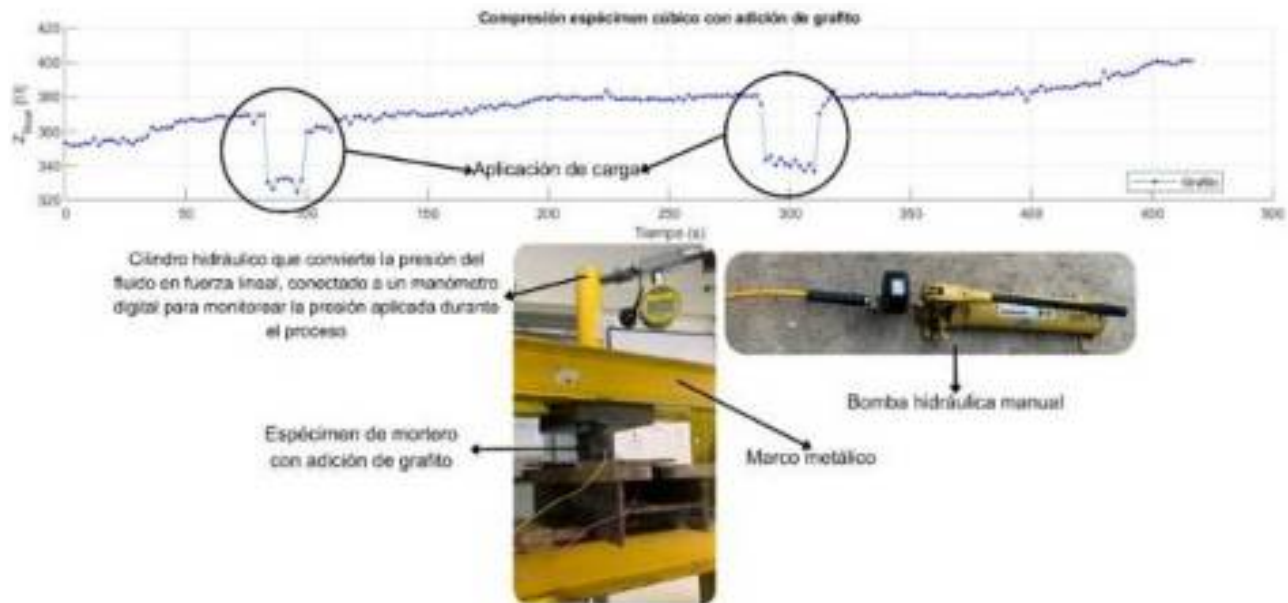
Tabla 3-23. Cantidad de especímenes con electrodos embebidos ensayados.

Adición de MWCNT	Molde	Tipo de electrodo		
		Lamina de acero	Malla de alambre de acero	Electrodo serigrafiado cerámico
0.0 %	Cubo	3	3	1
0.5 %		3	3	1
1.0 %		3	3	1
0.0 %	Briqueta	3	3	1
0.5 %		3	3	1
1.0 %		3	3	-

3.8 Ensayos de impedancia eléctrica sobre especímenes

En la fase 1 de esta investigación se llevaron a cabo ensayos exploratorios con el objetivo de familiarizarse con el funcionamiento de los dispositivos disponibles en el laboratorio, para evaluar la respuesta eléctrica de los especímenes de mortero con adición de MWCNT. Inicialmente, se utilizó adición de grafito en la mezcla de mortero debido a que aún no se contaban con los nanotubos, lo anterior tenía como finalidad probar si el potencióstato con el ensayo de EIS de frecuencia simple se podía identificar cambios de la impedancia al aplicar cargas con una bomba hidráulica manual, en donde se pudo evidenciar como al aplicar carga se registraron cambios en la impedancia, disminuyendo la impedancia al aplicar carga (**Figura 3-52**).

Figura 3-52. Montaje y respuesta eléctrica del espécimen cubico con adición de grafito ante compresión.

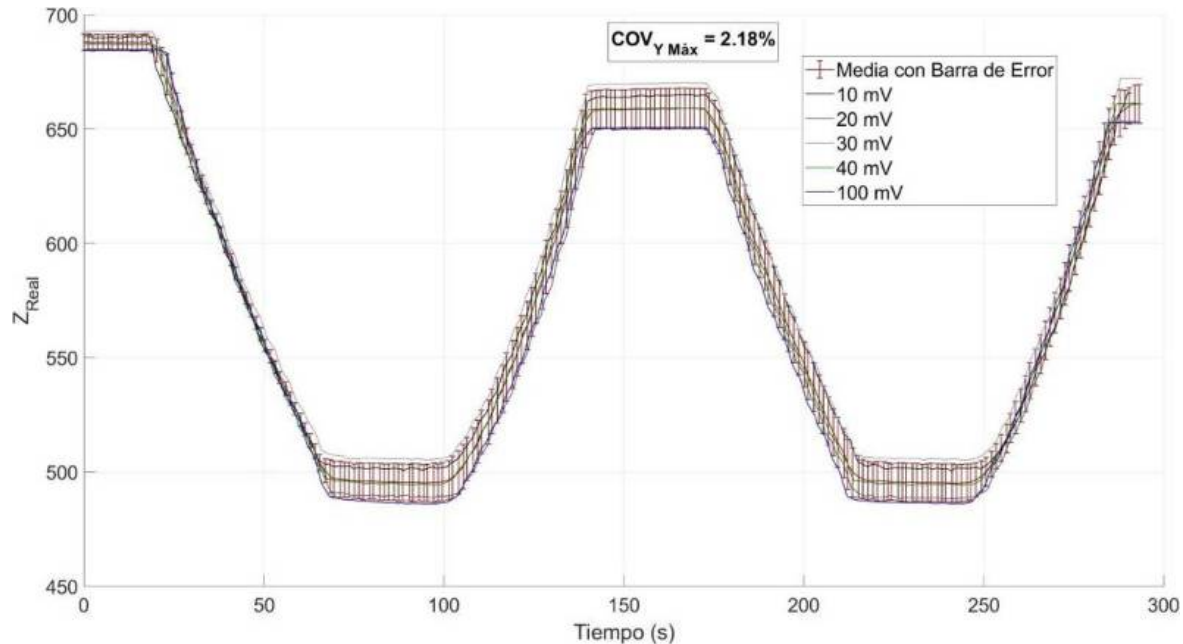


Se empleó un ensayo EIS de frecuencia simple para registrar la respuesta eléctrica, siendo uno de los desafíos más significativos la elección de una frecuencia que asegurara resultados estables. Durante la fase 1, se ensayaron con varias frecuencias con el objetivo de determinar la frecuencia que proporcionara mediciones uniformes durante la aplicación de una carga. Sin embargo, este procedimiento resultó poco viable debido al tiempo requerido y al hecho de que la variación de frecuencia modifica significativamente la respuesta eléctrica del sistema. Por esta razón la frecuencia finalmente escogida fue aquella correspondiente al mínimo valor de la impedancia imaginaria en el diagrama de Nyquist, específicamente en la región intermedia entre el efecto de la matriz y el efecto del electrodo (**Figura 3-38**), el valor de la frecuencia se obtiene del diagrama de Bode (**Figura 2-12**), ya que en esta gráfica se relaciona la impedancia (imaginaria o real) con la frecuencia. Esta frecuencia se seleccionó ya que en este punto la respuesta eléctrica es mayoritariamente resistiva, lo que minimiza los efectos capacitivos, reduciendo el ruido y la variabilidad en las mediciones. También se observó que las altas frecuencias, situadas al principio del semicírculo, tendían a producir más inestabilidad en las mediciones.

Con respecto al voltaje aplicado, se evaluó si este factor influía sobre los resultados de las mediciones de resistencia eléctrica, pero se encontró que las variaciones obtenidas fueron mínimas y poco significativas, ya que se determinó un coeficiente de variación máximo de

2.18 % para un rango de entre 10 mV a 100 mV (**Figura 3-53**). Esto indica que debido al bajo voltaje utilizado su efecto sobre las mediciones no es significativo, el valor de voltaje utilizado en todos los ensayos fue de 100 mV.

Figura 3-53. Ensayo cíclico de carga a compresión, variando el voltaje.



3.8.1 Ciclos de carga

La aplicación de carga se definió mediante dos tipos de ciclos. Pero antes de determinar hasta qué nivel de carga máximo llegar, se tomaron como referencia los resultados de los ensayos mecánicos realizados a los especímenes con cada adición, con base en estos resultados se estableció aplicar aproximadamente el 40 % de la carga máxima en compresión y el 20 % en tensión, con el fin de evitar daños prematuros y obtener una respuesta medible sin comprometer la integridad de los especímenes. Como resultado, se planteó realizar inicialmente tres ciclos de carga de hasta 20000 N, representados en la **Figura 3-54** (Ciclo 1), y posteriormente tres ciclos adicionales donde, tras alcanzar primero los 20000 N, se incrementó la carga hasta 40000 N, como se muestra en la **Figura 3-54** (Ciclo 2), esto para especímenes en forma de cubo. Debido al funcionamiento de la máquina universal, no fue posible reducir completamente la carga a 0 N, por lo que se dejó una precarga constante de 100 N. En el caso de los ensayos a tensión para especímenes en forma de briquetas se aplicó la misma metodología, pero con valores reducidos dado el

comportamiento más frágil del material bajo tensión; los primeros tres ciclos alcanzaron una carga de 200 N (**Figura 3-55**, Ciclo 1) y los tres siguientes llegaron hasta 400 N (**Figura 3-55**, Ciclo 2), manteniéndose también una precarga de 60 N para evitar la descarga total. La velocidad en los ciclos de carga y descarga en tensión fue de 0.1 mm/min y 0.4 mm/min en compresión.

Figura 3-54. Ciclos de carga para ensayos de compresión.

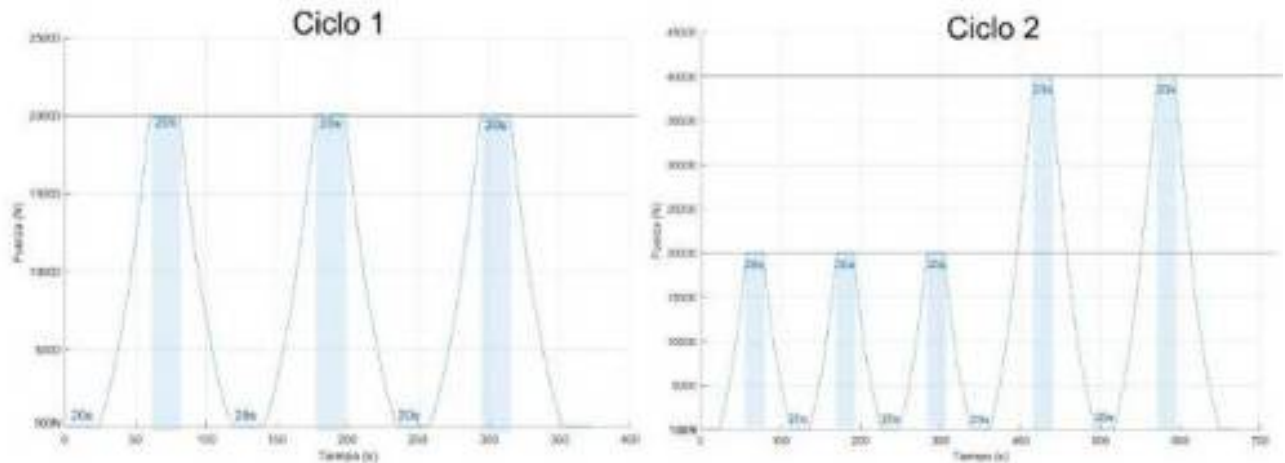
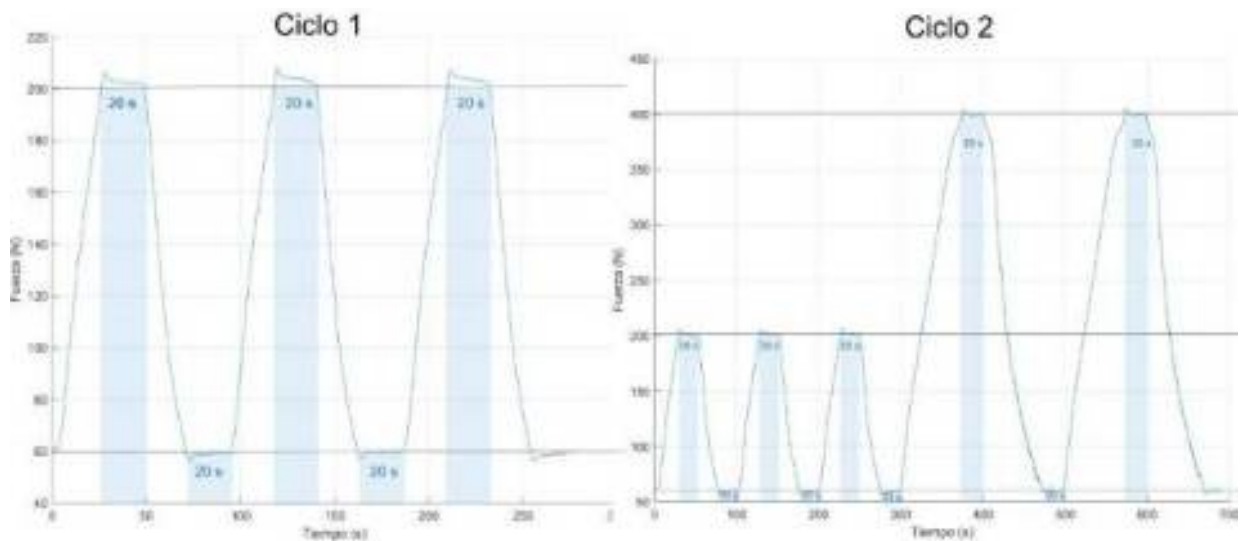


Figura 3-55. Ciclos de carga para ensayos de tensión.



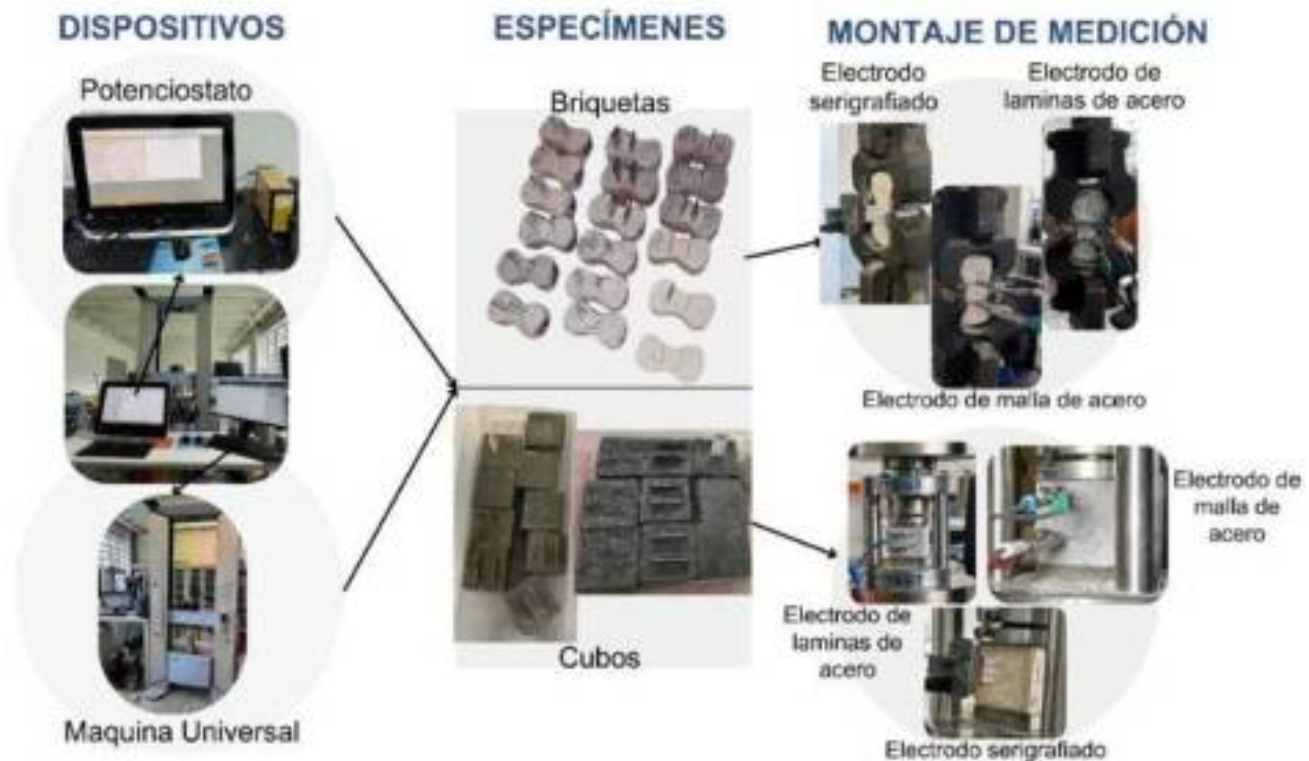
Se efectuaron tres repeticiones de cada ciclo por espécimen para asegurar la reproducibilidad de los resultados. Como etapa final, se llevó a cabo el Ciclo 2, permitiendo que la carga aumentara de forma continua al final del ciclo hasta alcanzar la falla.

3.8.2 Monitoreo mediante el Cambio Fraccional en la Resistencia (FCR)

El FCR es una herramienta válida para evaluar el comportamiento piezoresistivo en materiales compuestos multifuncionales, como es el caso de los especímenes de mortero con adición de MWCNT. Al realizar las mediciones eléctricas a partir del ensayo EIS de frecuencia simple se obtienen datos de impedancia a lo largo del tiempo. Para analizar estos resultados se emplea el FCR definido en la ecuación (2.9) en valor absoluto, esta ecuación relaciona la resistencia inicial R_0 con resistencia registrada en cada instante R , lo que permite monitorear de manera efectiva los cambios de resistencia al momento de aplicar cargas mecánicas a los especímenes. El uso del FCR normaliza y uniformiza los datos sin importar el tipo de electrodo empleado, ya que diferentes electrodos pueden variar los valores absolutos de impedancia debido a diferencias en las interacciones electrodo matriz cementante. Como también las diferentes porcentajes de adición de MWCNT.

Es importante mencionar que el valor de resistencia que se toma del ensayo EIS es el valor de la impedancia real (Z_{real}), ya que equivale a la resistencia óhmica R en el sistema.

El proceso para realizar las mediciones se llevó a cabo de acuerdo como se propuso en el diseño experimental: Medición del cambio de resistividad de los especímenes sometidos a cargas mecánicas. El montaje de este experimento se presenta en la **Figura 3-56**, en donde se utilizó el potencióstato para realizar la medición de la impedancia y la maquina universal encargada de aplicar cargas mecánicas (fuerza de compresión o de tensión). Los ciclos de carga se programaron en la maquina universal y se activaban de forma paralela con el inicio de la medición en el potencióstato. Para lograr esta coordinación se contaba con un retraso de 5 segundos en el potencióstato, lo que permitía poner en funcionamiento ambos dispositivos de manera simultánea.

Figura 3-56. Montaje y proceso de medición eléctrica.

3.9 Metodología para correlacionar datos

Para estudiar cómo se correlaciona la impedancia con respecto a la fuerza aplicada, primero se obtuvieron datos de fuerza (N) e impedancia real (Ω) de cada configuración de electrodos con una adición de MWCNT del 0.5 %, ya que esta concentración ofrece un rendimiento equilibrado sin alterar demasiado la trabajabilidad de la mezcla. Estos valores emparejados se sometieron a regresiones polinómicas de diferentes grados, específicamente cuadráticas (segundo orden) y cúbicas (tercer orden), para identificar el comportamiento en la relación fuerza-impedancia. El grado seleccionado del polinomio se basó en observaciones preliminares que sugerían que la respuesta del material bajo las cargas cíclicas no sigue estrictamente una tendencia lineal.

El método consiste en ajustar los datos a la función polinómica seleccionada, produciendo así una ecuación del tipo $F = a + bZ + cZ^2 (+ dZ^3)$, donde Z es la impedancia y F es la fuerza. La idoneidad de cada modelo se evaluó examinando indicadores estadísticos clave (por ejemplo, coeficiente de determinación, R^2), con el objetivo de identificar qué grado polinómico ofrece la representación más precisa de los datos experimentales.

4. Discusión y análisis de resultados

Los resultados obtenidos durante la fase experimental de la investigación se presentan y examinan en este capítulo. En condiciones de carga regulada, el estudio comprende ensayos mecánicos y eléctricos, incluidas mediciones de impedancia. Se subrayan los efectos de la carga mecánica, ya sea de compresión o de tensión, sobre el comportamiento eléctrico de los compuestos base cemento, incluida la adición de MWCNT. Haciendo énfasis en el componente real de la impedancia, que es un indicador fundamental del comportamiento resistivo en condiciones de corriente alterna, se presta especial atención al cambio de la respuesta eléctrica (FCR) a lo largo de los ciclos de carga. El análisis de estas interacciones ayuda a comprender el uso probable de estos sistemas para el monitoreo de la salud estructural mediante la interpretación de la sensibilidad y la consistencia de la respuesta eléctrica con respecto a las cargas aplicadas al material.

4.1 Ensayos de dispersión

De acuerdo con los métodos y tiempos de dispersión definidos en la metodología se determinó la temperatura antes y después de realizar cada método de dispersión. Se observó que los métodos de ultrasonido por sonda continuo generaban un aumento significativo de temperatura al finalizar la dispersión. Sin embargo, al utilizar modos por pulsos, fue posible reducir este incremento térmico. Esta diferencia se evidencia claramente al comparar los métodos de ultrasonido 5 y 7, donde se obtuvo una disminución de temperatura de aproximadamente 15 % al emplear pulsos.

Tabla 4-1. Parámetros de métodos de dispersión con temperatura antes y después del proceso.

	Método de dispersión	ID	Tiempo (min)	Amplitud (%)	Energía (J)	J/g	T inicial (°C)	T final (°C)
0.5 % MWCNT	Ultrasonido por baño	1	60	-	252000	1460.87	22.5	29.4
	Ultrasonido por baño	2	30	-	126000	730.43	22.3	28.2
	Ultrasonido por baño	3	10	-	42000	243.48	22.5	28.7
	Ultrasonido por baño	4	5	-	21000	121.74	22.5	27.8

	Método de dispersión	ID	Tiempo (min)	Amplitud (%)	Energía (J)	J/g	T inicial (°C)	T final (°C)
	Ultrasonido por sonda	5	5	50	60000	347.83	22.2	31.8
	Ultrasonido por sonda	6	5	60	72000	417.39	22.1	34.2
	Ultrasonido por sonda (pulsos)	7	5	50	60000	347.83	22.7	27.1
	Ultrasonido por sonda	8	5	70	84000	486.96	23.0	39.2
	Manual	9	5	-	-	-	22.8	23.9
	Manual	10	10	-	-	-	22.5	23.3
	Manual con aditivo (0.5 %)	11	5	-	-	-	22.6	23
	Ultrasonido por sonda (pulsos) con aditivo (0.5 %)	12	5	50	60000	344.83	22.4	27.5
1.0 % MWCNT	Ultrasonido por baño	13	5	-	21000	120.69	22.1	24.2
	Ultrasonido por sonda (pulsos)	14	5	50	60000	344.83	22.5	28.2
	Manual	15	5	-	-	-	22.0	23.5
	Manual con aditivo (0.5 %)	16	5	-	-	-	22.4	24.1

El método de ultrasonido por baño presentó la mayor energía aplicada, alcanzando un total de 250 kJ, debido principalmente a su prolongado tiempo de dispersión. Por otro lado, el método 4 fue el que registró la menor energía, con un valor de 21 kJ. De acuerdo con la investigación realizada por De Siqueira & Gleize (2020), quienes revisaron una amplia gama de trabajos que reportaron energías aplicadas en un rango que va desde 9 kJ hasta 504 kJ, lo cual permite contextualizar los valores implementados en esta investigación.

En la **Tabla 4-1** se muestra la relación J/g, la cual permite cuantificar la energía ultrasónica aplicada por unidad de masa de la solución, lo que facilita comparar la eficiencia del proceso de dispersión.

Para determinar la resistencia eléctrica de cada solución después del proceso de dispersión, se generaron diagramas de Nyquist correspondientes a cada muestra, identificadas mediante el ID indicado en la **Tabla 4-1**. El valor de la resistencia R se obtuvo de acuerdo con lo descrito en el numeral 3.5.1 y se ilustra en la **Figura 3-38**. Los resultados se resumen en la **Tabla 4-2**, donde se observan los valores de resistencia para cada muestra y en los intervalos de tiempo definidos. La muestra patrón corresponde a agua desionizada sin ninguna intervención.

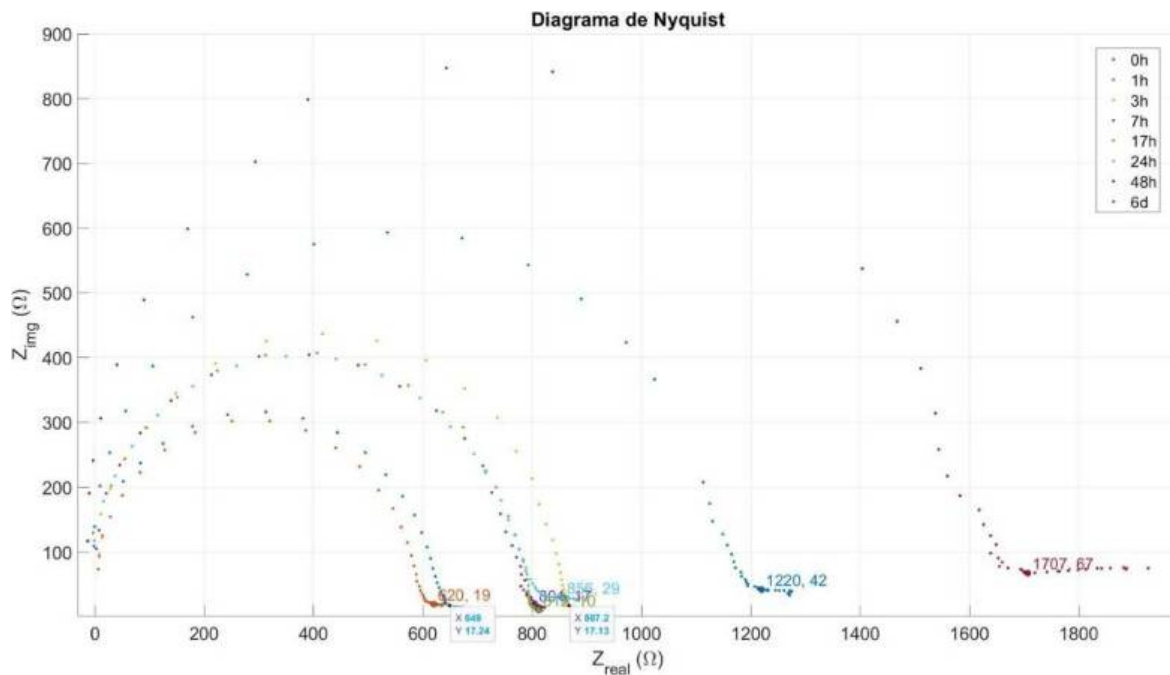
Método de dispersión	Resistencia (Ω)								
	ID	0 h	1 h	3 h	7 h	17 h	24 h	48 h	6 d
Ultrasonido por sonda (pulsos) con aditivo (0.5 %)	12	5043	3341	3562	4471	3162	3023	2793	2790
Ultrasonido por baño	13	12180	12220	19860	11960	4717	3252	5074	3244
Ultrasonido por sonda (pulsos)	14	2175	1174	884	2206	437	296	544	240
Manual	15	22160	17800	64230	87490	91480	104600	123400	123400
Manual con aditivo (0.5 %)	16	18890	20440	21050	20170	21150	19190	19630	19310

Al analizar los valores de la **Tabla 4-2** se puede observar que el método de dispersión 7 presenta los menores valores de resistencia, lo cual indica que la solución (agua desionizada y MWCNT) ofrece la menor oposición al flujo de corriente eléctrica, y por ende una alta conductividad, que es precisamente lo deseado. La muestra 7 corresponde al método de ultrasonido por sonda con aplicación de energía mediante pulsos (sonificación intermitente cada 20 segundos), lo que no solo evita un aumento excesivo de temperatura durante la dispersión, sino que también favorece a una mejor distribución de los MWCNT, mejorando significativamente la conductividad de la solución. No se consideró ampliar el tiempo de duración en los métodos de ultrasonido por sonda ya que esto podía provocar un daño en la estructura de los MWCNT, y adicionalmente presenta altas temperaturas en la solución resultante.

En la **Figura 4-2** correspondiente a la muestra 7, se presentan los valores de resistencia más bajos y estables a lo largo del tiempo, se observa que, conforme avanza el tiempo, la resistencia tiende a incrementarse. Este comportamiento puede estar relacionado con un fenómeno de sedimentación de las partículas de MWCNT. Sin embargo, este aumento no ocurre de forma proporcional, es decir, a mayor tiempo no implica necesariamente mayor resistencia. Esto podría deberse principalmente a dos factores: el primero es que, durante el proceso de medición, la manipulación de la muestra (al ubicarla en el sito de medición o al insertar el electrodo) puede generar una perturbación que altere la distribución de las partículas, provocando que, en ciertos casos, se obtengan valores de resistencia menores en mediciones posteriores (por ejemplo, a los 6 días frente a las 48 horas). Cabe resaltar que se procuró siempre minimizar este efecto durante la medición. La segunda causa probable es que, debido a la sedimentación, en algunos intervalos de medición la concentración de partículas pudo haber variado localmente, coincidiendo con la ubicación

del electrodo; por ejemplo, es posible que en la medición del día 6 hubiera una mayor concentración de MWCNT en la zona de contacto del electrodo que en la medición realizada a las 48 horas. En el **Anexo A** se presenta todas las demás gráficas de las distintas muestras.

Figura 4-2. Diagramas Nyquist y valores de R , muestra 7.



Medidas por medio del conductímetro de mesa

Con el propósito de contar con una alternativa para determinar qué tan conductivas son las muestras según su método de dispersión, se utilizó un conductímetro de mesa como dispositivo de medición. Tal como se estableció en la metodología, las mediciones se realizaron en los mismos intervalos de tiempo, y los resultados se expresaron en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ver **Tabla 4-3**). Los valores con mayor conductividad, y en consecuencia la menor resistencia eléctrica, se registraron en las muestras tratadas con ultrasonido por sonda, lo cual coincide con los resultados obtenidos en los diagramas de Nyquist. Particularmente, la muestra 7 se destacó por presentar la conductividad más alta y mantener una buena estabilidad en el tiempo. Estos resultados respaldan que el ultrasonido por sonda, aplicado en modo de pulsos, es el método más eficiente para lograr una dispersión efectiva de los MWCNT, generando una solución con alta conductividad, lo que resulta beneficioso para su uso en mezclas de mortero.

Tabla 4-3. Valores de conductividad en los distintos intervalos de tiempo.

Método de dispersión	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)								
	ID	0 h	1 h	3 h	7 h	17 h	24 h	48 h	6 d
Muestra patrón	0	4.6	4.8	4.9	5.0	4.9	4.9	5.0	5.3
Ultrasonido por baño	1	396.0	12.8	11.6	10.3	7.7	7.2	7.5	8.3
Ultrasonido por baño	2	623.0	23.0	23.1	20.5	18.6	19.3	18.3	18.7
Ultrasonido por baño	3	582.0	28.3	8.4	7.0	7.4	7.5	7.6	8.7
Ultrasonido por baño	4	288.0	9.0	8.4	6.5	7.3	7.2	7.7	7.9
Ultrasonido por sonda	5	6680.0	5800.0	5410.0	4370.0	4720.0	4130.0	3950.0	3540.0
Ultrasonido por sonda	6	7340.0	6930.0	5650.0	6070.0	5090.0	5070.0	4810.0	5040.0
Ultrasonido por sonda (pulsos)	7	8240.0	8580.0	7430.0	7010.0	6960.0	6110.0	5960.0	7240.0
Ultrasonido por sonda	8	6990.0	6260.0	6350.0	6820.0	6750.0	6170.0	5470.0	6020.0
Manual	9	11.3	9.8	10.0	8.4	9.0	8.4	8.4	8.9
Manual	10	12.5	11.8	12.0	9.9	10.2	9.4	9.4	9.8
Manual con aditivo (0.5 %)	11	185.6	177.5	179.0	167.5	170.0	158.5	154.2	154.9
Ultrasonido por sonda (pulsos) con aditivo (0.5 %)	12	1734.0	1489.0	1473.0	1447.0	1444.0	1485.0	1417.0	1301.0
Ultrasonido por baño	13	997.0	57.1	10.5	8.9	8.6	9.0	8.6	9.0
Ultrasonido por sonda (pulsos)	14	10900.0	10350.0	10820	10880.0	10500.0	10600.0	8140.0	8240.0
Manual	15	97.4	18.9	19.4	17.2	16.8	15.4	15.2	15.7
Manual con aditivo (0.5 %)	16	227.0	141.4	141.8	137.5	135.2	127.9	124.9	121.3

El uso de aditivo superplastificante en el método manual mostró un aumento en la conductividad aproximadamente 16 veces mayor a las muestras 9 y 10, las cuales son métodos de agitación magnética (manual). Este aumento se debe a que, en ausencia del superplastificante los MWCNT tienden a sedimentarse rápidamente, concentrándose en el fondo del recipiente, como se evidencia en la **Figura 4-8** correspondiente a las muestras 9 y 10. Por el contrario, al adicionar el superplastificante en la muestra 11 los MWCNT permanecen en suspensión por más tiempo, manteniendo una solución de color oscuro y una mayor conductividad eléctrica. Por ejemplo, los valores de conductividad de la muestra 11 pasaron de 185 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 154.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en seis días, mientras que la resistencia eléctrica varió de 15610 Ω a 15970 Ω , lo que representa un incremento de solo 360 Ω . Estos resultados evidencian que el uso de aditivo superplastificante en un método manual incrementa su conductividad y se mantiene relativamente estable en el tiempo. Por otro lado, al adicionar superplastificante en el método de dispersión de ultrasonido por sonda,

se observó una disminución aproximada de la conductividad en una quinta parte en comparación con la muestra 7, ambas muestras fueron dispersas por medio de ultrasonido por sonda y con pulsos. Esta reducción se puede explicar por el mecanismo de acción del superplastificante. Karpova et al. (2021) describen que el superplastificante se adhiere a la superficie de los nanotubos otorgándoles una carga negativa. Esto provoca repulsión electrostática y separación física entre nanotubos (efecto estérico), lo cual mejora la dispersión, pero impide el contacto eléctrico entre ellos, reduciendo así la posibilidad de formar una red conductora continua y, por ende, disminuyendo la conductividad de la solución. Por esta razón el uso del aditivo superplastificante fue descartado y analizando los resultados de la resistencia de la **Tabla 4-2** donde la muestra 7 mostraron los menores valores de resistencia y razonablemente estable en el tiempo, esta muestra se logró mediante una dispersión con ultrasonido por sonda y aplicando pulsos cada 20 segundos. Los resultados de la conductividad de la **Tabla 4-3** de igual manera recalcan la muestra 7 como la que presenta mayor conductividad.

Con respecto a las demás muestras, los métodos de ultrasonido por sonda (muestras 5, 6 y 8) donde se variaron la amplitud del dispositivo se pudo evidenciar que al aplicar una amplitud de 60 % se presenta la mayor conductividad y menor resistencia, sin embargo, la energía es mayor (aproximadamente 72 kJ y equivalente a 417.39 J/g), lo cual podría causar daños en la estructura de los nanotubos, en cambio una amplitud de 50 % aplica una energía menor (aproximadamente 60 kJ y equivalente a 347.83 J/g). De la investigación realizada por Echeverry Cardona (2020), se concluyó que un rango de energías óptimas esta entre 190 J/g y 440 J/g. Dentro de dicho rango, la muestra 7 presenta un valor intermedio, evitando acercarse al límite superior de 440 J/g, dado que se ha evidenciado que energías superiores a este valor comprometen la integridad estructural de los MWCNT.

Una alternativa para contrastar y correlacionar los datos de resistencia y conductividad eléctrica obtenidos para cada método de dispersión es analizar las mediciones realizadas en el intervalo más representativo del estudio, es decir, entre 0 h y 1 h después de la preparación de las muestras. En las gráficas de la **Figura 4-3** se observa una relación inversamente proporcional entre la resistencia y la conductividad. Esto responde al principio básico de la conducción eléctrica, donde los materiales más resistentes al paso

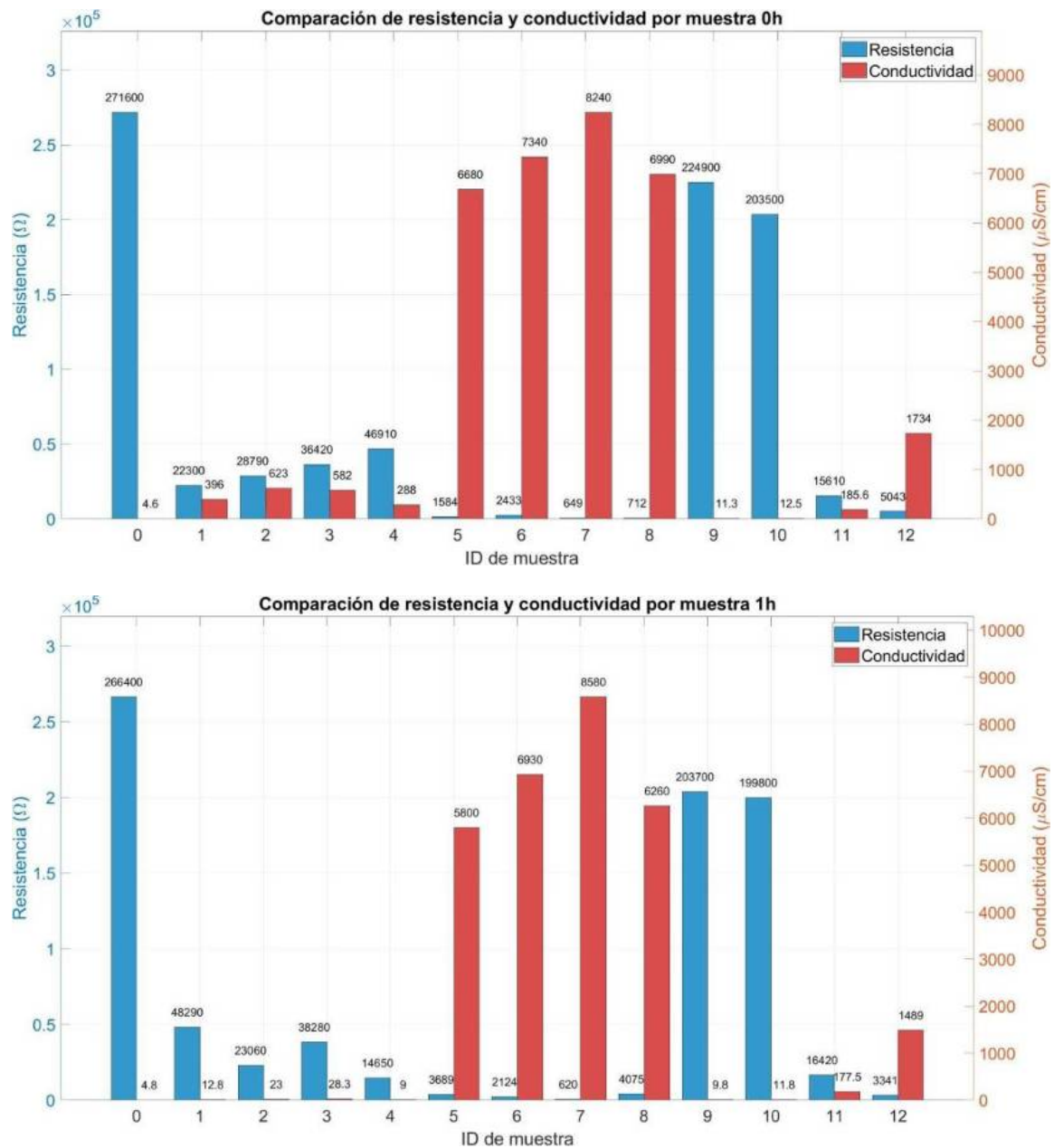
de la corriente ofrecen una menor facilidad de conducción. En otras palabras, a mayor resistencia menor conductividad y viceversa.

Comparando los métodos de dispersión, el ultrasonido por sonda fue el método más eficiente para dispersar los MWCNT, ya que permitió alcanzar menores valores de resistencia y mayores de conductividad. En particular, la muestra 7, dispersada mediante ultrasonido por sonda con 50 % de amplitud y pulsos cada 20 segundos, mostró el mejor desempeño. Esta muestra presentó la mayor conductividad eléctrica y una resistencia notablemente baja, lo que indica una dispersión más homogénea y estable de los MWCNT en el medio. También se observa que esta tendencia se mantiene después de una hora, lo que indica estabilidad en la suspensión.

Al contrario, los métodos manuales (muestras 10 y 11) y el uso del ultrasonido por baño (muestras 1 a 4) presentaron en general valores más altos de resistencia y más bajos de conductividad, lo que representa una menor eficiencia en la dispersión de los MWCNT, sin importar el tiempo de duración en el ultrasonido por baño. Ya que al aumentar el tiempo de dispersión no se evidenció una mejora notable.

La adición del superplastificante en la muestra 11 mejoro ligeramente los resultados respecto al método manual sin aditivo, pero no alcanza el desempeño logrado con los métodos de ultrasonido por sonda. Además, al adicionar superplastificante al método de ultrasonido por sonda (muestra 12) se evidencio como reduce drásticamente la conductividad en comparación con la muestra 7, ya que en ambos casos se utilizó el mismo proceso de dispersión.

Figura 4-3. Comparación de métodos de dispersión de MWCNT mediante resistencia y conductividad eléctrica, en el tiempo de 0 h y 1 h.



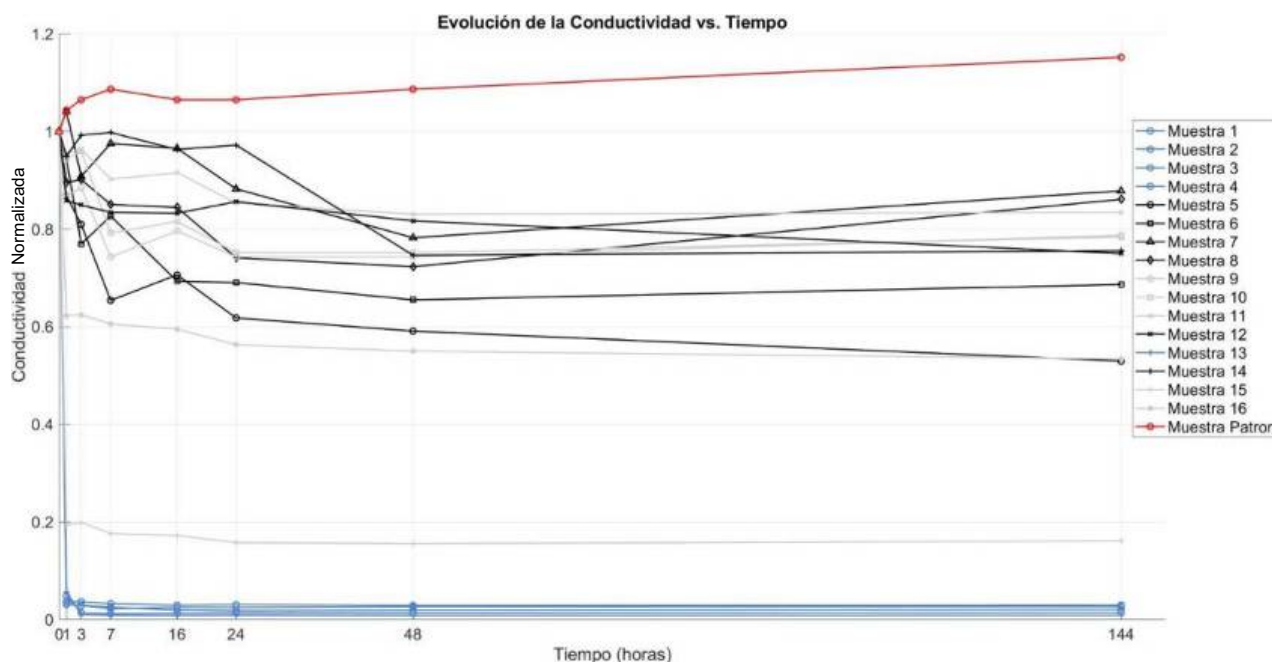
Es importante mencionar que, aunque se hicieron ensayos de dispersión con una concentración del 1.0 % de MWCNT, en los gráficos solo se muestran los resultados de la adición del 0.5 %. Esto se hizo para que los resultados sean claros y no abrumar con demasiada información. Además, se observó que los datos obtenidos con el 0.5 % permitían una mejor diferenciación entre los métodos y una interpretación más precisa del

comportamiento eléctrico de las muestras. Los ensayos al 1.0 % de MWCNT se realizaron solo para cuatro métodos de dispersión: ultrasonido por baño (5 minutos), ultrasonido por sonda con pulsos (5 minutos), agitación manual (5 minutos), y agitación manual con aditivo (5 minutos), los resultados de estos métodos presentaron la misma tendencia que con una adición de 0.5%.

La estabilidad de la dispersión es un factor importante para tener en cuenta. La **Figura 4-4** muestra la evolución de la conductividad eléctrica normalizada respecto a sus respectivos valores iniciales de los distintos métodos de dispersión. Se observa un comportamiento diferenciado según el método empleado: las curvas en negro, correspondientes a las muestras dispersadas por ultrasonido de sonda, presentan una notable estabilidad en la conductividad a lo largo del tiempo, lo que indica una buena dispersión inicial y una resistencia significativa a la sedimentación de los MWCNT. Se destaca la Muestra 7, la cual mantiene una conductividad relativamente alta y estable, lo que sugiere que el método de ultrasonido por sonda a una amplitud de 50 % y con pulsos optimiza el balance entre energía de dispersión y control del sobrecalentamiento.

Las curvas en azul corresponden a las muestras tratadas mediante el método de baño ultrasónico, donde se muestra una drástica caída en la conductividad desde la primera hora, lo cual indica una rápida sedimentación de los MWCNT. Esto evidencia la limitada eficiencia de este método para mantener una dispersión homogénea en el tiempo, probablemente por la menor intensidad de cavitación. Por su parte, las curvas en gris son obtenidas de los métodos manuales con agitador magnético, estas curvas presentan una estabilidad intermedia, pero hay que tener en cuenta que los valores desde el instante cero son muy bajos y por eso se mantiene en el tiempo ya que rápidamente se sedimenta los MWCNT. Las muestras con aditivo reflejan una estabilidad aceptable, pero cabe recordar que su valor de conductividad es bajo, por ende, aunque presentan una buena estabilidad por su alta resistencia y baja conductividad no se considera como un método eficaz.

Figura 4-4. Evolución de la conductividad normalizada en suspensiones de MWCNT mediante diferentes métodos de dispersión

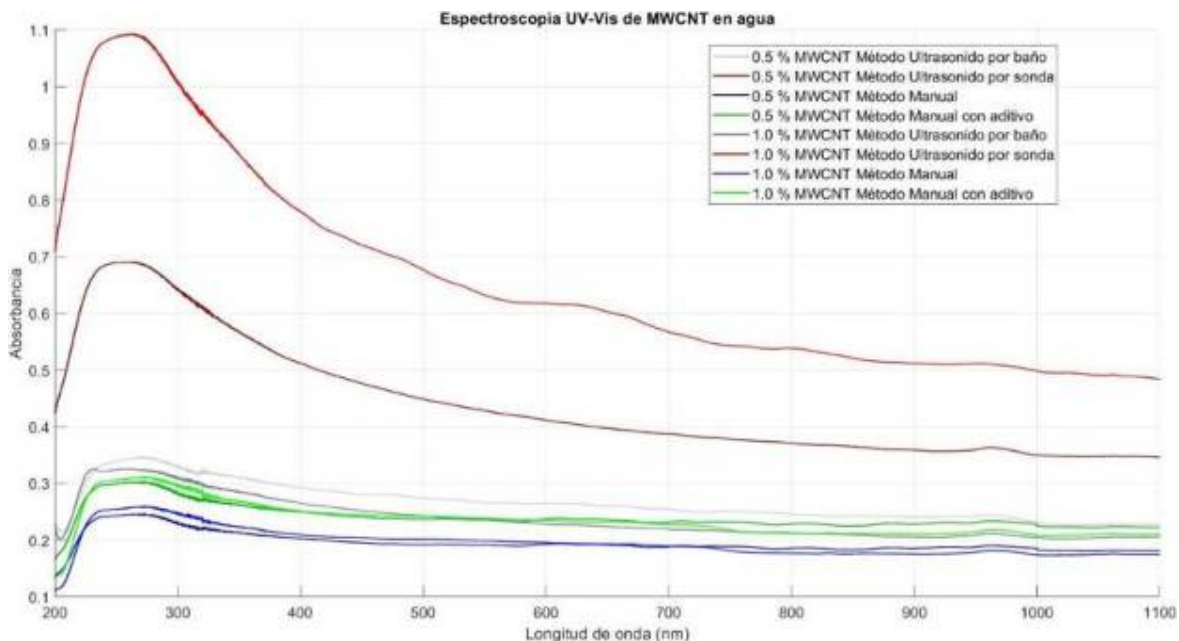


Por último, se presenta en la **Figura 4-5** la gráfica de espectroscopia UV-Vis. Esta gráfica utilizada en distintas investigaciones se basa en la absorción de luz por parte de los materiales a ciertas longitudes de onda. En el caso de los MWCNT, se presentan bandas de absorción características en la región UV-Visible asociadas a transiciones electrónicas del carbono. Cuanto mayor es la cantidad de MWCNT bien dispersos en el medio, mayor será la absorbancia, especialmente en la región cercana a los 260-280 nm (Mendoza Reales & Dias Toledo Filho, 2017).

En la **Figura 4-5** se observa que curvas correspondientes al ultrasonido por sonda presentan valores de absorbancia mayores que los obtenidos con ultrasonido por baño o métodos manuales. Esto confirma que el método de ultrasonido por sonda es más eficiente separando los aglomerados y estimulando una dispersión uniforme de los MWCNT. Al comparar las curvas de concentración de MWCNT (0.5 % y 1.0 %), se aprecia que, aunque la absorbancia aumenta con la concentración, el incremento no es proporcional, lo cual es más evidente en los métodos que no son mediante ultrasonido por sonda, debido a que las curvas de dichos métodos son cercanas. Para realizar las mediciones UV-Vis, fue necesario diluir las suspensiones originales en una proporción 1:100. Esta dilución es

importante porque evita saturación del detector del espectrofotómetro, ya que los MWCNT dispersos presentan una absorbancia muy alta.

Figura 4-5. Espectros de absorbancia UV-Vis de MWCNT en agua: comparación entre métodos de dispersión y concentraciones.



Todas las muestras se dispersaron durante 5 minutos en cada método, el método de ultrasonido por sonda se realizó con amplitud del 50 % y en pulsos cada 20 segundos.

Registro fotográfico en SEM del método de dispersión en la muestra 7

En las imágenes de SEM se logra apreciar la influencia del tratamiento por ultrasonido en la dispersión de los MWCNT. La imagen de la **Figura 4-6**, correspondiente al material sin dispersión, muestra aglomeraciones densas de MWCNT fuertemente entrelazados. Esta morfología limita la formación de vías de conducción, lo que provoca resistividades eléctricas más altas.

Por otro lado, la fotografía de la **Figura 4-7** (obtenida tras 5 min de ultrasonido por sonda con pulsos de 20 s al 50 % de amplitud) se observa un entramado mucho más abierto y homogéneo. Los MWCNT aparecen separados, con menos aglomeraciones, lo que facilita la creación de caminos conductores extensos y mejora la transferencia eléctrica de los

MWCNT, esto se refleja en la disminución de la resistencia eléctrica y el aumento de la conductividad observados experimentalmente.

Figura 4-6. Fotografías SEM de MWCNT sin proceso de dispersión.

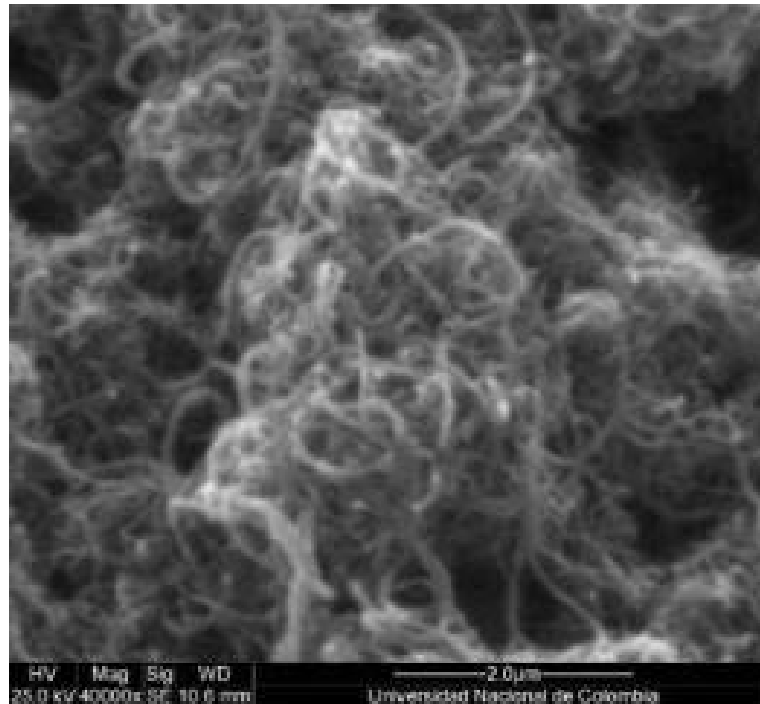
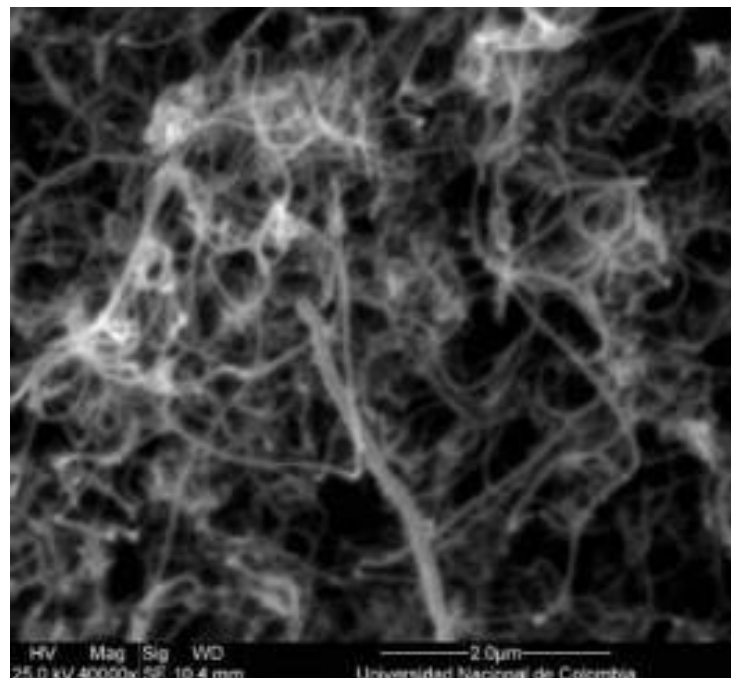


Figura 4-7. Fotografías SEM de MWCNT luego del proceso de dispersión.



Cabe destacar que no se observan daños evidentes en la estructura de los MWCNT, lo cual indica que la energía suministrada mediante el ultrasonido por sonda es la adecuada. Esto implica que el protocolo de ultrasonido empleado logra un equilibrio adecuado: rompe las fuerzas de Van der Waals que mantienen los MWCNT unidos, pero sin comprometer la integridad estructural de los MWCNT. Por lo tanto, el método resulta el más adecuado para optimizar la dispersión y simultáneamente, preservar las propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para su uso en el mortero

Registro fotográfico de las muestras

El registro fotográfico presentado en la **Figura 4-8** permitió evidenciar el fenómeno de sedimentación de los MWCNT. Las fotografías se tomaron en los mismos intervalos de tiempo en los que se realizaron las mediciones de conductividad y diagramas de Nyquist. Se observó que en los métodos manuales y de ultrasonido por baño el proceso de sedimentación era claramente visible. En contraste, en las muestras tratadas con ultrasonido por sonda (5, 6, 7, 8, 12, 14), no se evidenciaron signos visibles de sedimentación, lo que indica que la dispersión es más efectiva y estable en el tiempo. Estos resultados son consistentes con las mediciones obtenidas tanto de conductividad como de resistencia eléctrica.

Figura 4-8. Registro fotográfico de los diferentes métodos de dispersión.



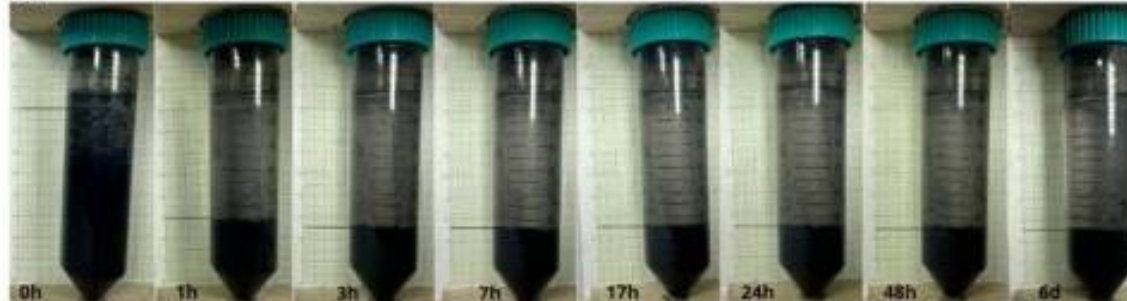
ID: 2



ID: 3

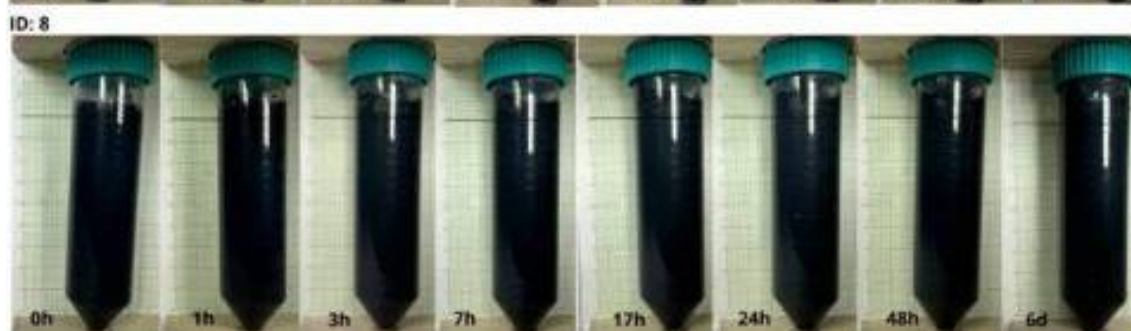
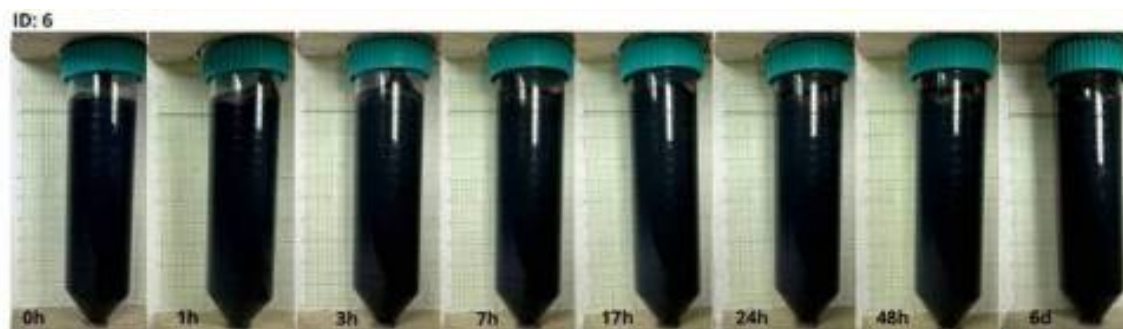


ID: 4



ID: 5





ID: 10



ID: 11



ID: 12



ID: 13





Las muestras con proceso de ultrasonido por sonda presentan una apariencia intensamente de color negro a lo largo del tiempo, debido al alto fenómeno de cavitación. Este proceso genera fuerzas intensas de cizalladura que rompen eficazmente los aglomerados de nanotubos, favoreciendo una dispersión homogénea y reduciendo significativamente su tendencia a regalonearse. Como resultado, los MWCNT se mantienen suspendidos en el agua por periodos prolongados, minimizando su sedimentación natural.

Con respecto a las muestras tratadas con ultrasonido por baño (1, 2, 3, 4, 13), se identificó en la primera hora una importante sedimentación de MWCNT, sin embargo, aún se observa una pequeña porción de MWCNT en suspensión. Esto se evidencia en el color de la muestra, el cual no es totalmente traslúcido, sino que mantiene un tono grisáceo u opaco, indicando la presencia de partículas dispersas en el agua. Además, las mediciones

de conductividad y resistencia muestran que las muestras dispersas mediante ultrasonido por baño presentan un menor valor de resistencia que la muestra sin MWCNT. Esto se debe a que todavía hay partículas suspendidas, lo que favorece ligeramente la conductividad eléctrica, aunque no alcanza los valores obtenidos con ultrasonido por sonda.

Las muestras de dispersión manual sin aditivo (9, 10, 15) es claramente el método que más sedimentación de MWCNT presenta, dejando la parte superior del líquido prácticamente traslúcida. Esto se debe a que la agitación mecánica no tiene la suficiente energía para separar las aglomeraciones de los MWCNT. Por otro lado, la adición de un aditivo superplastificante (11, 16) evidencia que las muestras mantienen un color negro durante más tiempo, lo que sugiere una mayor distribución de los MWCNT en el agua. Las mediciones eléctricas muestran esta mejora en la dispersión, ya que la conductividad aumenta y la resistencia disminuye en relación con las muestras agitadas manualmente sin adición. Además, el superplastificante favorece la estabilidad de la suspensión durante varias horas, lo que permite obtener un rendimiento incluso cercano al del tratamiento en baño ultrasónico.

4.2 Elaboración de especímenes

Una vez determinado que el método de dispersión más eficaz, el cual consistió en aplicar ultrasonido por sonda a pulsos de 20 segundos durante 5 minutos, se procedió a elaborar los especímenes destinados al experimento de medición del cambio de resistividad bajo cargas mecánicas. En la **Figura 4-9** se esquematiza el proceso de elaboración de los especímenes de cubos y briquetas con los distintos electrodos. En la parte superior de la **Figura 4-9** se aprecia cómo se realiza la dispersión de los MWCNT en el agua desionizada. Dicho proceso asegura una solución bien dispersa antes de ser combinada con los demás componentes de la mezcla. En el esquema se observa la secuencia de pasos estipulados para la preparación, siguiendo la norma NTC 112 para realizar el proceso de mezcla: primero se incorpora el agua con los nanotubos dispersos en la mezcladora; luego se añade el cemento a baja velocidad, de modo que la mezcla vaya tomando consistencia; se agrega gradualmente la arena mientras todo continúa mezclándose de forma controlada.

En el momento de vaciar la mezcla en los moldes, se embeben los electrodos como describe el numeral 3.7, los cuales deben quedar ubicados de una manera central para medir representativamente la respuesta eléctrica del material frente a cargas mecánicas posteriores. Estas cargas son de compresión en el caso de los cubos y de tensión en el caso de las briquetas. Ambas configuraciones de ensayo buscan evaluar de manera precisa la interacción entre los MWCNT, la matriz de cemento y la respuesta eléctrica bajo diferentes tipos de esfuerzos.

Figura 4-9. Esquema del procedimiento para la elaboración de especímenes con MWCNT para mediciones de respuestas eléctricas ante cargas mecánicas.



Por último, en la parte inferior del esquema se distinguen los especímenes ya fabricados, junto con el proceso de curado en agua con cal que les aporta las condiciones óptimas de hidratación. Las imágenes muestran tanto las briquetas como los cubos, listos para someterse a los ensayos mecánicos y eléctricos. Así, el diagrama ilustra de forma clara cada etapa de este procedimiento, desde la dispersión de los nanotubos hasta el endurecimiento final de los especímenes, evidenciando la importancia de un control riguroso en cada paso para obtener resultados confiables.

El rendimiento en estado fresco depende en gran medida de la fluidez de los morteros, la adición de MWCNT afecta directamente a la uniformidad de la colocación y la facilidad de mezcla. La **Figura 4-10** muestra este fenómeno con mezclas en las que la adición de MWCNT corresponde al 0.0 % (a), 0.5 % (b) y 1.0 % (c) de la masa de cemento. La fluidez se determinó de acuerdo con la norma NTC 5784.

Los MWCNT crean una fuerte atracción intermolecular que promueve la aglomeración de partículas y limita la movilidad en el medio cementante, disminuyendo así la fluidez total de la mezcla. La teoría EDLVO muestra que la inclusión de nanotubos aumenta los valores de la energía de contacto superficial, promoviendo así el desarrollo de estructuras entrelazadas que limitan la libre dispersión del material en estado fresco (J. Zhang et al., 2020).

Como revelan diversos estudios, la disminución de la manejabilidad es más pronunciada a medida que aumenta el contenido de MWCNT, incluso a dosis bastante bajas (0.3 % - 0.5 % en masa de cemento), ya que la mezcla comienza a presentar variaciones claras en la consistencia y el grado de viscosidad. Se han documentado descensos drásticos de la fluidez en porcentajes cercanos al 1 %, lo que afecta la colocación y compactación del mortero, debido a que la elevada superficie de los MWCNT de agua facilita la adsorción de agua, lo que limita la cantidad de líquido libre disponible para mantener la fluidez deseada (Jung et al., 2022; Yoo, You, Youn, et al., 2018).

La **Figura 4-10** se observa que, a medida que aumenta la concentración de MWCNT, la extensión de la mezcla se reduce progresivamente, lo cual evidencia una menor fluidez y, por consiguiente, una disminución de la trabajabilidad del mortero.

Figura 4-10. Variación de la fluidez según el contenido de MWCNT, 0.0 % (a), 0.5 % (b) y 1.0 % (c).



La **Tabla 4-4** muestra cómo la fluidez de las mezclas de mortero disminuyen gradualmente a medida que aumenta la adición de MWCNT. La mezcla de referencia sin MWCNT tiene el valor máximo de fluidez (108.88 %), mientras que con un 0.5 % de MWCNT la fluidez disminuye al 86.06 %, lo que sugiere una caída del 21 % con respecto a la referencia. Por último, con un 1.0 % de MWCNT, solo se mantiene un 63.39 % de fluidez, es decir, se reduce en casi un 42 % con respecto a la mezcla sin MWCNT. Estos resultados revelan la tendencia perjudicial de la inclusión de MWCNT en la trabajabilidad del mortero, que aumenta progresivamente a medida que aumenta la concentración de MWCNT. La relación a/c se mantuvo fija en 0.57.

Tabla 4-4. Valores de fluidez.

Adición con respecto al peso del cemento	% de Fluidez	% de Reducción
0.0 % MWCNT	108.88	
0.5 % MWCNT	86.06	- 20.96
1.0 % MWCNT	63.39	- 41.78

Evaluación de la expansión por reacción álcali-sílice (RAS) en barras de mortero

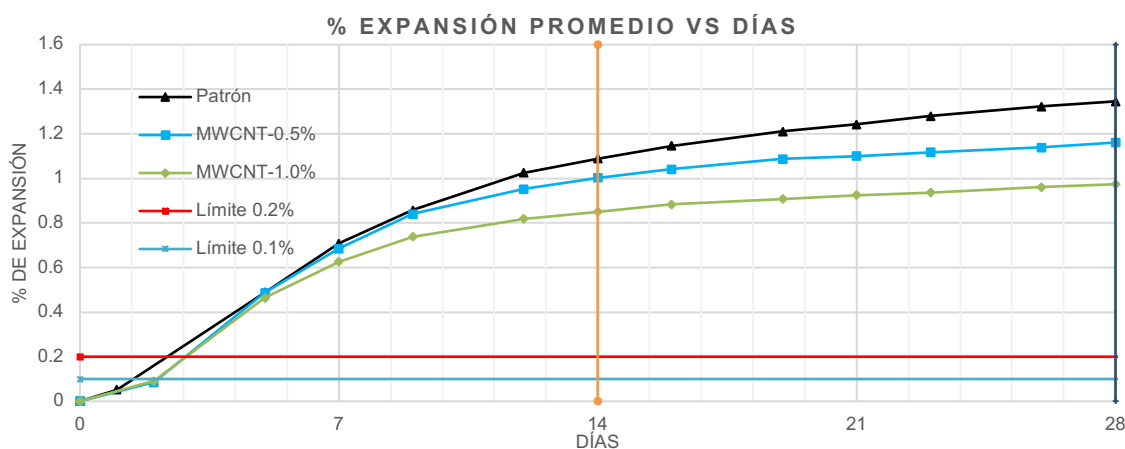
Con el fin de comprobar si la incorporación de MWCNT mejora la durabilidad del mortero frente a la RAS, se aplicó el ensayo acelerado de barras de mortero descrito en la metodología (NTC 6222), comparando una mezcla patrón de cemento portland con mezclas adicionadas de 0.5 % y 1.0 % de MWCNT.

La **Figura 4-11** se observa la curva patrón (sin MWCNT) con la expansión más elevada: alrededor de 1.10 % al día 14 y cercana a 1.35 % al día 28. Las mezclas modificadas con MWCNT muestran un comportamiento menor. Con 0.5 % de MWCNT la expansión ronda el 1.00 % a los 14 días y llega a unos 1.15 % a los 28 días, mientras que la adición de 1.0 % reduce los valores hasta aproximadamente 0.85 % y 0.97 % en los mismos puntos de control. Todas las series superan con creces los umbrales de 0.10 % y 0.20 % que la norma fija para considerar un agregado potencialmente reactivo, lo que confirma la elevada reactividad del material silíceo empleado.

La comparación evidencia el efecto de los MWCNT, a cuanto mayor es el contenido de MWCNT, menor es la expansión resultante. A los 14 días, la adición de 0.5 % de MWCNT reduce la expansión alrededor de un 5 % respecto al patrón, y la de 1.0 % la disminuye en torno a un 19 %. Esta diferencia se amplía al finalizar el periodo de 28 días, con reducciones aproximadas del 15 % y 28 %, respectivamente. El efecto se atribuye a la capacidad de los MWCNT para densificar la matriz, rellenando micro vacíos y limitar la penetración de la solución alcalina, ralentizando así la RAS.

Sin embargo, aunque la inclusión de MWCNT reduce la expansión, los valores finales siguen por encima del límite de 0.10 % aceptado para asegurar un comportamiento no reactivo frente a la reacción álcali-silíceo. Por tanto, los MWCNT mejoran la durabilidad, pero no la garantizan por sí solos; será necesario complementarlos con otras estrategias: como cementos de baja alcalinidad o adiciones puzolánicas, si se pretende cumplir las especificaciones de la norma.

Figura 4-11. Expansión por RAS en barras de mortero con distintas adiciones de MWCNT.



4.3 Ensayos mecánicos

En esta sección se presentan los valores obtenidos en los ensayos de compresión, tensión y flexión realizados con los morteros de referencia y con los adicionados con un 0.5 % y un 1.0 % de MWCNT en relación con la masa de cemento. Todos los resultados se calcularon siguiendo las directrices especificadas en las normas de cada ensayo. Se revisan las resistencias medias y las tendencias entre las mezclas; también se analiza el impacto de los MWCNT en la capacidad de carga.

4.3.1 Compresión

Los ensayos de compresión se realizaron de acuerdo con la norma NTC 220, usando especímenes cúbicos (50 mm) de mortero con las distintas adiciones de MWCNT. Se elaboraron tres especímenes para cada edad de ensayo, correspondientes a 1, 3, 7 y 28 días, con el objetivo de valorar el avance gradual de la resistencia a lo largo de tiempo y el efecto producido por los MWCNT.

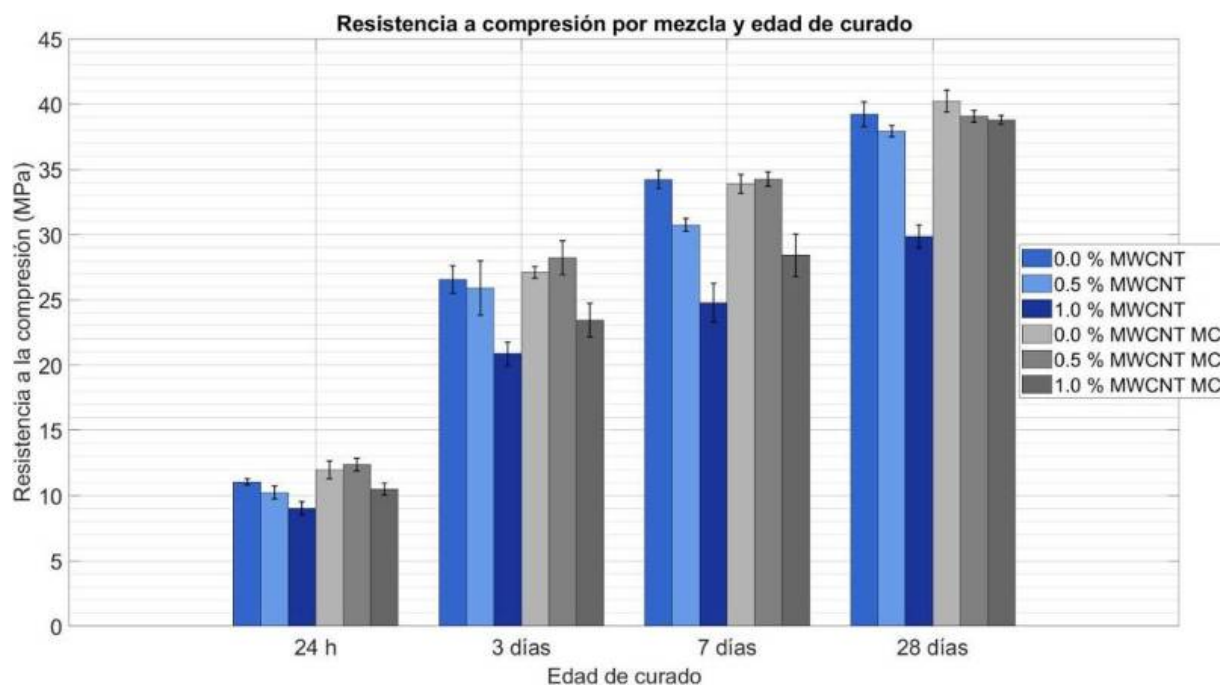
La configuración empleada para llevar a cabo el ensayo de compresión se ilustra en la **Figura 4-12**, donde se observa el espécimen en el dispositivo empleado para el ensayo, que incluye un cabezal de acero con placas de apoyo, lo que asegura la posición adecuada del espécimen durante la aplicación de carga. Antes del ensayo, se llevó a cabo una limpieza superficial de cada cubo para prevenir la interferencia de elementos externos en los resultados.

Figura 4-12. Montaje ensayo de compresión.



En una primera etapa se prepararon especímenes utilizando una compactación moderada que suele emplearse en morteros sin MWCNT. Sin embargo, al incorporar MWCNT se percibió una pérdida notable de fluidez y, en consecuencia, una trabajabilidad limitada que se evidencio en menores resistencias a compresión. Por ejemplo, a las 24 h el mortero con 1.0 % de MWCNT apenas sobrepasó los 9 MPa, mientras que la referencia sin MWCNT alcanzó unos 11 MPa. Ante esta notable disminución se replanteó el procedimiento y se fabricó un segundo lote aplicando una compactación más rigurosa (MC). Los resultados aparecen en la **Figura 4-13**: las barras grises representan los especímenes con mejor compactación y las azules los elaborados inicialmente. La mejor compactación elevó la resistencia en todas las edades, con mejoras de alrededor del 20 % a 24 h, del 10 % a 3 días y del 5 % a 7 días; el caso más significativo se observa a 28 días, donde la mezcla con 1.0 % de MWCNT pasó de aproximadamente 30 MPa a casi 39 MPa, un incremento cercano al 30 %. Estos hallazgos demuestran que al trabajar con MWCNT, la compactación adquiere un papel importante. En términos prácticos, un buen compactado forma mejor los especímenes reduciendo los vacíos que los MWCNT tienden a provocar.

Figura 4-13. Efecto de la compactación y del contenido de MWCNT sobre la resistencia a compresión



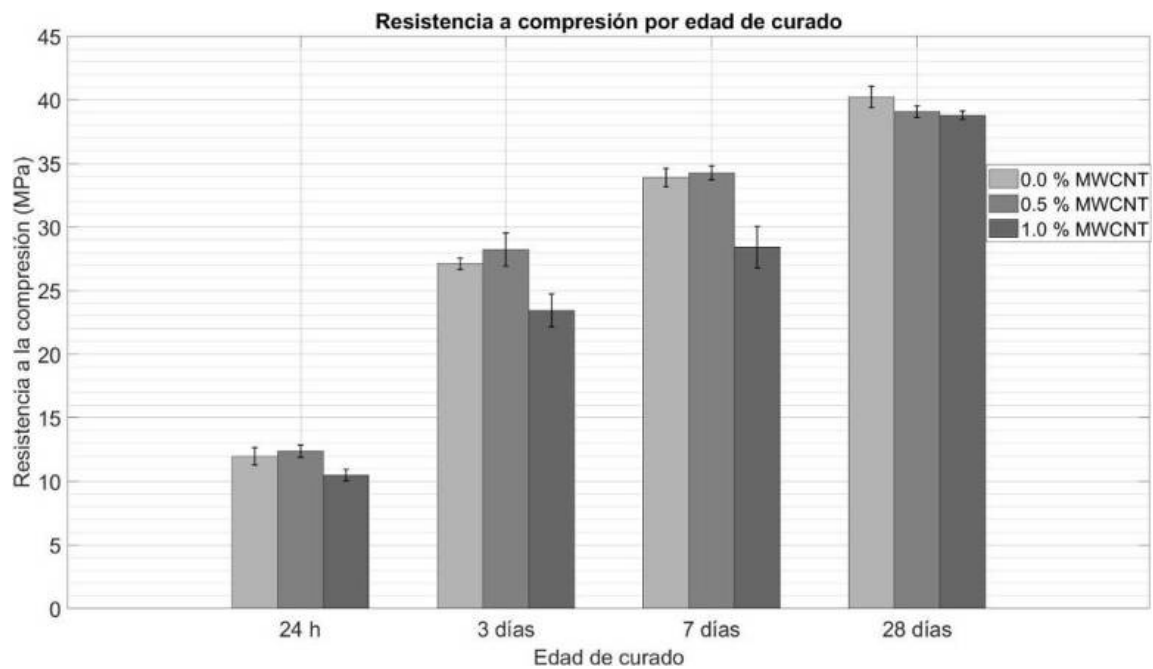
Los resultados de los ensayos de compresión con mejor compactación se presentan en la **Tabla 4-5** y **Figura 4-14**, estos valores son el promedio de tres especímenes, que es el mínimo establecido por la norma.

Tabla 4-5. Resultados ensayos de compresión cubos (Mpa).

	24h	Variación	3d	Variación	7días	Variación	28días	Variación
0.0 % MWCNT	11.98		27.12		33.90		40.20	
0.5% MWCNT	12.38	3.3 %	28.23	4.1 %	34.26	1.1 %	39.07	- 2.8 %
1.0% MWCNT	10.51	-12.3 %	23.44	- 13.6 %	28.41	- 16.2 %	38.78	- 3.5 %

Los datos que se muestran en la **Tabla 4-5** indican que la adición de MWCNT en porcentajes del 0.5 % y el 1.0 % en mezclas de mortero afecta a la resistencia en compresión durante las primeras edades de curado. En las primeras 24 horas, la mezcla con 0.5 % de MWCNT mostró un ligero incremento (3.3 %) respecto al mortero sin adición, mientras que la mezcla con 1.0 % presentó una disminución de la resistencia en comparación con la mezcla sin adición. La mezcla con 0.5 % evidenció un aumento de las resistencias en las primeras edades de curado en comparación con las demás combinaciones. A los 28 días, las diferencias tienden a estabilizarse, registrándose disminuciones moderadas para ambas dosificaciones, con un máximo del 3.5 %. También hay que mencionar que los porcentajes empleados son altos y que el objetivo no es conseguir una mayor resistencia, sino investigar el efecto en estos porcentajes; por lo tanto, al no disminuirse la resistencia significativamente no amenaza el desempeño del mortero.

Figura 4-14. Evolución de la resistencia a compresión con distintos contenidos de MWCNT.



4.3.2 Tensión

La resistencia a tensión de los morteros se determinó mediante ensayos según la norma ASTM C190, utilizando tres especímenes tipo briqueta para cada edad evaluada (1, 3, 7 y 28 días). En la **Figura 4-15** se presenta el montaje experimental empleado en la máquina universal, mostrando la colocación del espécimen durante el ensayo.

Figura 4-15. Montaje ensayo de tensión.

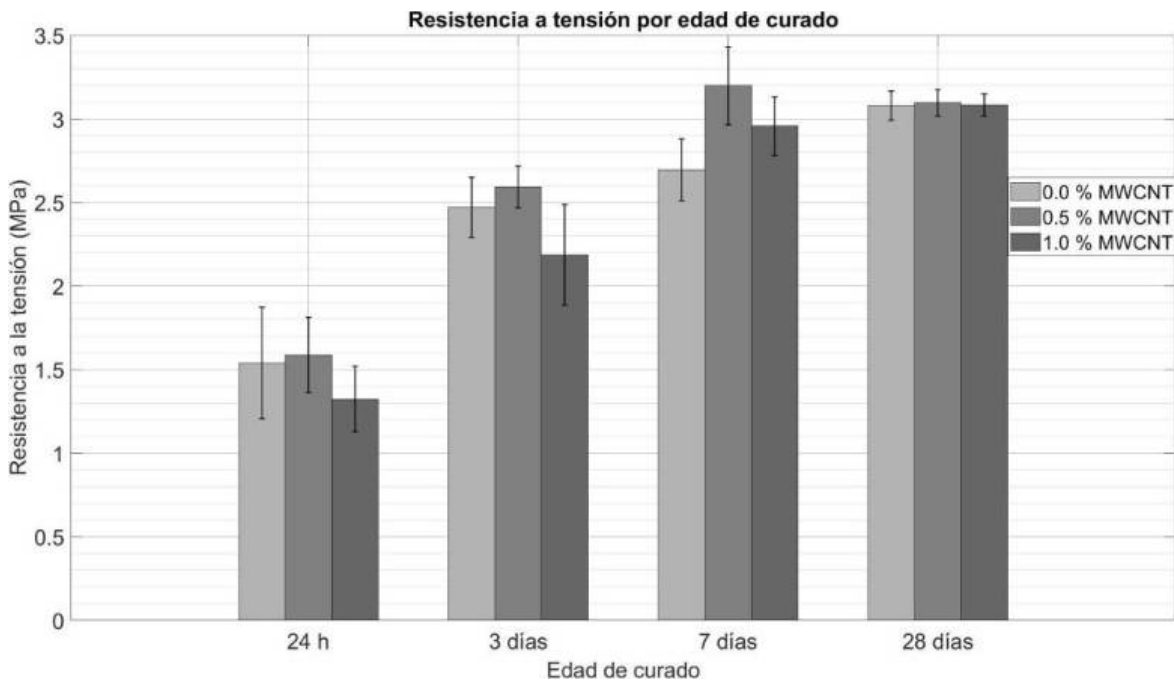


Los datos de la **Tabla 4-6** y **Figura 4-16** muestran una variación en la resistencia a tensión en edades tempranas (24 horas y 3 días). La mezcla con 1.0 % de MWCNT presentó inicialmente una reducción en comparación con la mezcla sin MWCNT, mostrando valores hasta un 14.0 % menores a las 24 horas y un 11.5 % menores a los 3 días. No obstante, esta diferencia se reduce progresivamente hasta los 28 días, donde ambas mezclas con MWCNT alcanzaron resistencias prácticamente iguales a la mezcla patrón (3.08 MPa), con diferencias mínimas del 0.6 % para 0.5 % de MWCNT y 0.1 % para 1.0 % de MWCNT. Lo anterior indica que la incorporación de MWCNT no tiene un efecto en la resistencia última a tensión, mostrando mayor impacto en etapas iniciales de fraguado y endurecimiento.

Tabla 4-6. Resultados ensayos de tensión (Mpa).

Mezcla	24h	Variación	3d	Variación	7días	Variación	28días	Variación
0 % MWCNT	1.54		2.47		2.70		3.08	
0.5 % MWCNT	1.59	3.2 %	2.59	4.9 %	3.20	18.7 %	3.10	0.6 %
1 % MWCNT	1.32	- 14.0 %	2.19	- 11.5 %	2.96	9.7 %	3.08	0.1 %

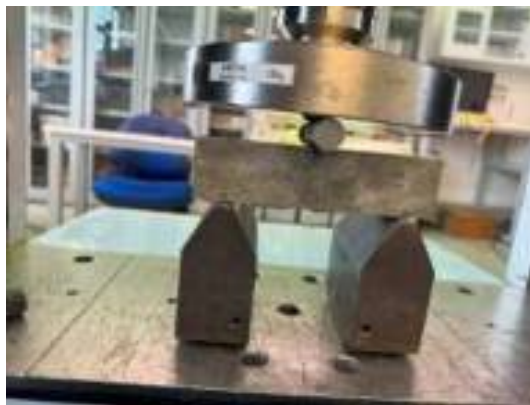
Figura 4-16. Evolución de la resistencia a tensión con distintos contenidos de MWCNT.



4.3.3 Flexión

La resistencia a flexión se determinó mediante ensayos según la norma NTC 120, empleando tres especímenes prismáticos por cada edad (1, 3, 7 y 28 días). En la **Figura 4-17** se observa el montaje en la máquina universal, correspondiente a un ensayo de flexión a tres puntos. Este método consiste en apoyar el espécimen sobre dos rodillos separados a un tercio de la luz del prisma, mientras se aplica la carga en el punto medio superior hasta la fractura, tal como establece dicha norma.

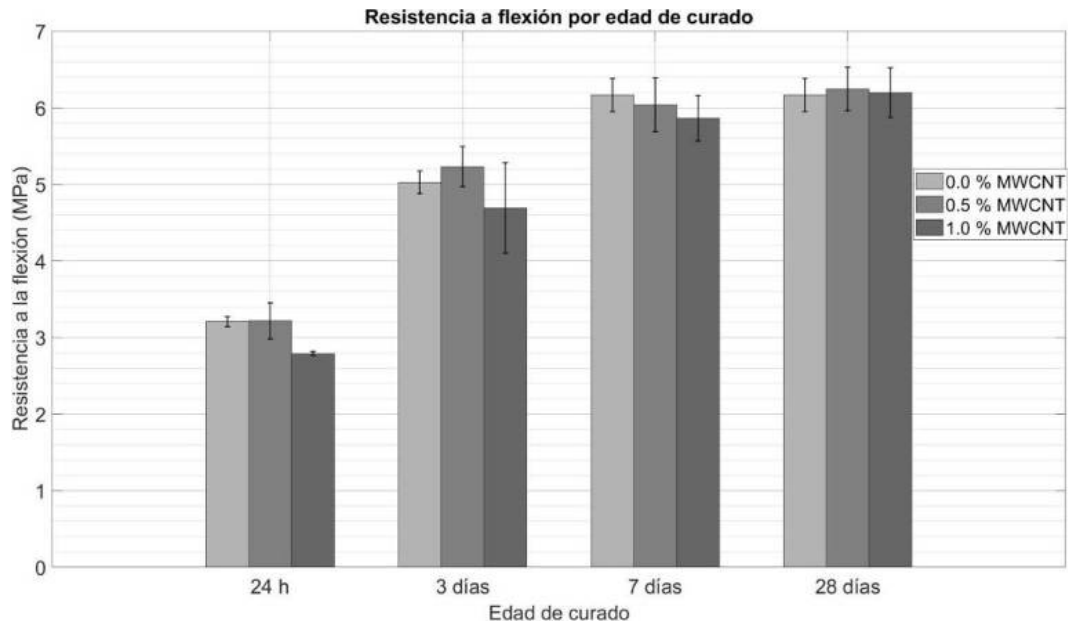
Figura 4-17. Montaje ensayo de flexión.



En el caso del ensayo de flexión (**Tabla 4-7** y **Figura 4-18**), la incorporación de MWCNT tuvo un comportamiento algo variable a lo largo del tiempo evaluado. A edades iniciales (24 horas y 3 días) la mezcla con 1.0 % MWCNT mostró una disminución en la resistencia respecto al mortero sin MWCNT, alcanzando hasta un 13.0 % menos a las 24 horas. Sin embargo, con el tiempo, esta brecha se redujo progresivamente, y para los 28 días la mezcla con 1.0 % MWCNT presentó una resistencia solo ligeramente superior (0.6 %) comparada con la mezcla sin MWCNT. Por su parte, la mezcla con 0.5 % MWCNT mantuvo un desempeño cercano al mortero de referencia durante todo el periodo evaluado, observando diferencias pequeñas en todos los intervalos analizados. Estos resultados sugieren que pequeñas dosificaciones de nanotubos no afectan significativamente la resistencia a flexión final del mortero, aunque sí parecen influir ligeramente en el desarrollo inicial de la resistencia.

Tabla 4-7. Resultados ensayos de flexión (Mpa).

Mezcla	24h	Variación	3d	Variación	7días	Variación	28días	Variación
0 % MWCNT	3.21		5.02		6.12		6.17	
0.5 % MWCNT	3.22	0.4 %	5.23	4.1 %	6.04	- 1.3 %	6.24	1.3%
1 % MWCNT	2.79	- 13.0 %	4.69	- 6.6 %	5.87	- 4.1 %	6.20	0.6%

Figura 4-18. Evolución de la resistencia a flexión con distintos contenidos de MWCNT.


En resumen, la presencia de MWCNT no alteró el desempeño global del mortero. En compresión, la mezcla sin MWCNT alcanzó 40.2 MPa, mientras que las dosificaciones con 0.5 % y 1.0 % de MWCNT registraron 39.1 MPa (-2.8 %) y 38.8 MPa (-3.5 %), respectivamente; la ligera disminución confirma que no se compromete la integridad del material. En tensión, las diferencias fueron prácticamente nulas: 3.08 MPa para la muestra sin MWCNT, 3.10 MPa con 0.5 % MWCNT (+0.6 %) y 3.08 MPa con 1.0 % MWCNT (+0.1 %), lo que indica que la adición no afecta la resistencia última a tensión. El comportamiento a flexión mostró una tendencia similar; el mortero de referencia registró 6.17 MPa y las mezclas con MWCNT alcanzaron 6.24 MPa (+1.3 %) y 6.20 MPa (+0.6 %), diferencias que no son significativas. En conclusión, los MWCNT mantienen las prestaciones mecánicas de un mortero sin MWCNT, al tiempo que mejoran las propiedades eléctricas del material.

4.4 Ensayos eléctricos

4.4.1 Conductividad

La conductividad eléctrica de morteros proporciona una medida indirecta de la facilidad con la que iones y fluidos pueden penetrar a través de la red de poros del material. Al incorporar MWCNT en el mortero, es de interés cuantificar su efecto tanto en las propiedades mecánicas como en las eléctricas, pues los MWCNT pueden modificar la microestructura y la conductividad iónica de la matriz del mortero.

La norma ASTM C1876 describe métodos para medir la resistividad eléctrica de especímenes endurecidos, haciendo énfasis en la preparación y acondicionamiento de especímenes, indicando las ecuaciones y factores de conversión para el cálculo. La idea central es aplicar un voltaje entre las dos caras opuestas de la muestra y registrar la corriente, lo cual permite determinar la conductividad (inversa de la resistividad) en función de la geometría del espécimen. Aunque la norma se basa en cilindros de concreto, en esta investigación se utilizaron cubos de mortero con diferentes porcentajes de MWCNT (0.0 %, 0.5 % y 1.0 %). Para garantizar un buen contacto eléctrico, Lizarazo-Marriaga & Claisse (2009) emplearon esponjas humedecidas en una solución de 0.1 M de KCl entre una baquelita de cobre y el cubo de mortero, mejorando así la conexión eléctrica (**Figura 4-19**). Adicionalmente, conforme a la norma de ensayo de resistividad descrita en ASTM C1876, se aplicó un voltaje de 30 V de corriente continua durante un minuto. Las mediciones se realizaron en los especímenes cúbicos ensayados a compresión en edades de 24 h, 3 días, 7 días y 28 días, utilizando el equipo PROOVE'it (ver numeral 3.1.5) para la medición de corriente y voltaje.

La conductividad (σ) se puede calcular mediante la ecuación (4.1).

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

Donde:

σ es la conductividad eléctrica (mS/m)

I es la corriente eléctrica medida (mA)

V es el voltaje (V)

A es el área de la sección transversal (cm^2)

L es la longitud del material entre los dos puntos de medición (cm)

Figura 4-19. Montaje para medición de impedancia mediante dispositivo PROOVE'it.



La **Figura 4-20** demuestra cómo la conductividad eléctrica disminuye con la edad en todas las mezclas de morteros debido al desarrollo de la hidratación y al refinamiento de la microestructura, donde se evidencia que las mezclas con adiciones de MWCNT (0.5 % y 1.0 %) tienen valores de conductividad mayores en todas las edades. Esto implica que, en la matriz cementosa, los nanotubos de carbono crean más trayectorias conductoras, lo que mejora la conductividad inicial y preserva las variaciones con respecto a la muestra sin adición (0.0 %). Sin embargo, la tendencia general para todos los ejemplos es una lenta disminución de la conductividad a medida que pasan los días, lo que refleja cómo el mortero genera una microestructura menos permeable con el tiempo. Sumado a esto, la adición del 1.0 % de MWCNT no presenta una conductividad notablemente superior a los 28 días frente a la adición de 0.5 %, lo que indica que una mezcla con el 0.5 % muestra una buena conductividad y que duplicar su adición no significa necesariamente incrementar proporcionalmente el valor de la conductividad. Los especímenes utilizados correspondieron a los empleados en los ensayos de compresión, razón por la cual se encontraban completamente saturados.

Figura 4-20. Evolución de la Conductividad Eléctrica en Morteros con Diferentes Porcentajes de MWCNT.



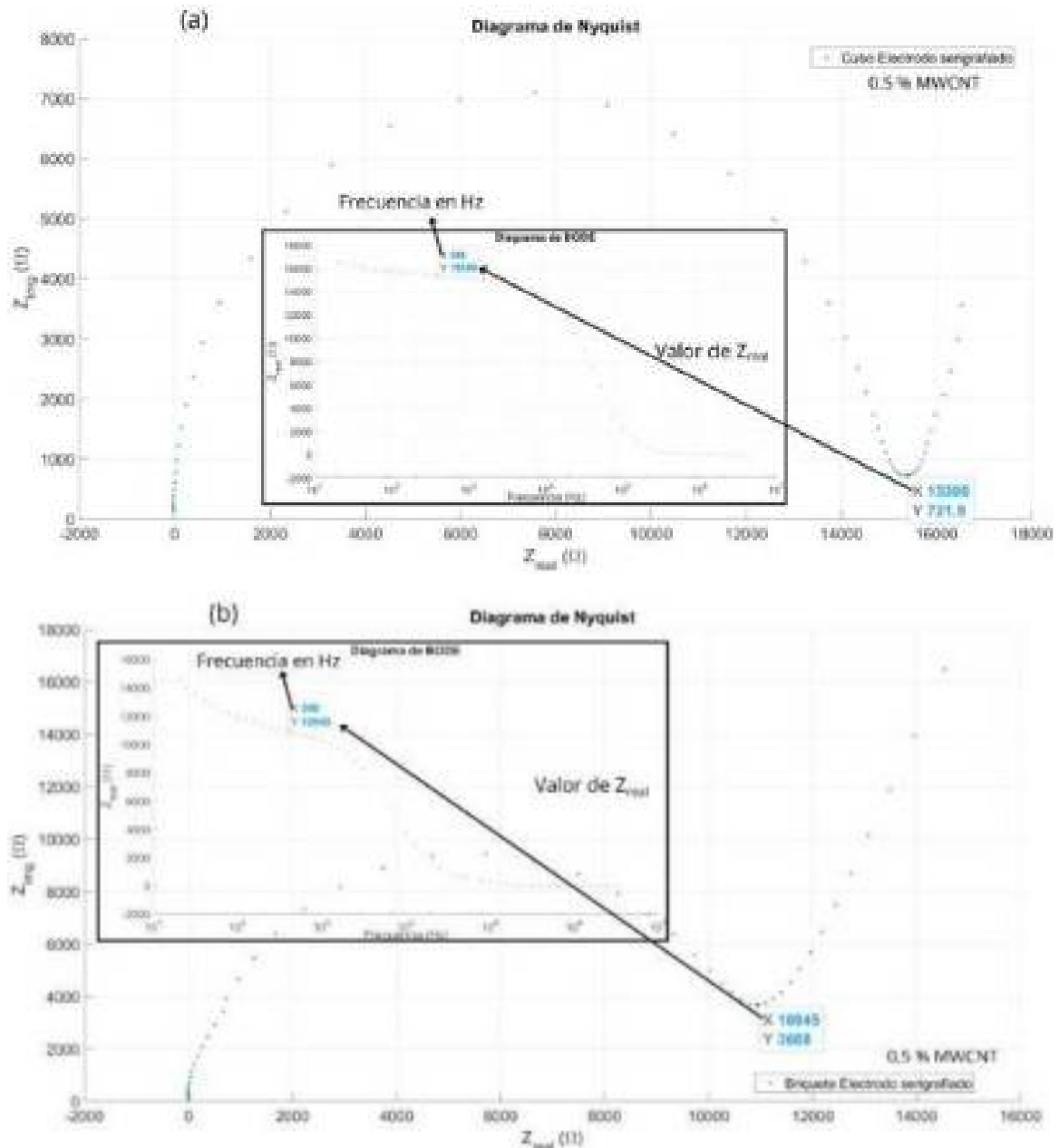
4.4.2 Selección de frecuencia ensayos de AC

En un diagrama de Nyquist, cada punto representa la impedancia imaginaria y real del sistema a una frecuencia específica. Conforme se varía la frecuencia de la señal de excitación, se pueden observar distintas contribuciones de la muestra (por ejemplo, el efecto de la matriz cementante y el efecto del electrodo). En la zona de transición entre el comportamiento de la matriz cementante y el electrodo, se identifica el valor de Z_{img} menor, de donde se calcula el valor de R (ver **Figura 3-38**), este valor está asociado a una frecuencia en el diagrama de Bode, que será la utilizada para el ensayo de EIS de frecuencia simple, debido a su optima sensibilidad en las mediciones.

Los ensayos de EIS potencioestático se realizaron para todos los especímenes, y se comprobó que aquellos que presentan la misma configuración (cantidad de adición de MWCNT, geometría y electrodo) presentaron variaciones mínimas en los datos. Debido a esto, la frecuencia identificada para cada grupo de especímenes con la misma configuración fue igual y se decidió presentar únicamente el promedio de los datos. En la **Figura 4-21** se muestra el diagrama de Nyquist y de Bode correspondiente a un espécimen cubico y a uno en forma de briqueta con electrodo serigrafiado, con el fin ilustrar la

determinación de la frecuencia. En el **Anexo B** se muestran todas las gráficas de Nyquist para cada tipo de especímenes como sus respectivos electrodos.

Figura 4-21. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo (a) y briqueta (b) con electrodo serigrafado, con adición de 0.5 % MWCNT.



La **Tabla 4-8** muestra para cada espécimen y disposición de electrodos las frecuencias encontradas utilizando los gráficos de Nyquist y Bode. Una de las características más relevantes es la tendencia de las frecuencias características a disminuir a medida que aumenta la adición de MWCNT. Esto puede explicarse por el hecho de que una mayor

concentración de MWCNT cambia la respuesta electroquímica y aumenta la conductividad interna del material, produciendo así valores de frecuencia más pequeños.

En cuanto al electrodo de malla de alambre en las muestras cúbicas, se encuentran frecuencias bastante altas. Este comportamiento podría estar relacionado con el área de contacto efectiva del electrodo, que en el caso del cubo podría ser menor, produciendo así una respuesta distintiva a altas frecuencias. En cambio, las briquetas tienen una tendencia menos marcada, probablemente porque sus menores dimensiones, lo que permite una mayor área de contacto con el electrodo de malla, obteniendo así un valor menor de la frecuencia.

Por lo tanto, los valores que se muestran en la **Tabla 4-8** resaltan no solo las variaciones en los diseños de los moldes (cubo y briqueita), sino también el efecto del tipo de electrodo (lámina, malla y serigrafiado) y la adición de MWCNT.

Tabla 4-8. Cuadro resumen de las frecuencias determinadas mediante los diagramas de Nyquist y Bode.

Adición de MWCNT	Molde	Tipo de electrodo		
		Lamina de acero	Malla de alambre de acero	Electrodo serigrafiado cerámico
0.0 %	Cubo	15890 Hz	99800 Hz	1976 Hz
0.5 %		315.5 Hz	79270 Hz	398 Hz
1.0 %		252.4 Hz	79270 Hz	398 Hz
0.0 %	Briqueita	15890 Hz	15890 Hz	1976 Hz
0.5 %		252.4 Hz	495.8 Hz	398 Hz
1.0 %		198.6 Hz	315.5 Hz	-

4.5 Respuesta eléctrica ante cargas mecánicas

La pérdida del contenido de agua en los especímenes es un variable que afecta la sensibilidad en la medición de eléctrica, debido a que al haber presencia de iones de agua dentro de la matriz hace que haya un incremento en la conductividad. Sin embargo, a medida que se va secando el espécimen la conductividad eléctrica se ve afectada, por esta

razón los especímenes se ensayaron una vez alcanzaron un equilibrio con la humedad del ambiente, con el fin de minimizar este efecto y asegurar la confiabilidad de las mediciones.

En la **Figura 4-22** se presentan los resultados derivados de la variación de las mediciones sucesivas de la masa en las muestras en forma de briqueta. Dado que estas briquetas son físicamente más pequeñas, su proceso de pérdida del contenido de agua hasta alcanzar un contenido de humedad cercano al equilibrio se produce en menos tiempo. La variación de la masa (en el eje vertical) se reduce y se acerca a valores inferiores al 0.1 % a medida que avanza el tiempo (en el eje horizontal). La norma NTC 4024 define que una muestra está en equilibrio con la humedad en el ambiente y que no hay pérdida apreciable de contenido de agua cuando la diferencia en mediciones de masa consecutivas es igual o inferior al 0.1 %.

La **Figura 4-23** hace referencia a los especímenes en forma de cubos, que pierden contenido de agua más lentamente debido a su tamaño más grande. A medida que pasan las horas, es evidente que las curvas de variación de masa de los cubos convergen de manera similar hacia valores bajos, alrededor del 0.1 %. Pero este proceso dura más que el de las briquetas, precisamente por las mayores dimensiones de los cubos y el volumen de agua retenida.

Las curvas que reflejan el uso de MWCNT en porcentajes variables (0.0 %, 0.5 % y 1.0 %) revelan primero variaciones algo menores, pero en general siguen la misma tendencia de pérdida de contenido de agua hasta estabilizarse. Alcanzar este estado (con variaciones de masa inferiores o iguales al 0.1 % en mediciones consecutivas) tiene como objetivo garantizar que, durante la medición eléctrica de la resistencia (Z_{real}), el factor relacionado con el contenido de agua residual tenga poco efecto en los resultados eléctricos. Las briquetas lograron estabilizarse a los 7 días, mientras los especímenes en forma de cubo lo lograron en 10 días, después de esto ya la diferencia entre pesos era insignificante.

Figura 4-22. Evolución de la Pérdida de contenido de agua en Briquetas.

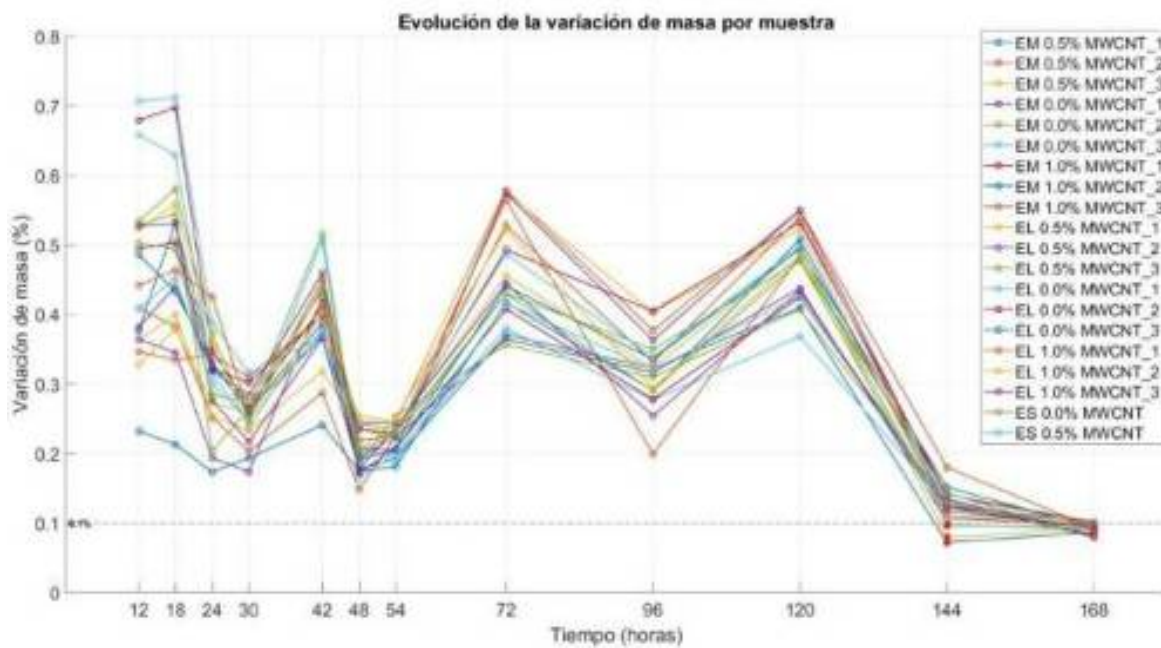
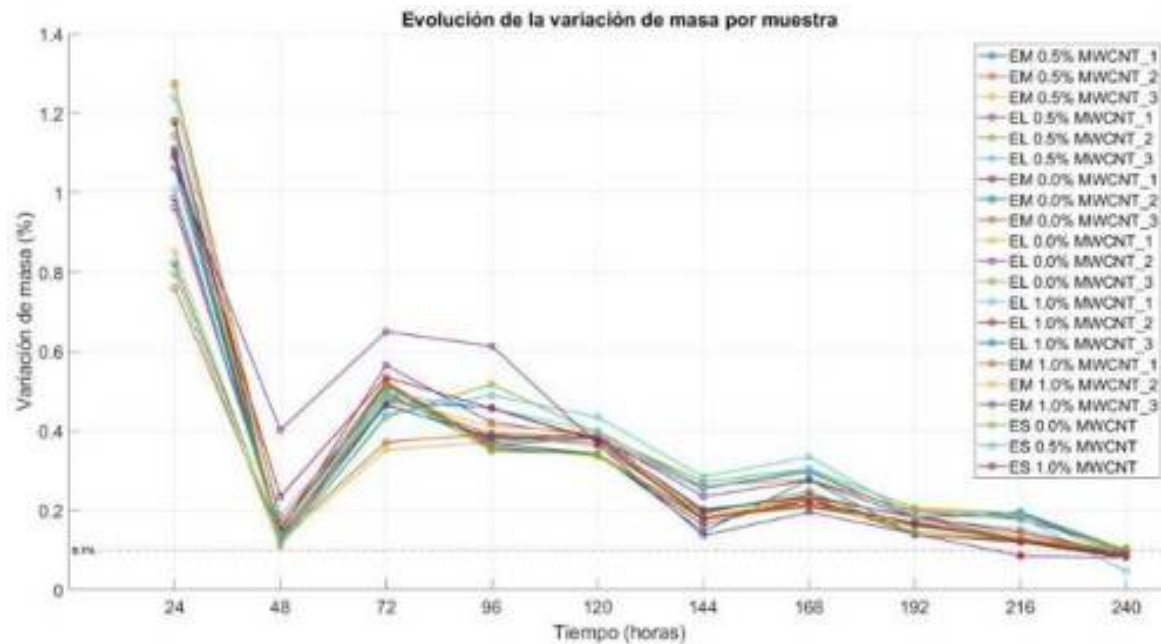


Figura 4-23. Evolución de la Pérdida de contenido de agua en Cubos.



La codificación que se utilizara para en esta sección por cada tipo de espécimen se presenta en la **Tabla 4-9**.

Tabla 4-9. Codificación para los especímenes, dependiendo de su forma y tipo de electrodo.

Adición de MWCNT	Molde	Tipo de electrodo		
		Lamina de acero	Malla de alambre de acero	Electrodo serigrafiado cerámico
0.0 %	Cubo	CEL 0.0 % MWCNT	CEM 0.0 % MWCNT	CES 0.0 % MWCNT
0.5 %		CEL 0.5 % MWCNT	CEM 0.5 % MWCNT	CES 0.5 % MWCNT
1.0 %		CEL 1.0 % MWCNT	CEM 1.0 % MWCNT	CES 1.0 % MWCNT
0.0 %	Briqueta	BEL 0.0 % MWCNT	BEM 0.0 % MWCNT	BES 0.0 % MWCNT
0.5 %		BEL 0.5 % MWCNT	BEM 0.5 % MWCNT	BES 0.5 % MWCNT
1.0 %		BEL 1.0 % MWCNT	BEM 1.0 % MWCNT	-

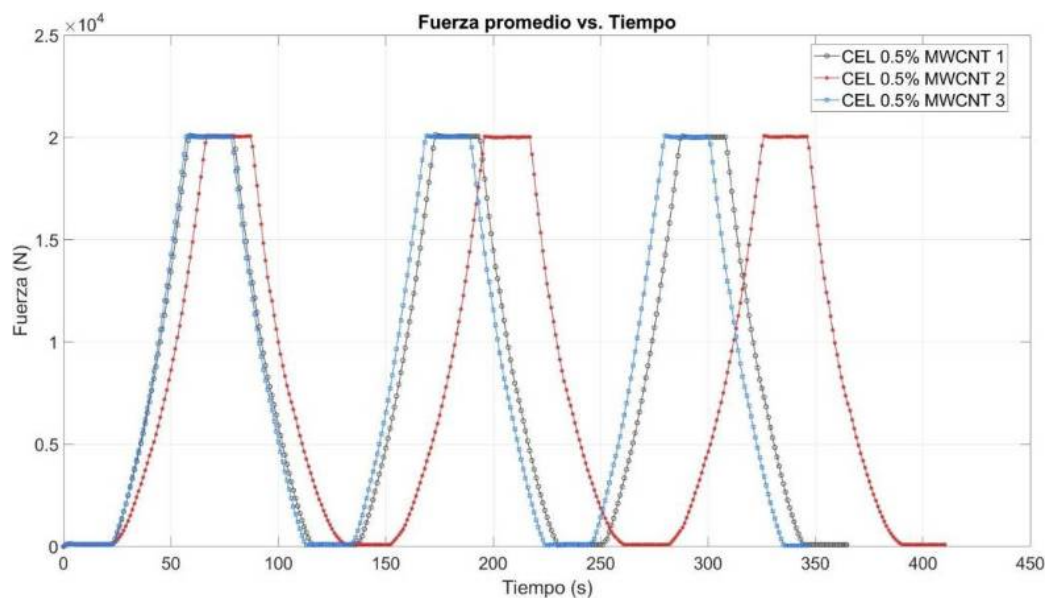
En la **Tabla 3-23** se detalla la cantidad de especímenes elaborados según la forma y el tipo de electrodo. Para los electrodos de lámina y malla de acero, se elaboraron tres muestras tanto en forma de cubos como de briquetas. En cambio, en el caso de los especímenes con electrodo serigrafiado, solo se cuenta con un ejemplar por cada adición de MWCNT y por cada forma, a excepción de la briqueta con 1.0 % de MWCNT. Esto se debe a que únicamente había cinco electrodos disponibles y debido a su alto costo, se optó por descartar un tipo de espécimen. La decisión recayó en los especímenes que utilizaban 1.0 % de MWCNT, pues se evidenció que la trabajabilidad de la mezcla disminuye cuando aumenta la cantidad de MWCNT. Además, el mortero sometido a tensión no presenta resultados tan efectivos, ya que su resistencia es mucho más baja en comparación con la compresión. Estas dos consideraciones explican la razón de utilizar un electrodo serigrafiado para esa forma y esa adición de MWCNT. Por último, se ha identificado que duplicar la cantidad de MWCNT no duplica su eficiencia en la medición de la impedancia.

4.5.1 Reproducibilidad experimental

En el análisis de las gráficas de la respuesta eléctrica de los especímenes, sometidos a cargas de compresión y tensión con tres repeticiones mediante el primer ciclo definió en la metodología, se apreció una alta estabilidad en los resultados. Esto indica que, dentro de las mismas condiciones experimentales, el comportamiento eléctrico no presenta

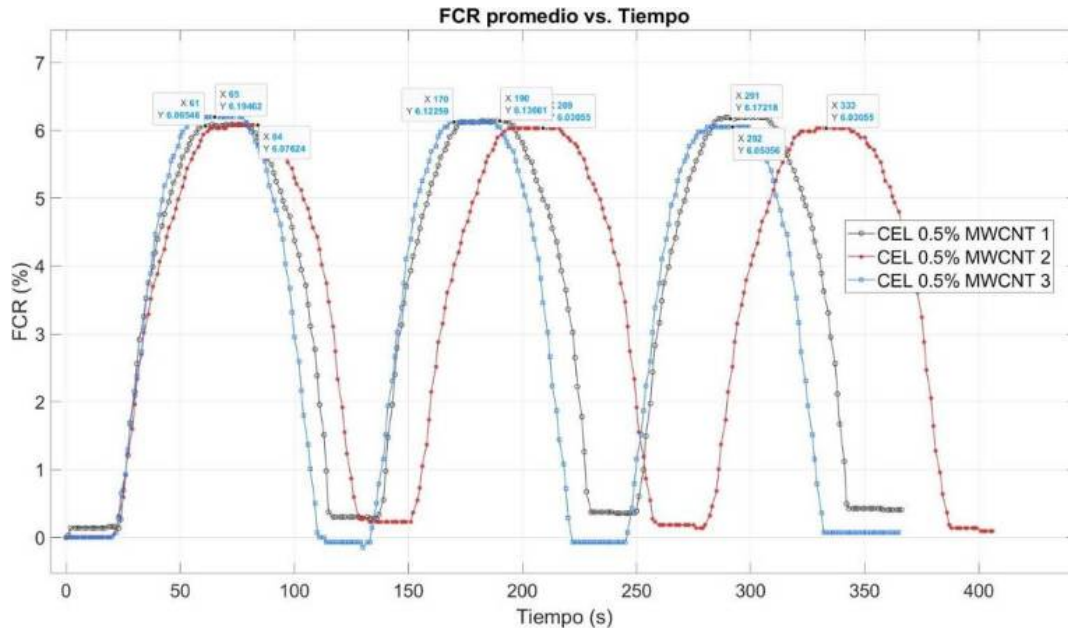
variaciones significativas. También se encontró que los valores promedio de cada repetición coinciden con los de especímenes que comparten la misma forma y el tipo de electrodo, lo que demuestra que el procedimiento ofrece reproducibilidad confiable. Cabe aclarar que las gráficas no son exactamente iguales entre diferentes especímenes con la misma adición y electrodo, ya que cada espécimen al ser ubicado en la maquina universal, presentaba una diferencia en el momento de aplicar los ciclos de carga, esto se ve evidenciado en la **Figura 4-24**. Esta diferencia se debe a la sensibilidad de la máquina, ya que al momento de manipular el desmonte y volver a montar los especímenes ocasiona que se afecte la acomodación al aplicar la fuerza de la maquina en el espécimen. Esta diferencia no compromete el experimento, puesto que las gráficas de FCR de cada tipo de espécimen reflejan el mismo comportamiento que el ciclo de carga al que fueron sometidas. En ocasiones la diferencia era mínima.

Figura 4-24. Ciclos de carga para los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.



La diferencia en las gráficas en la **Figura 4-24** se ve también reflejada en los valores promedio de FCR (**Figura 4-25**) para cada espécimen ante esos ciclos de carga. Se destaca que la diferencia entre los valores máximos de la carga es pequeña de alrededor del 1.8 % entre ellos.

Figura 4-25. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga (20000 N) en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.



Los bajos valores del coeficiente de variación ponen de manifiesto la reducida dispersión relativa en la media del FCR en un espécimen. Al examinar las gráficas, se confirma de manera visual la consistencia de estos datos. Por esta razón se presentarán las gráficas utilizando especímenes con adición de 0.5 % MWCNT, variando la forma del espécimen y tipo de electrodo. En el **Anexo C** se presentan los demás porcentajes.

La **Figura 4-26** muestra tres repeticiones de un ciclo de carga hasta los 20000 N en cubos de compresión con electrodos de lámina de acero y 0.5% de MWCNT. Cada ciclo (1.1, 1.2 y 1.3) refleja prácticamente el mismo comportamiento, lo que indica una alta consistencia en las mediciones. Además, el promedio cuenta con barras de error para ilustrar el margen de dispersión de los valores, que resulta bastante reducido. El cálculo del coeficiente de variación máximo, cercano al 1.95%, confirma que la variabilidad en los datos de FCR es mínima, validando así el uso del promedio para representar el desempeño del espécimen de manera confiable. En cuanto a la **Figura 4-27**, con electrodo de malla, y la **Figura 4-28**, con electrodo serigrafiado, muestran comportamientos muy similares al ser sometidos ciclos de carga de 20000 N. En ambos casos, los tres ciclos presentan curvas prácticamente superpuestas y un coeficiente de variación muy reducido. Esta consistencia respalda la confiabilidad de las mediciones, pues indica que cada configuración de

electrodo mantiene un excelente nivel de repetibilidad, lo cual justifica el uso del valor promedio para representar el desempeño del material compuesto multifuncional.

Por otro lado, los especímenes con forma de briqueta se sometieron a ciclos de tensión hasta 200 N, lo que naturalmente genera mayor dispersión en los datos, pues el mortero resulta menos estable bajo tensión. La **Figura 4-29**, con electrodo de lámina de acero, muestra una curva más uniforme y el coeficiente de variación más bajo, lo que indica buena precisión. El segundo mejor resultado proviene del electrodo serigrafiado (**Figura 4-31**), que, aunque presenta algo de fluctuación, conserva una forma de ciclo definida. Por último, la malla de alambre de acero (**Figura 4-30**) exhibe la dispersión más notable, donde los picos de los ciclos son claros y repetibles.

Figura 4-26. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEL 0.5 % MWCNT.

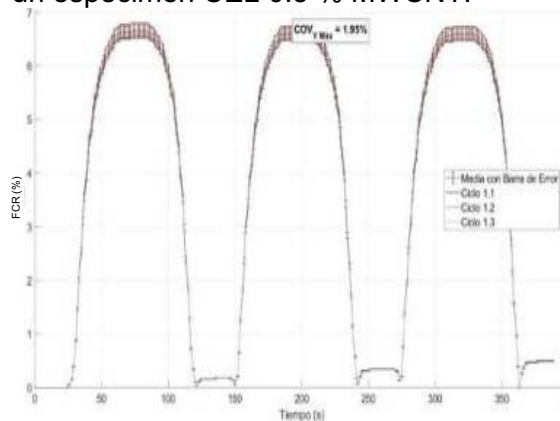


Figura 4-27. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEM 0.5 % MWCNT.

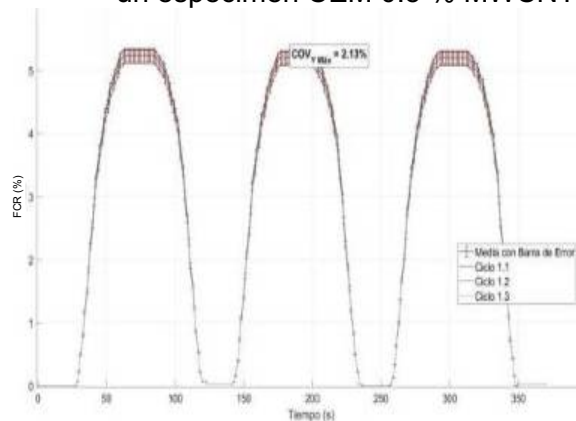


Figura 4-28. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CES 0.5 % MWCNT.

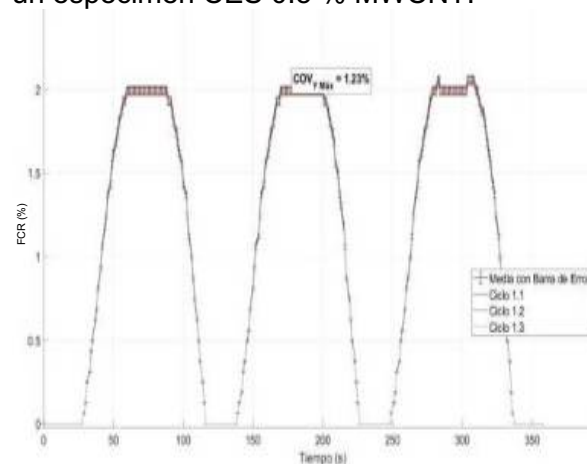


Figura 4-29. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEL 0.5 % MWCNT.

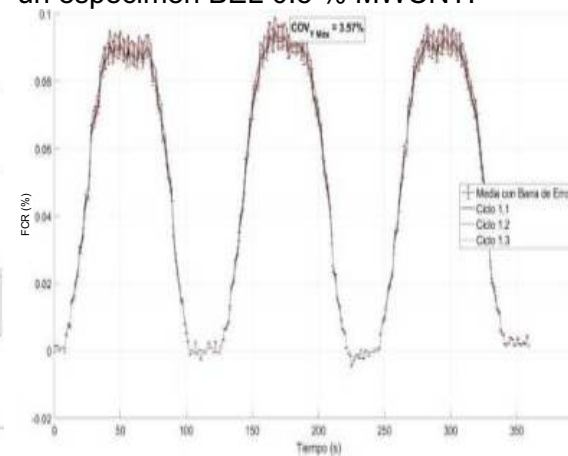


Figura 4-30. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEM 0.5 % MWCNT.

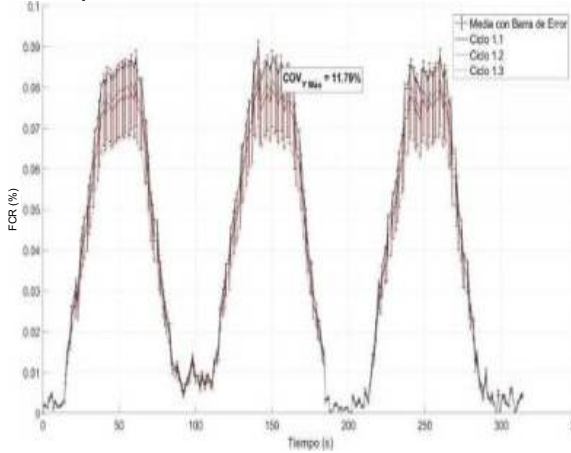
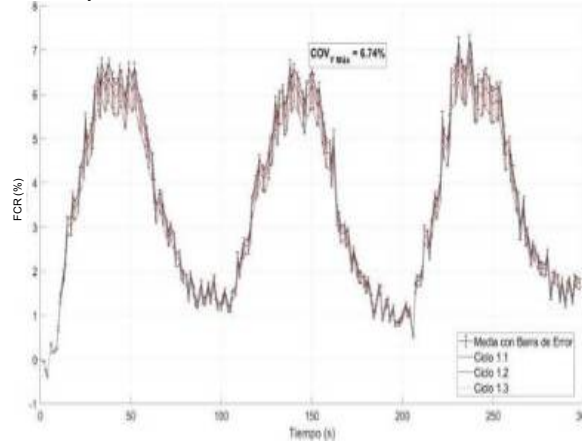


Figura 4-31. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BES 0.5 % MWCNT.



La **Tabla 4-10** recopila los COV encontrados al evaluar varias combinaciones de porcentajes de nanotubos (0.0 %, 0.5 % y 1.0 %), forma de la muestra (cubo o briqueta) y tipo de electrodo (lamina de acero, malla de alambre de acero o electrodo serigrafiado cerámico). Como reflejo de la disminución de los niveles de COV, se puede observar que la estabilidad de la respuesta eléctrica mejora a medida que aumenta la proporción de MWCNT. Además, los cubos muestran menos dispersión en los datos que las briquetas, lo que indica que la carga de compresión proporciona más fiabilidad durante el registro de la señal eléctrica.

Vale la pena destacar que el mejor comportamiento en cuanto estabilidad de datos se presenta en los electrodos de tipo lamina de acero, esto se debe a su mayor área de contacto que tienen estos electrodos, haciendo que se presente un mejor flujo de corriente.

Tabla 4-10. Coeficientes de variación (COV) según forma del espécimen, adición de MWCNT y tipo de electrodo.

Adición de MWCNT	Molde	Tipo de electrodo		
		Lamina de acero	Malla de alambre de acero	Electrodo serigrafiado cerámico
0.0 %	Cubo	3.17 %	2.07 %	4.49 %
0.5 %		1.95 %	2.13 %	1.23 %
1.0 %		1.56 %	1.95 %	1.05 %
0.0 %	Briqueta	6.98 %	18.03 %	13.4 %

Adición de MWCNT	Molde	Tipo de electrodo		
		Lamina de acero	Malla de alambre de acero	Electrodo serigrafiado cerámico
0.5 %		3.57 %	11.79 %	6.74 %
1.0 %		3.15 %	9.55 %	-

En relación con las configuraciones de electrodos que tienen 3 especímenes (lamina de acero y malla de alambre de acero) se realizó una comparación con el promedio resultante de aplicar tres ciclos de carga a cada espécimen, con el propósito de poder evaluar su reproducibilidad teniendo distintos especímenes. Se debe tener en cuenta el fenómeno de la variación en la forma de la gráfica, debido al desmonte y volver a montar los especímenes en la máquina.

La reproducibilidad entre diferentes especímenes que comparten la misma configuración, en cuanto a porcentaje de adición de MWCNT y tipo de electrodo se analizaron mediante la forma del gráfico y variación del valor máximo. En general, las formas de las curvas muestran una gran repetibilidad entre ciclos, la pequeña variación en las curvas de cada espécimen se debe principalmente al montaje y desmontaje de los especímenes, que puede proporcionar diferencias en el aplicación de la carga.

La adición de 0.5 % MWCNT para los especímenes con electrodo de lámina (**Figura 4-32**) tiene un COV en los valores de los picos de 0.99 %, lo que implica una buena estabilidad y repetibilidad de los resultados. En los especímenes con electrodo de malla (**Figura 4-33**), la mejor repetibilidad también se observa con la concentración de 0.5 % de MWCNT (COV = 1.12 %), todas las demás concentraciones ofrecen valores de variación bastante bajos, lo que indica una consistencia muy sobresaliente en general.

Figura 4-32. FCR promedio vs Tiempo, para especímenes en forma de cubo con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo tipo lamina de acero.

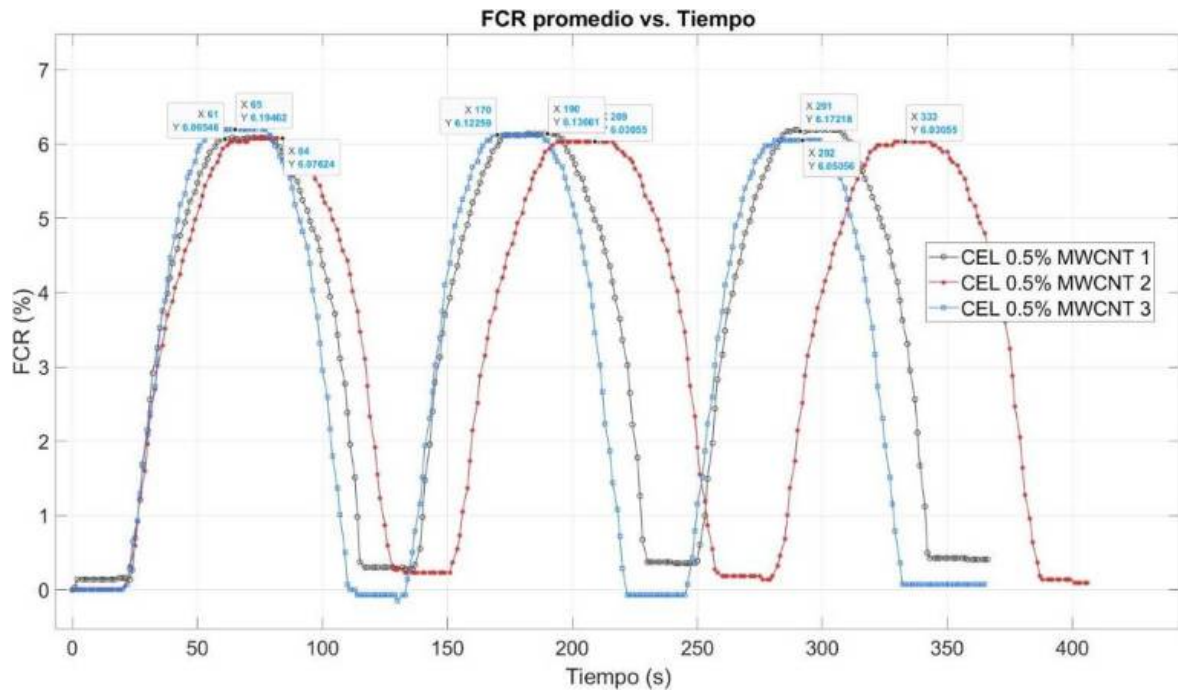
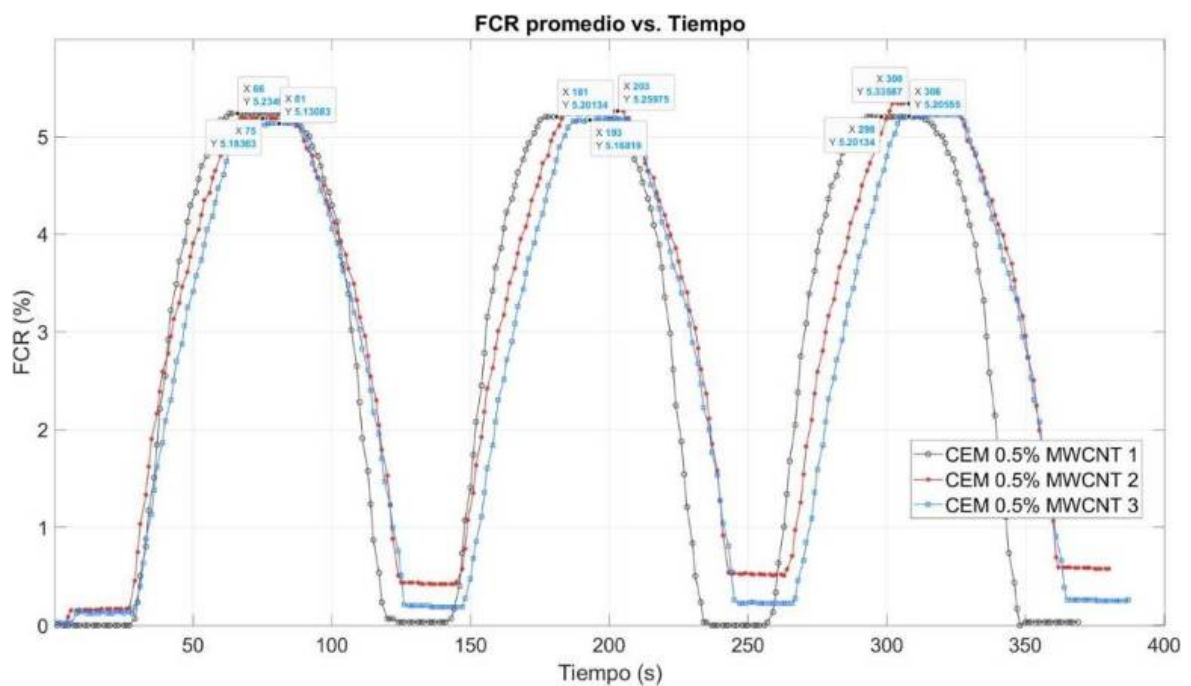


Figura 4-33. FCR promedio vs Tiempo, para especímenes en forma de cubo con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo tipo malla de alambre de acero.



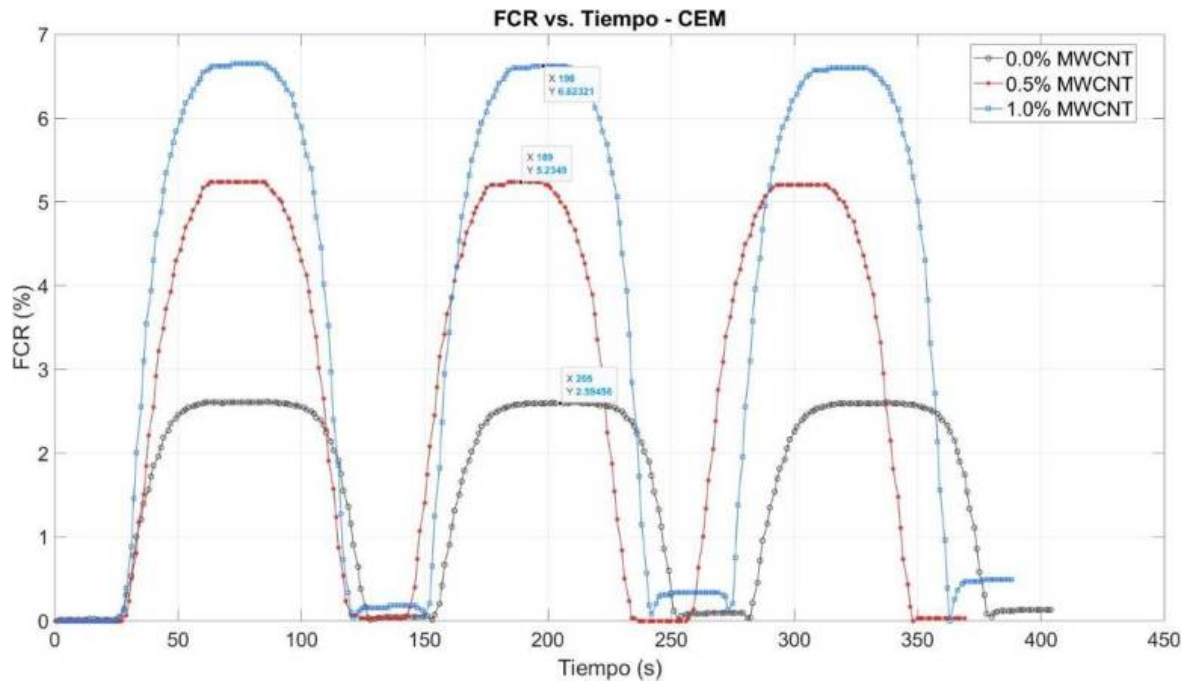
Los bajos valores de COV en los diferentes porcentajes de los especímenes en forma de cubo confirma que es ideal para producir mediciones consistentes y repetibles en condiciones controladas. Además, la definición y la forma consistente de las curvas en todos los casos ayudan a justificar la conclusión de que las variaciones limitadas encontradas están relacionadas principalmente con la técnica experimental y no con elementos intrínsecos de los materiales o electrodos utilizados, ya que las formas coinciden con las gráficas de los ciclos de fuerza aplicados por la máquina.

Por último, los especímenes en forma de briquetas presentan mayores valores de COV, esto debido a que los datos no son tan estables, propios del comportamiento en tensión del mortero, sin embargo, el máximo valor de variación es aproximadamente 8 % y se presenta en los especímenes con electrodo de malla sin MWCNT. A medida que se aumenta la adición de MWCNT se ve reflejada la menor variación de estos datos, obteniendo valores entre 4 % y 2 % de COV, las gráficas más estables se presentan con los electrodos de lámina de acero. Las gráficas asociadas a estos especímenes se encuentran en el **Anexo C (Figura C - 24 hasta la Figura C - 30)**.

De la **Figura 4-34** hasta la **Figura 4-39** analizan cómo la adición de MWCNT influye en la respuesta eléctrica medida por el cambio fraccional de resistencia (FCR) en diferentes muestras y tipos de electrodos.

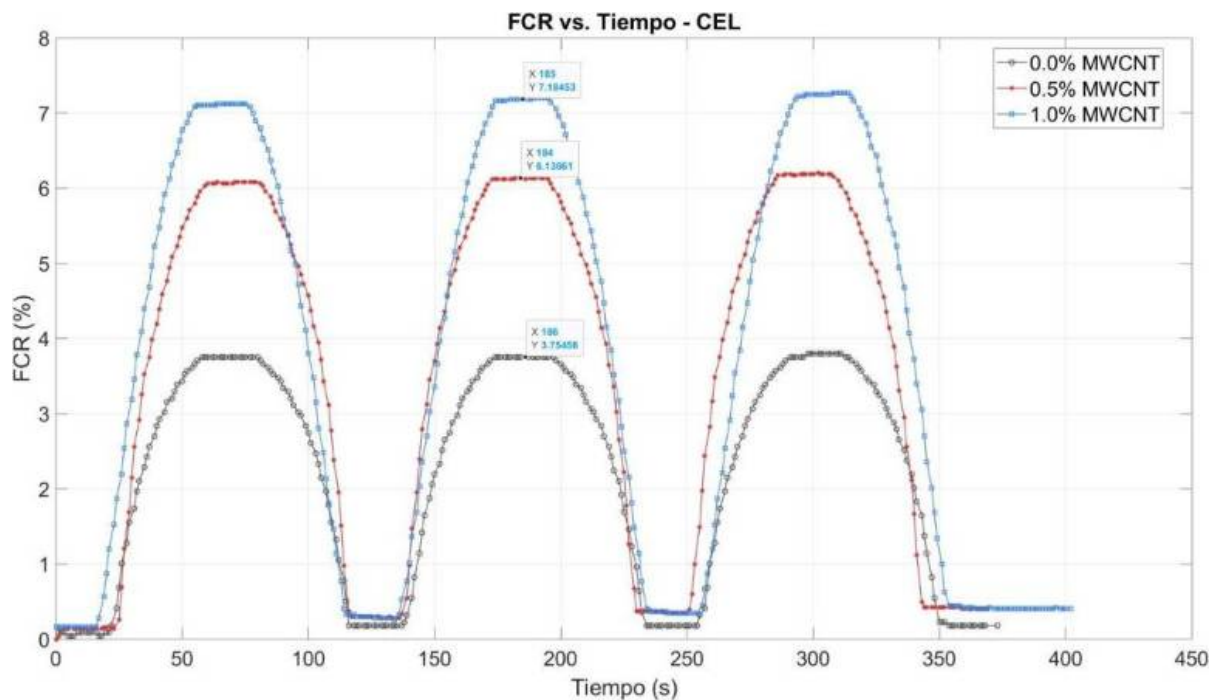
La **Figura 4-34** ilustra cómo un aumento en el porcentaje de MWCNT mejora significativamente los valores máximos de FCR. En esta gráfica, el valor máximo aumenta de aproximadamente 2.59 % sin MWCNT hasta alrededor de 6.63 % con 1.0 % de MWCNT. Es notable que con una mayor adición de MWCNT, la curva se estabiliza más rápidamente, exhibiendo un comportamiento más definido y consistente.

Figura 4-34. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de cubo con electrodo tipo malla de alambre de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.



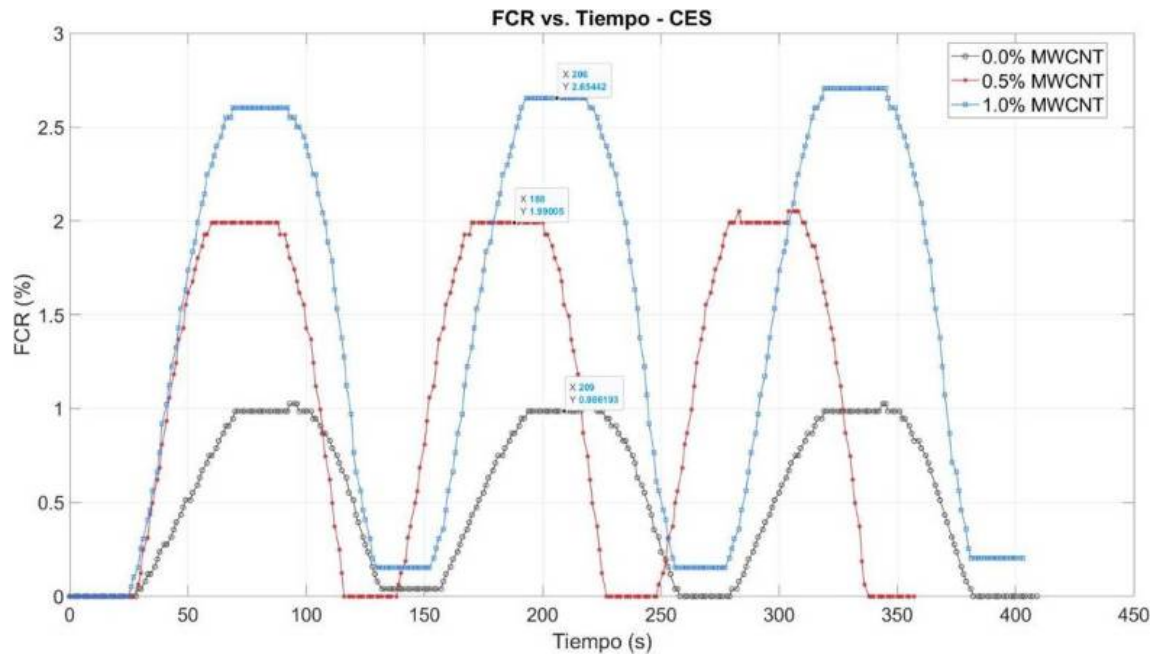
En la **Figura 4-35**, se observa una tendencia similar, con aumentos aún más pronunciados en los valores máximos de FCR a medida que aumenta la concentración de MWCNT. La adición de un 1.0 % de MWCNT alcanza valores cercanos al 7.18 %, lo que pone de evidencia que el electrodo de lámina de acero en especímenes cúbicos es el que tiene el mejor rendimiento global en términos absolutos de respuesta eléctrica. Al comparar la mezcla sin MWCNT vs la adición de 0.5 %, se presenta una mejora de alrededor del 65 %, esto indica una clara mejora en la respuesta eléctrica con la adición de MWCNT.

Figura 4-35. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de cubo con electrodo tipo lamina de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.



La **Figura 4-36**, correspondiente a especímenes cúbicos con electrodos serigrafiados, muestra valores absolutos considerablemente más bajos en comparación con las gráficas anteriores. Sin embargo, también demuestra el efecto positivo del aumento de la concentración de MWCNT, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 2.65 % con 1.0 % de MWCNT. A pesar de la menor magnitud, esta configuración mantiene curvas bien definidas y consistentes, lo que refuerza la influencia positiva general de la adición de MWCNT. En este caso la adición de 0.5% MWCNT presenta un incremento del FCR del doble con respecto a un espécimen sin adición, mostrando así la mejora en la sensibilidad eléctrica que ofrece los MWCNT.

Figura 4-36. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de cubo con electrodo serigrafiado cerámico, variando el porcentaje de adición de MWCNT.



En cuanto a la **Figura 4-37**, **Figura 4-38** y **Figura 4-39**, relacionadas con especímenes en forma de briquetas, se observa un comportamiento menos uniforme debido a la dificultad inherente de medir las respuestas eléctricas bajo tensión. En la **Figura 4-37**, aunque los valores absolutos de FCR son bajos, el aumento de la adición de MWCNT mejora claramente la magnitud de la respuesta. Los ciclos de carga como se indicó en la metodología es hasta 200 N.

La **Figura 4-38**, que utiliza electrodos de lámina de acero, muestra curvas más claramente definidas y una mejora notable con un mayor contenido de MWCNT, alcanzando valores superiores en comparación con la configuración de malla de alambre. Por último, la **Figura 4-39**, que emplea electrodos serigrafiados, registra los valores más altos de FCR entre los especímenes de briquetas, lo que indica la alta sensibilidad de este electrodo. No obstante, muestra una variabilidad significativa, lo que afecta a la estabilidad.

Figura 4-37. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de briqueta con electrodo tipo malla de alambre de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.

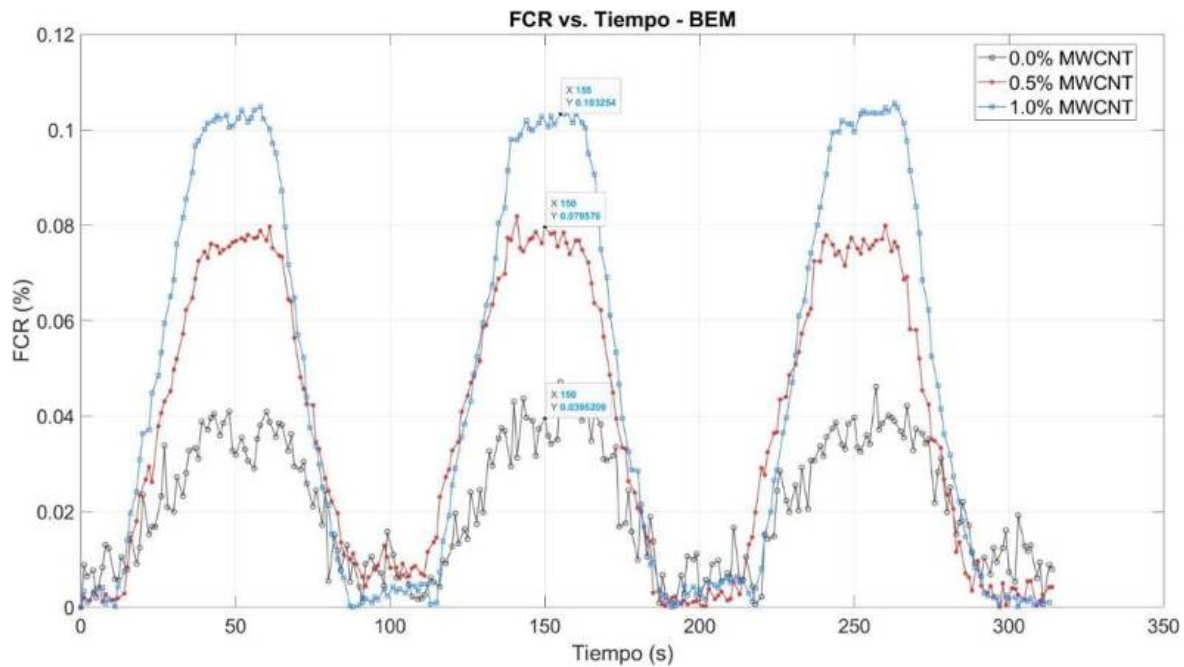


Figura 4-38. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de briqueta con electrodo tipo lamina de acero, variando el porcentaje de adición de MWCNT.

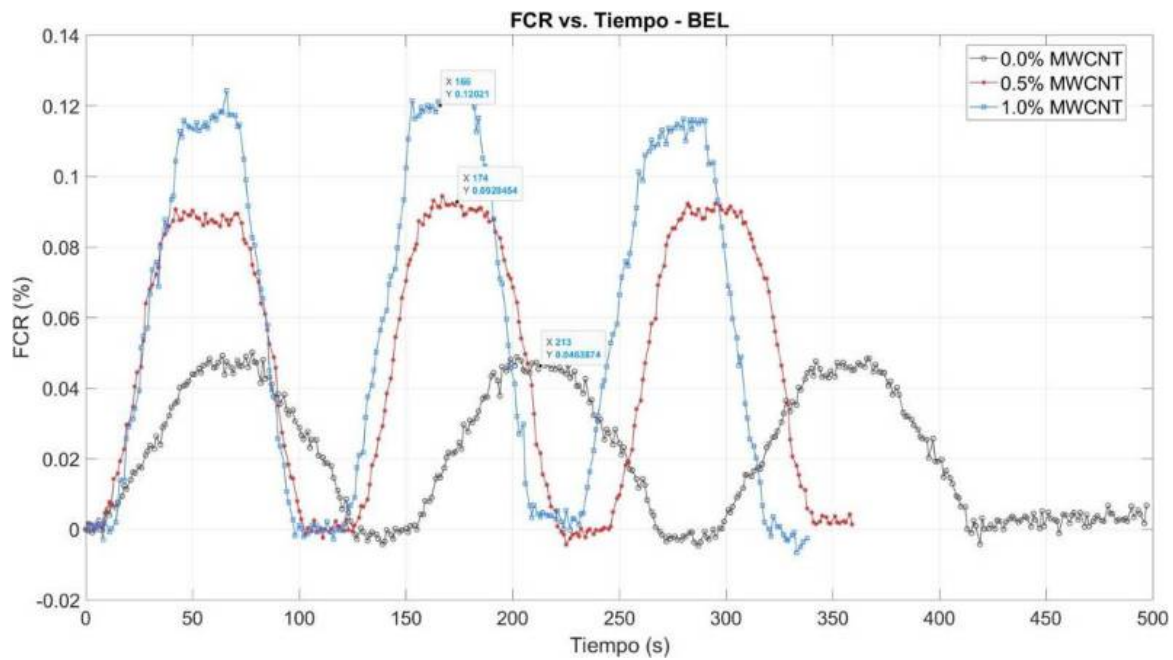
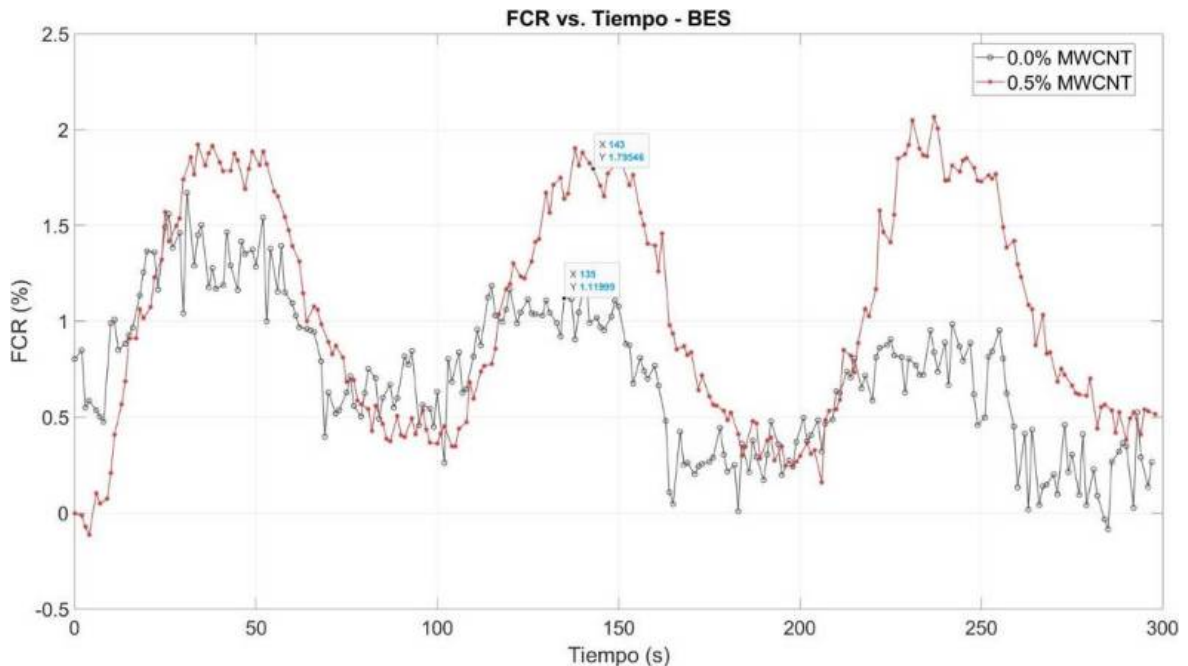


Figura 4-39. FCR vs Tiempo para especímenes en forma de briqueta con electrodo serigrafiado cerámico, variando el porcentaje de adición de MWCNT.



En conclusión, entre las configuraciones cúbicas, el electrodo de lámina de acero (CEL) proporciona los valores más altos de FCR y una excelente estabilidad, lo que lo convierte en la opción ideal para estudios destinados a maximizar la respuesta eléctrica. Para los especímenes en forma de briqueta, aunque el electrodo serigrafiado (BES) arroja los valores más altos, su variabilidad sugiere preferir el electrodo de lámina de acero (BEL), ya que garantiza datos más estables y fiables, esenciales para un análisis reproducible y consistente. Además, se identificó que las respuestas eléctricas a una adición de 0.5 % de MWCNT no difieren significativamente de las obtenidas a 1.0 %, lo que hace que la adición de 0.5 % sea una opción adecuada teniendo en cuenta que dosis más altas pueden afectar negativamente a la trabajabilidad de la mezcla sin proporcionar mejoras proporcionales en la respuesta eléctrica, esto sumado a que la adición del 0.5 % incrementa en la mayoría de los casos el doble del FCR en comparación a los especímenes sin MWCNT.

4.5.2 Respuesta de especímenes ante cargas mecánicas

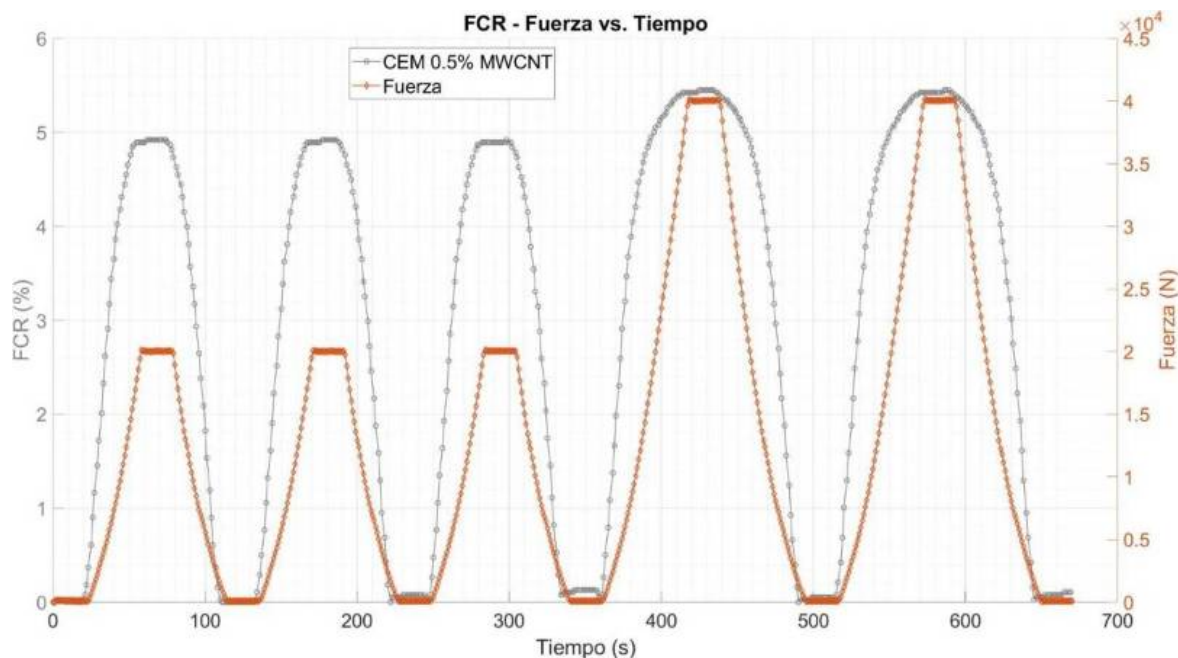
En esta parte se examinarán los gráficos que muestran el FCR frente a la fuerza aplicada, por lo que se relacionan especialmente con el segundo ciclo de carga. Los ciclos de carga empleados consisten en dos repeticiones a 40000 N después de tres repeticiones a

20000 N en compresión. Los ciclos de carga de tensión se llevaron a cabo tres veces hasta 200 N y luego dos veces hasta 400 N. Este análisis pretende evaluar en especímenes con diferentes configuraciones de electrodos y una adición del 0.5 % de MWCNT la sensibilidad, la consistencia y la correlación entre la carga mecánica y la respuesta eléctrica.

Cubos con electrodo de malla de alambre (CEM 0.5 % MWCNT)

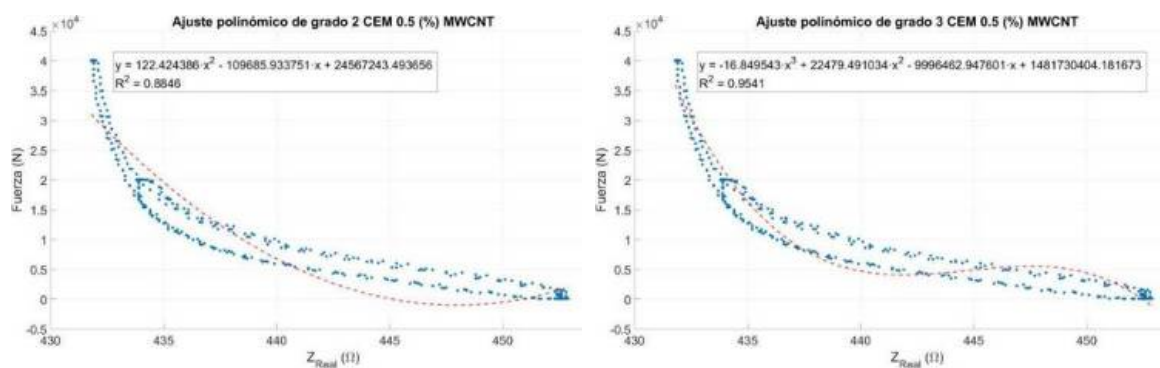
En la **Figura 4-40**, se observa una respuesta clara y definida del espécimen. Los picos de FCR siguen de cerca los ciclos de fuerza aplicados, lo que pone de manifiesto una sincronización bien definida entre la carga mecánica y la respuesta eléctrica. Los valores máximos en torno al 4.9 % ante las cargas de 20000 N y 5.4 % ante cargas de 40000 N, lo que demuestra estabilidad y una buena correlación con los incrementos de fuerza. Este electrodo presenta solo una diferencia de 0.5 % entre el primer ciclo de carga y el segundo, por lo cual el FCR no evidencia el incremento del doble de la carga del segundo ciclo. Esto podría deberse a la poca área del electrodo, incapaz de representar mayores cambios de la fuerza.

Figura 4-40. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo malla de alambre de acero.



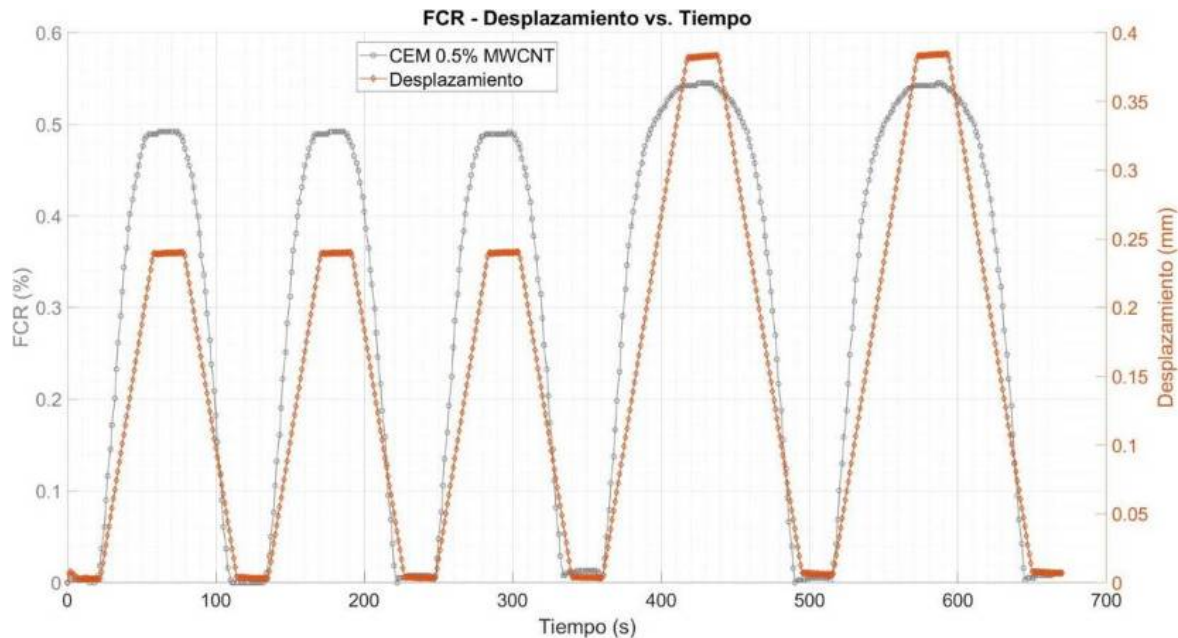
El gráfico de correlación (**Figura 4-41**) muestra cómo los valores de impedancia disminuyen a medida que aumenta la carga de compresión, lo que confirma que el electrodo de malla de alambre captura la reducción típica de la resistencia eléctrica bajo compresión. El ajuste polinómico, ya sea cuadrático o cúbico, sigue de cerca los datos medidos, produciendo un alto valor R^2 (0.88 para un polinomio de segundo orden y 0.95 para un polinomio de tercer orden). En general, la curva refleja de manera convincente la relación fuerza-impedancia esperada.

Figura 4-41. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen cubico con electrodo tipo malla de alambre de acero.



Se comparo el desplazamiento del cabezal de la maquina con el FCR (**Figura 4-42**), en donde se llegó a un desplazamiento de 0.24 mm y 0.38 mm en el ciclo de 20000 N y 40000 N respectivamente. Al igual que con la gráfica de FCR vs Fuerza después del primer ciclo los valores de FCR tienden a incrementar mucho menos en comparación del primer ciclo de carga.

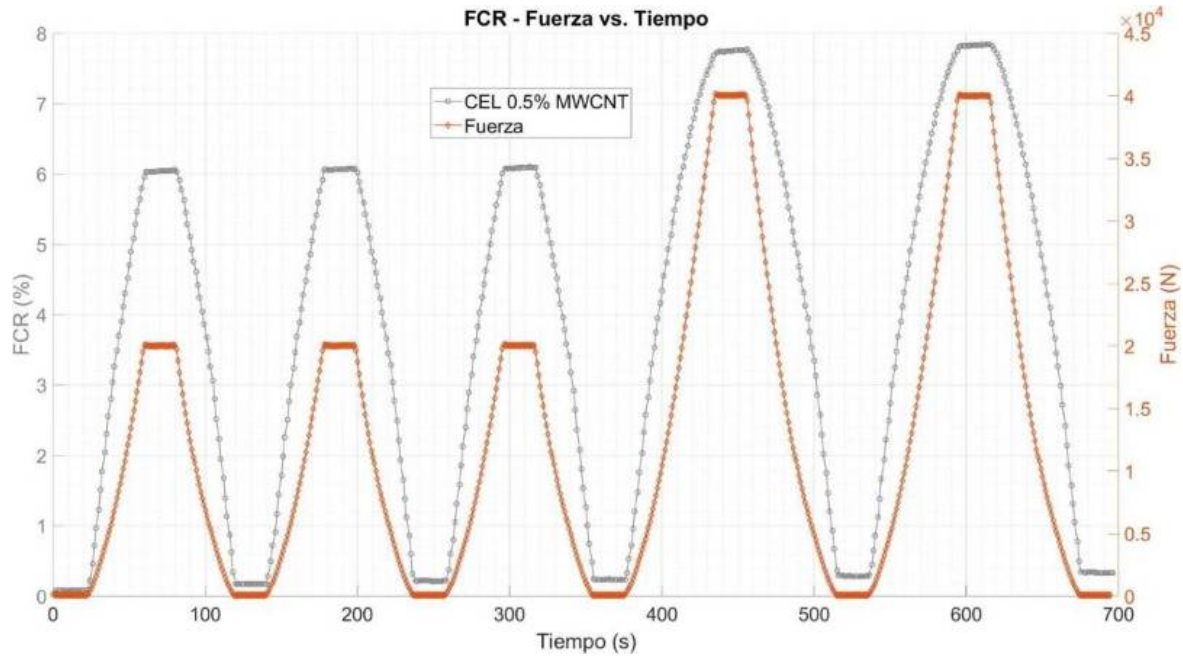
Figura 4-42. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo malla de alambre de acero.



Cubos con electrodo de lámina de acero (CEL 0.5 % MWCNT)

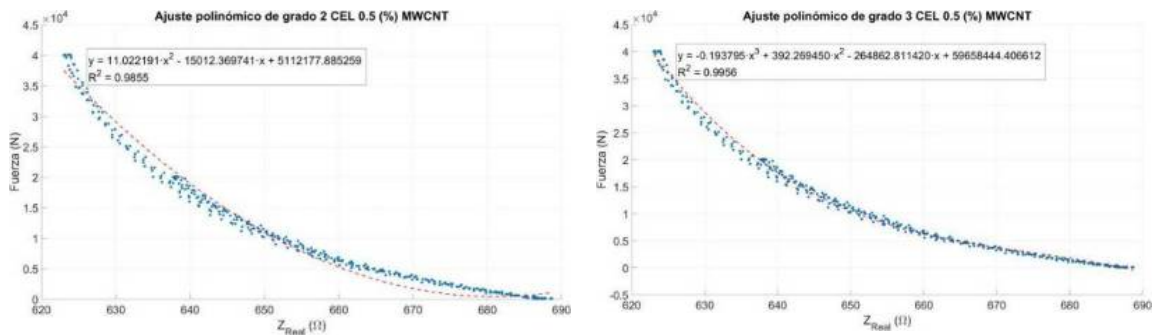
La **Figura 4-43** muestra una correlación especialmente fuerte entre la fuerza aplicada y la respuesta FCR. Los picos de respuesta eléctrica (alrededor de 6.1 % para carga de 20000 N y 7.7 % para 40000 N) coinciden directamente con los picos de los ciclos de carga aplicados, lo que demuestra una excelente reproducibilidad y sensibilidad. Además, la respuesta es ligeramente más pronunciada y distinta que la del electrodo de malla de alambre (1.6 % de diferencia entre los picos de carga), lo que indica un mejor rendimiento en la respuesta de los cambios a la compresión mecánica.

Figura 4-43. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo lamina de acero.



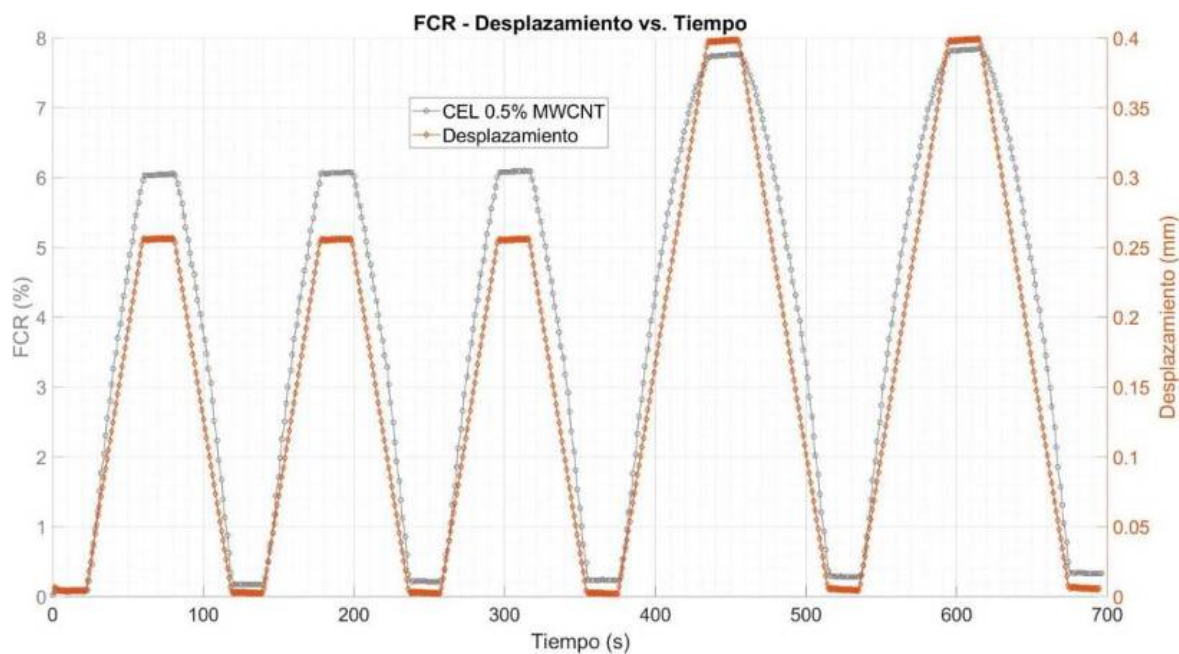
La correlación del electrodo de lámina de acero (**Figura 4-44**) muestra un ajuste con residuos mínimos, lo que significa que el polinomio captura casi toda la variación en la impedancia. A medida que aumenta la carga de compresión, la impedancia disminuye de forma constante, lo que pone de manifiesto la sensibilidad del electrodo incluso a cambios moderados de fuerza. Tanto los ajustes cuadráticos como los cúbicos producen un alto R^2 (casi 1), pero la correlación cúbica a veces ofrece una representación más matizada de la fase de carga inicial. Esta consistencia hace que el CEL sea uno de los que mejor funciona para captar una caída clara de la impedancia bajo compresión.

Figura 4-44. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen cubico con electrodo tipo lamina de acero.



La grafica de desplazamiento vs FCR (**Figura 4-45**) muestra como el desplazamiento en el segundo ciclo (40000 N) no es del doble del primero (20000 N), se tiene un desplazamiento de 0.25 mm en el primer ciclo y de 0.40 mm en el segundo, la diferencia corresponde a 0.15 mm. Esto quiere indicar que las diferencias entre picos son más semejantes entre FCR y desplazamiento ya que en cuanto a la fuerza la diferencia entre picos es el doble.

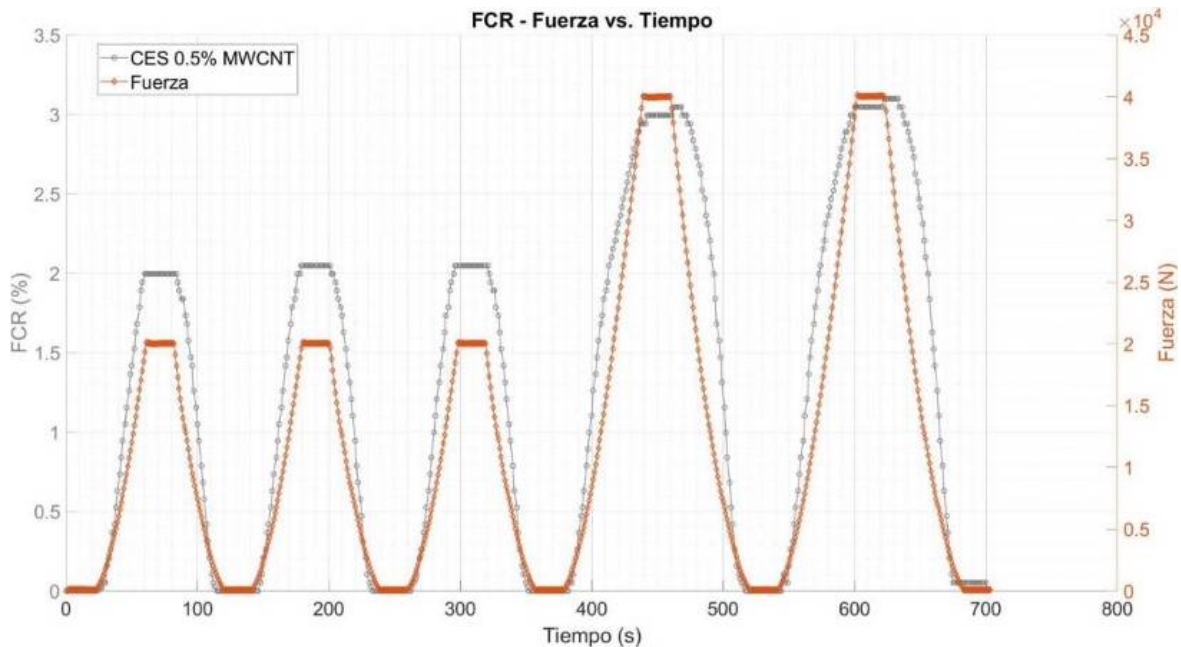
Figura 4-45. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo lamina de acero.



Cubos con electrodo serigrafiado (CES 0.5 % MWCNT)

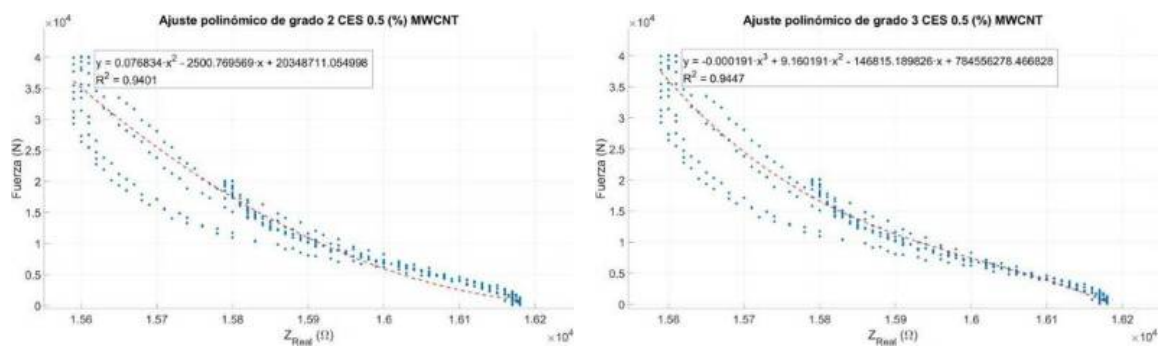
La **Figura 4-46** ilustra curvas bien definidas que siguen con precisión los ciclos de carga. Aunque los valores máximos de FCR (aproximadamente 2.0 % a 20000 N y 3.0 % a 40000 N) son comparativamente más bajos que los de los electrodos de lámina de acero o de malla, la consistencia y claridad de la respuesta indican una buena fiabilidad. Por lo tanto, este electrodo proporciona mediciones eléctricas robustas y reproducibles, pero carece de la magnitud observada en la configuración CEL.

Figura 4-46. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo serigrafiado cerámico.



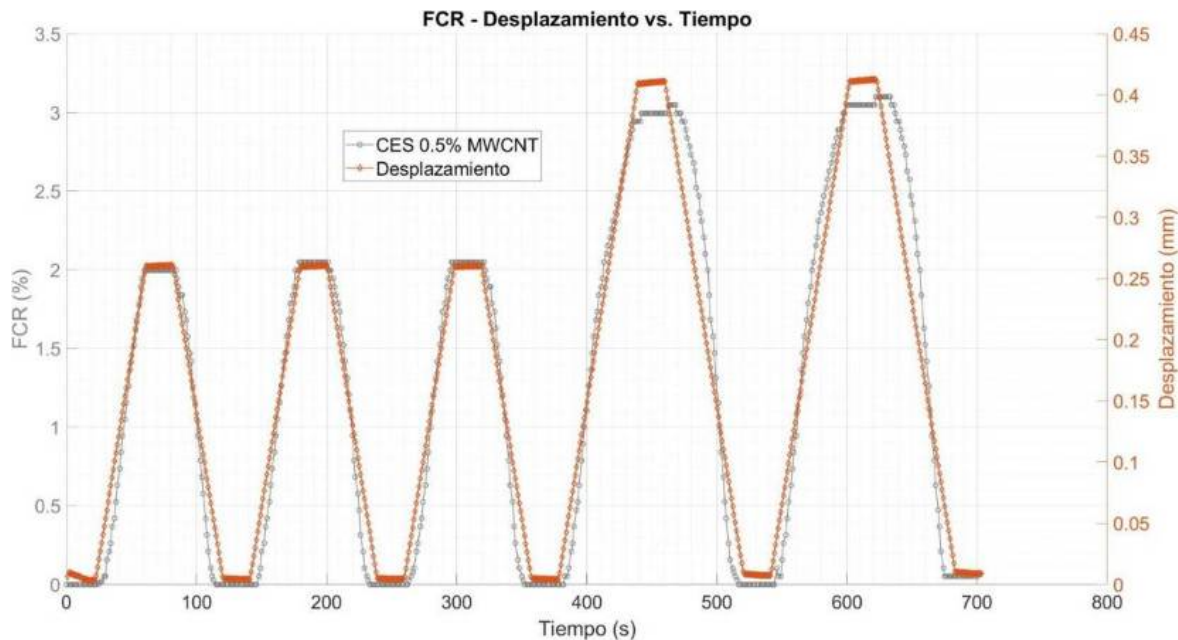
El electrodo serigrafiado responde bien al aumento de las cargas de compresión (**Figura 4-47**), aunque el cambio de impedancia es ligeramente menos pronunciado en comparación con los especímenes CEL o CEM. El gráfico de correlación indica una suave tendencia a la baja de la impedancia, aunque ocasionalmente muestra pequeñas fluctuaciones en las fuerzas de rango medio. El polinomio cúbico a menudo se alinea más estrechamente con estas fluctuaciones, elevando el R^2 más allá de lo que logra el modelo cuadrático.

Figura 4-47. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen cubico con electrodo tipo serigrafiado cerámico.



La **Figura 4-48** muestra la curva de desplazamiento y de FCR para un espécimen con electrodo serigrafiado con gran semejanza, de esta gráfica se puede concluir que el FCR muestra un comportamiento más parecido al desplazamiento, lo que tiene sentido al estar los flujos de corriente estrechamente relacionados con la matriz de cemento.

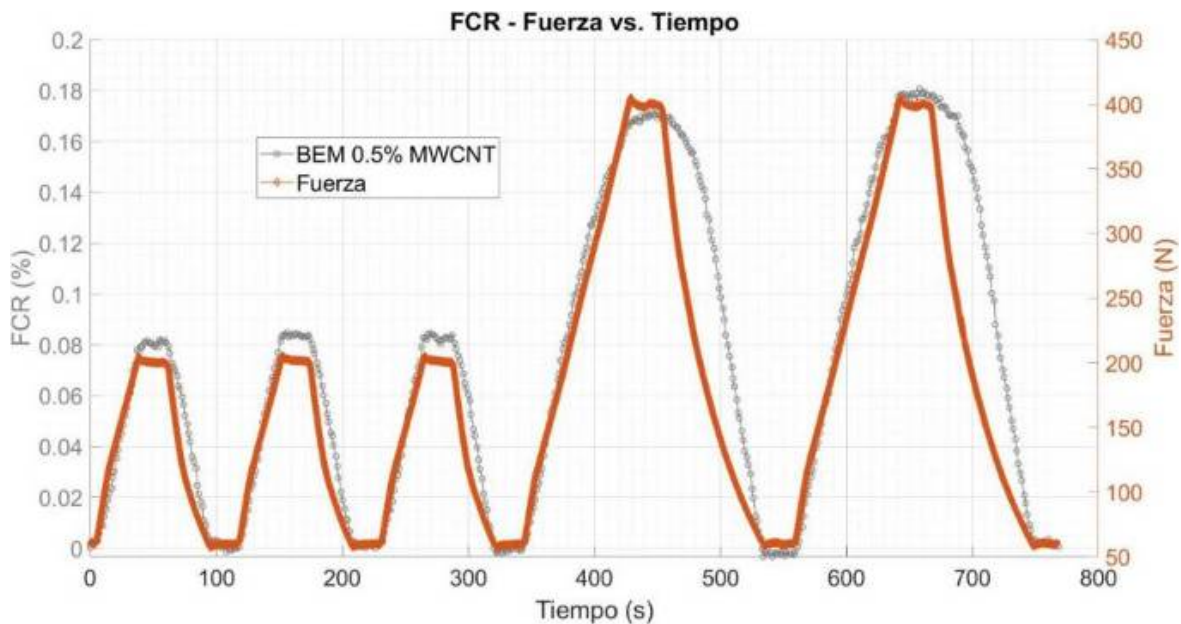
Figura 4-48. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (20 kN y 40 kN), electrodo tipo serigrafiado cerámico.



Briquetas con electrodo de malla de alambre (BEM 0.5 % MWCNT)

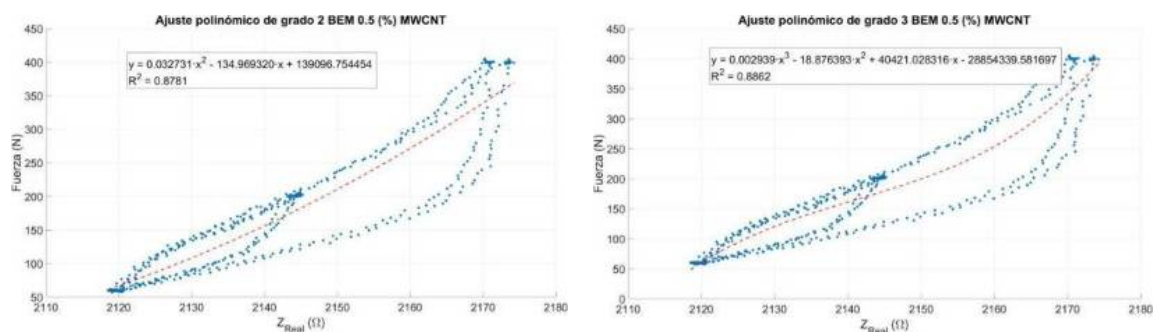
El electrodo de malla de alambre en especímenes de briquetas bajo carga de tensión muestra respuestas eléctricas bajas (**Figura 4-49**), con valores máximos de alrededor del 0.08 % a 200 N y 0.17 % a 400 N. Esta respuesta es consistente en los diferentes ciclos de carga y descarga, destacando la capacidad de los MWCNT para detectar las variaciones en la carga tensión que suele ser más complejo. Además, la reproducibilidad del patrón observado en ciclos sucesivos valida la eficacia del material compuesto como sensor piezoresistivo. La diferencia entre los picos es de 0.09 %.

Figura 4-49. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo malla de alambre de acero.



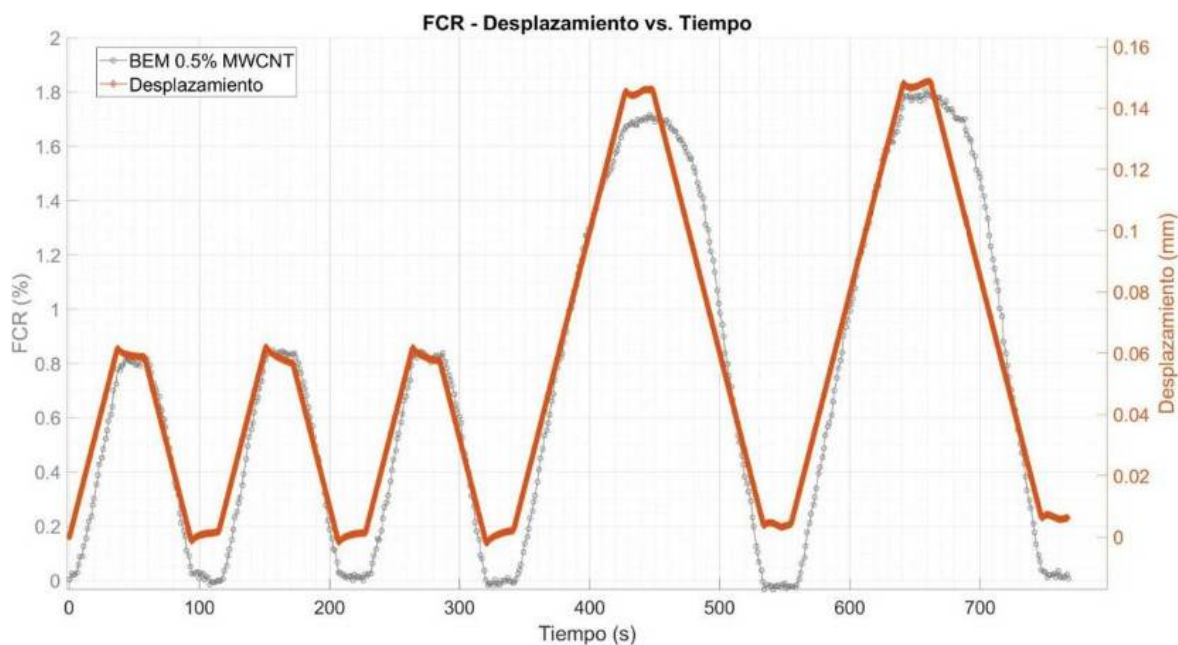
Bajo tensión, la impedancia aumenta a medida que se aplica la carga, al contrario que en los casos de compresión, aunque los cambios incrementales son algo moderados. El electrodo de malla de alambre muestra un R^2 aceptable (**Figura 4-50**), lo que significa una correlación razonablemente estable, pero con algunos datos que se desvían ligeramente de la curva polinómica prevista. La ganancia de impedancia inducida por la tensión es coherente con el fenómeno observado en todas las briquetas tensadas.

Figura 4-50. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, espécimen en forma de briqueta con electrodo tipo malla de alambre de acero.



En la **Figura 4-51** se muestra una relación estrecha entre el cambio FCR y el desplazamiento del cabezal de la maquina registrado. Los valores máximos del desplazamiento coinciden con los picos en el FCR, lo que indica una buena sensibilidad del material para detectar pequeñas deformaciones (0.06 mm a 200 N y 0.15 mm a 400N). Este comportamiento sugiere que los MWCNT pueden ser empleados en mediciones de tensión.

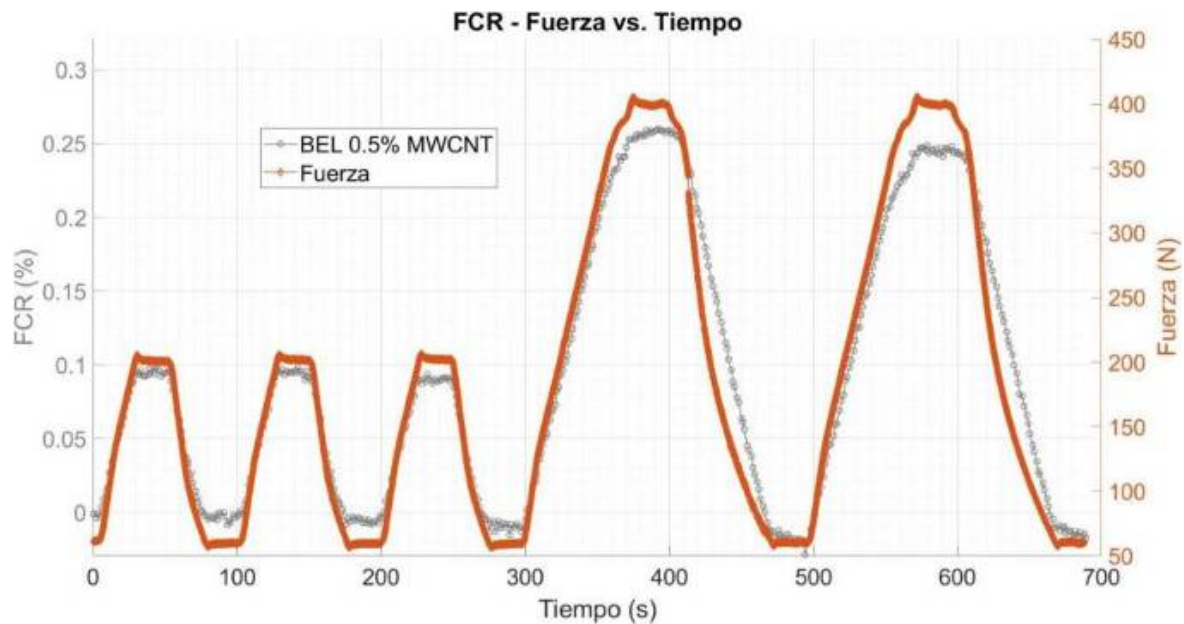
Figura 4-51. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo malla de alambre de acero.



Briquetas con electrodo de lámina de acero (BEL 0.5 % MWCNT)

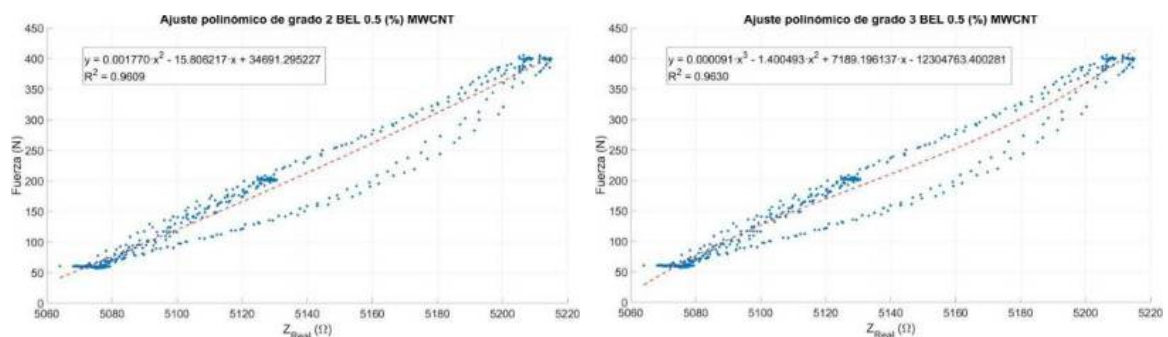
Para briquetas bajo tensión, el electrodo de lámina de acero muestra una sensibilidad igualmente moderada (**Figura 4-52**), con valores máximos de alrededor del 0.095 % a 200 N y 0.25 % a 400 N. La forma clara y estable de las curvas de respuesta se alinea estrechamente con los patrones de carga mecánica, lo que hace que esta configuración de electrodo sea preferible para lograr un equilibrio entre sensibilidad y estabilidad. La diferencia entre los picos es de 0.155 %, lo que sugiere una mayor sensibilidad con respecto al electrodo tipo malla.

Figura 4-52. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo lamina de acero.



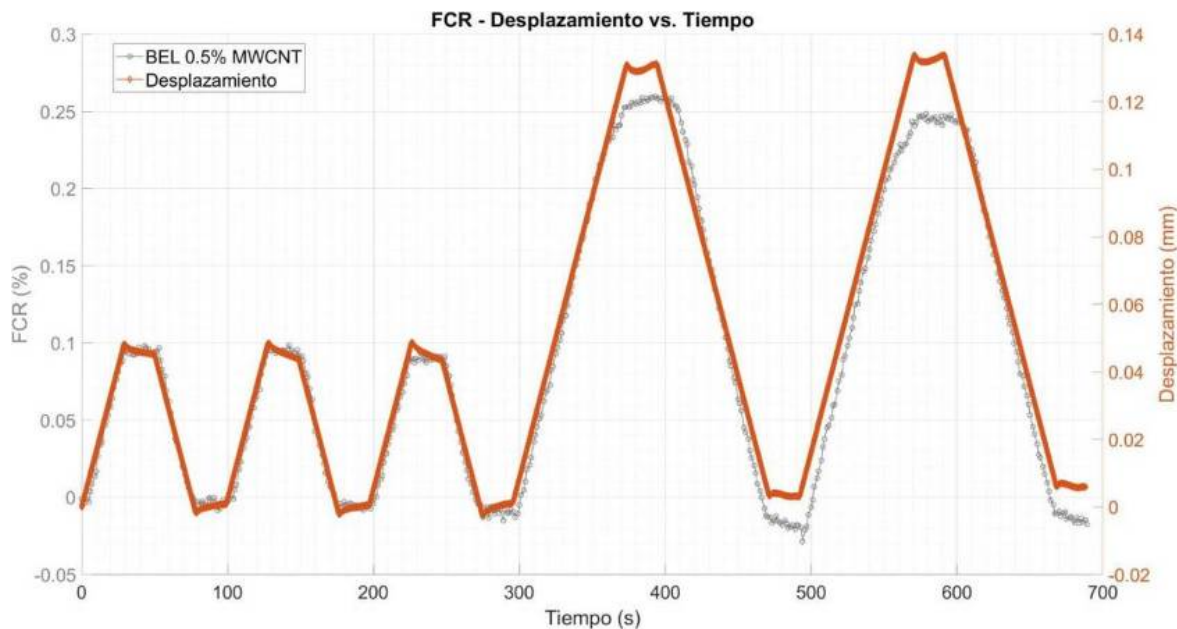
El electrodo de lámina de acero presenta una de las respuestas de tensión más estables en términos de calidad de correlación (**Figura 4-53**). La impedancia aumenta de forma constante con la carga aplicada, y tanto los ajustes cuadráticos como los cúbicos siguen de cerca este aumento. En particular, el ajuste cúbico maneja pequeñas no linealidades cerca de la transición de niveles de tensión más bajos a más altos, empujando el R^2 un poco más alto. En términos prácticos, esto implica que el electrodo es lo suficientemente sensible para detectar variaciones y lo suficientemente estable para producir ecuaciones de correlación fiables.

Figura 4-53. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, electrodo tipo lamina de acero.



La **Figura 4-54** muestra una relación directa entre la curva de FCR y de desplazamiento en los primeros ciclos, lo cual señala un excelente comportamiento en cargas de hasta 200 N después baja un poco la sensibilidad, sin embargo, continúa reflejando un comportamiento estable y sensible. El desplazamiento en los primeros ciclos es aproximadamente 0.045 mm y al aumentar la carga es de 0.13 mm.

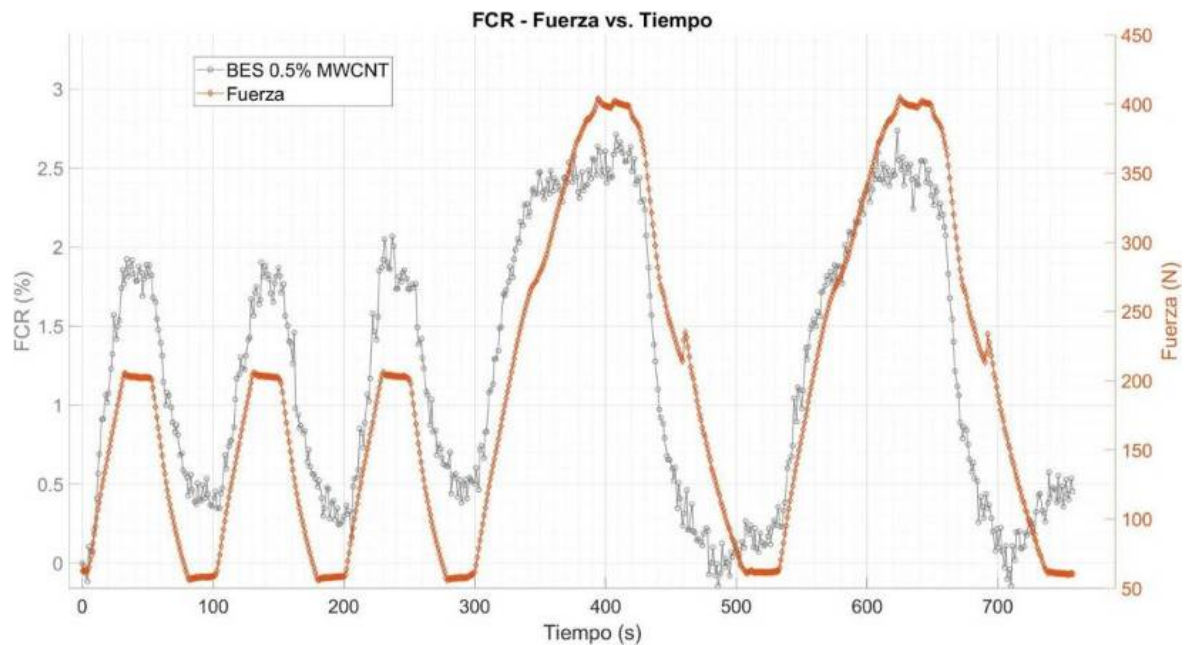
Figura 4-54. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo lamina de acero.



Briquetas con electrodo serigrafiado (BES 0.5 % MWCNT)

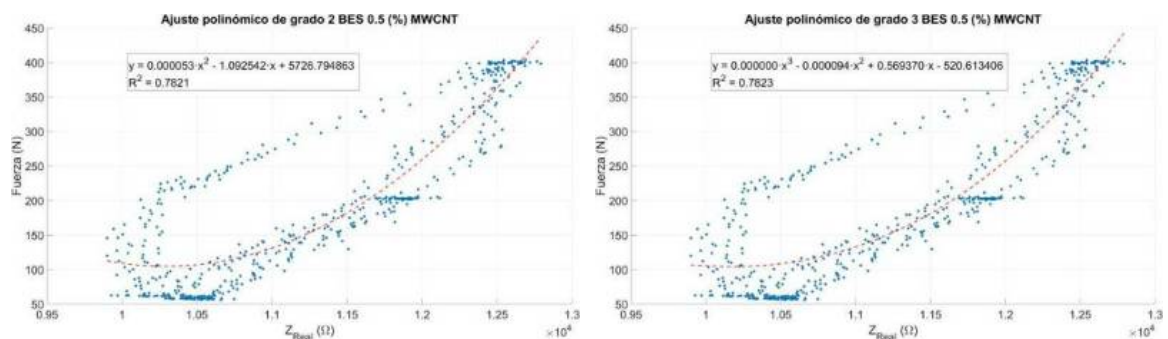
El espécimen de briqueta con electrodo serigrafiado bajo carga de tensión (**Figura 4-55**) presenta una respuesta es significativamente más ruidosa debido a la fragilidad inherente del mortero en tensión. A pesar del ruido, el electrodo capta con éxito la naturaleza cíclica de la carga aplicada, con valores máximos que oscilan entre el 1.79 % a 200 N y 2.48 % a 400 N. La mayor magnitud de la respuesta indica que el electrodo serigrafiado es muy sensible bajo tensión, pero las fluctuaciones e inestabilidad de los datos podrían complicar los análisis precisos.

Figura 4-55. Respuesta eléctrica (FCR) durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo serigrafiado cerámico.



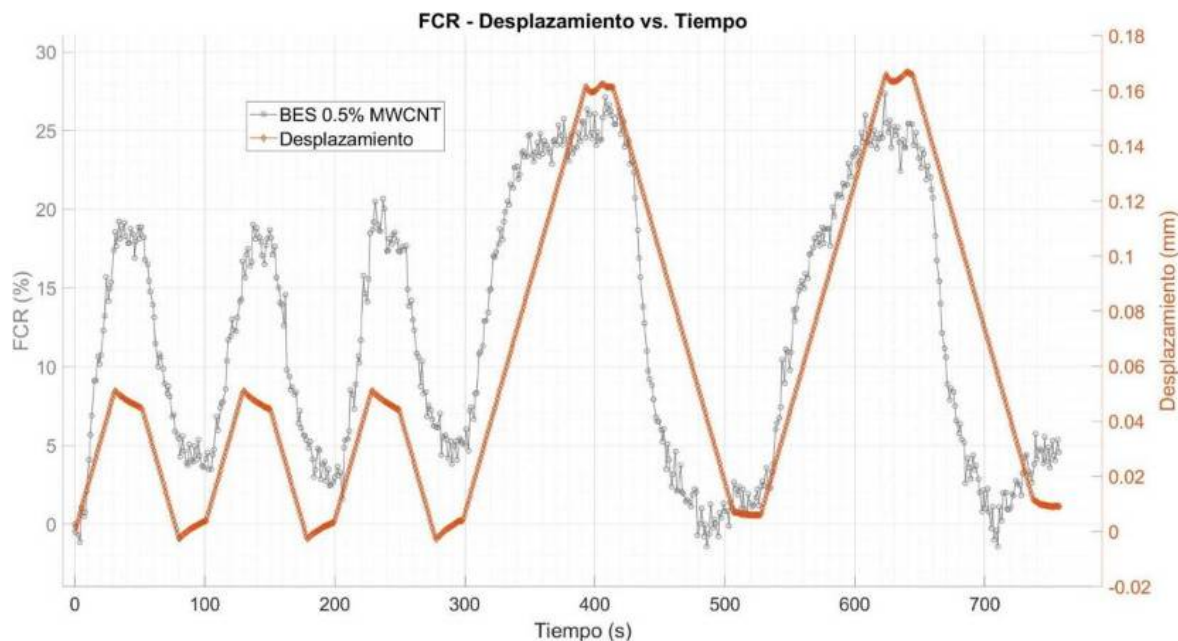
En la correlación del electrodo serigrafiado muestra una forma de histéresis o comportamiento en bucle (**Figura 4-56**). En otras palabras, durante el proceso de carga y descarga, la impedancia no sigue exactamente el mismo camino en ambas direcciones, lo que hace que los puntos trazados formen un bucle en lugar de que se superpongan los datos. Este efecto a menudo indica que se producen algunos cambios internos en el espécimen, alterando la alineación de las vías conductoras, de modo que cuando se vuelve a un nivel de carga más bajo, el material no vuelve inmediatamente a su estado eléctrico original.

Figura 4-56. Correlación entre la impedancia real y la fuerza, electrodo tipo serigrafiado cerámico.

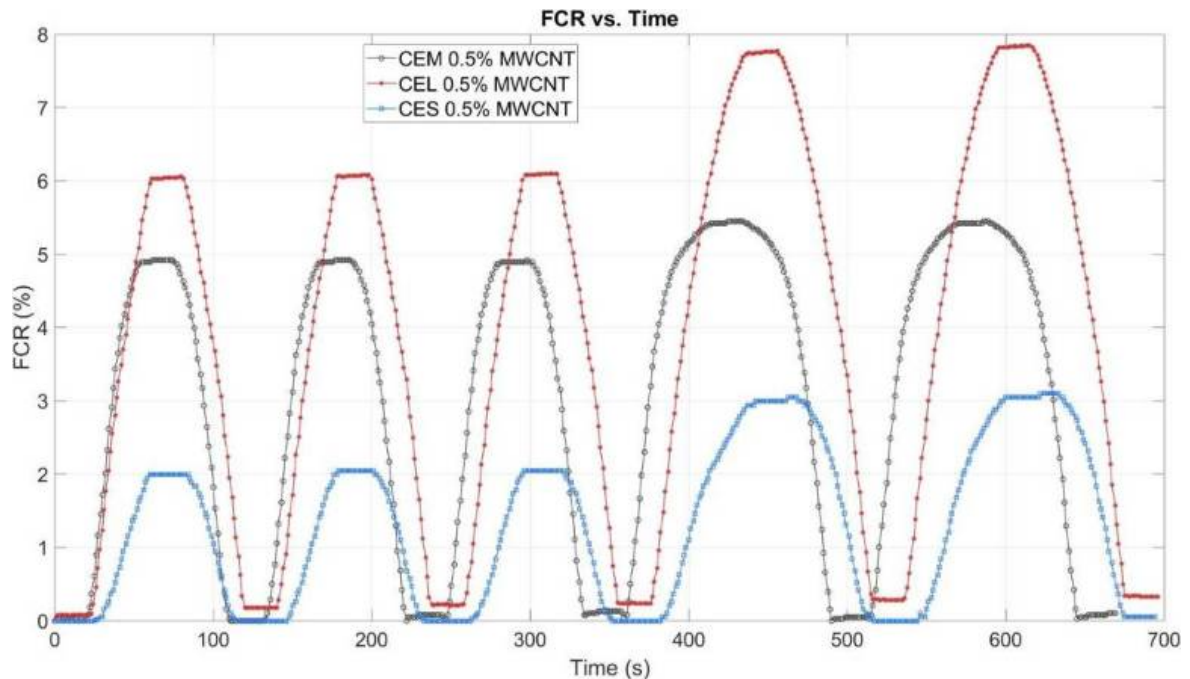


La **Figura 4-57** muestra una relación más compleja y particular entre el desplazamiento mecánico y el FCR. A diferencia de los anteriores especímenes, aquí se observa un valor considerablemente mayor del FCR, alcanzando valores de hasta 2.5 %, indicando una sensibilidad piezoresistiva notablemente incrementada en la configuración de este espécimen. Aunque la estabilidad de datos es más variable, aún se mantiene una clara relación cíclica entre el desplazamiento y el FCR. Los puntos máximos y mínimos coinciden (1.79 % a un desplazamiento de 0.05 mm y 2.48 % para 0.16 mm), confirmando nuevamente la fuerte dependencia entre las deformaciones mecánicas y los cambios eléctricos en el material.

Figura 4-57. Respuesta eléctrica (FCR) vs desplazamiento durante cargas cíclicas (200 N y 400 N), electrodo tipo serigrafiado cerámico.

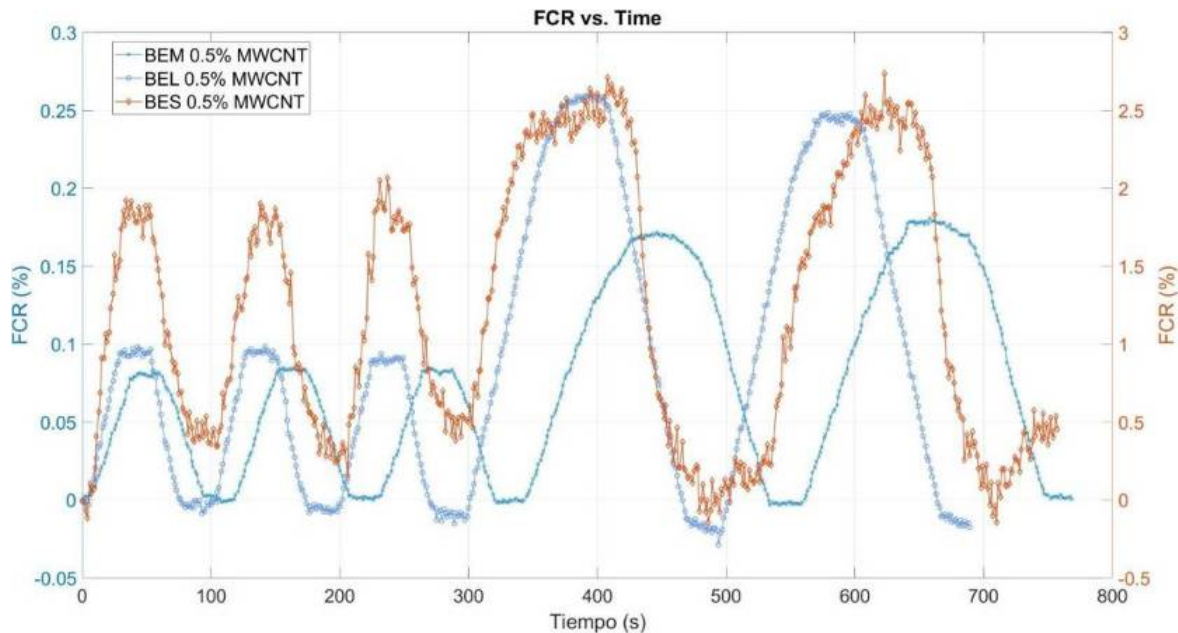


En la **Figura 4-58**, se comparan los tres electrodos (malla de alambre, lámina de acero y serigrafiado) bajo compresión. El electrodo de laminado de acero (mostrado en rojo) alcanza los valores más altos de FCR y mantiene picos consistentes y bien definidos a través de múltiples ciclos de carga. Mientras tanto, el electrodo de malla de alambre (gris) muestra niveles máximos intermedios, y el electrodo serigrafiado (azul) muestra la magnitud general más baja, pero sigue el patrón de carga cíclica. El electrodo de lámina de acero presenta una respuesta estable con picos claramente distinguibles, lo que indica una correlación directa y fiable entre la fuerza aplicada y la señal eléctrica bajo compresión.

Figura 4-58. Respuesta FCR a compresión con diferentes configuraciones de electrodos

Los especímenes sometidos a tensión (**Figura 4-59**), el electrodo serigrafiado arroja los mayores valores de FCR, lo que refleja su mayor sensibilidad para detectar cambios en el material a medida que se estira. Sin embargo, esta mayor sensibilidad también introduce una considerable fluctuación y ruido, lo que hace que los datos parezcan menos estables. Por el contrario, el electrodo laminado de acero muestra curvas mucho más suaves que, aunque de menor amplitud, demuestran un patrón más estable y predecible, caso parecido del electrodo tipo malla. Esta estabilidad es beneficiosa cuando se requieren mediciones consistentes y repetibles, mientras que la opción serigrafiada podría ser ventajosa para detectar variaciones sutiles, siempre que el mayor nivel de ruido pueda gestionarse eficazmente.

Figura 4-59. Respuesta FCR a tensión con diferentes configuraciones de electrodos



Especímenes llevados a la falla

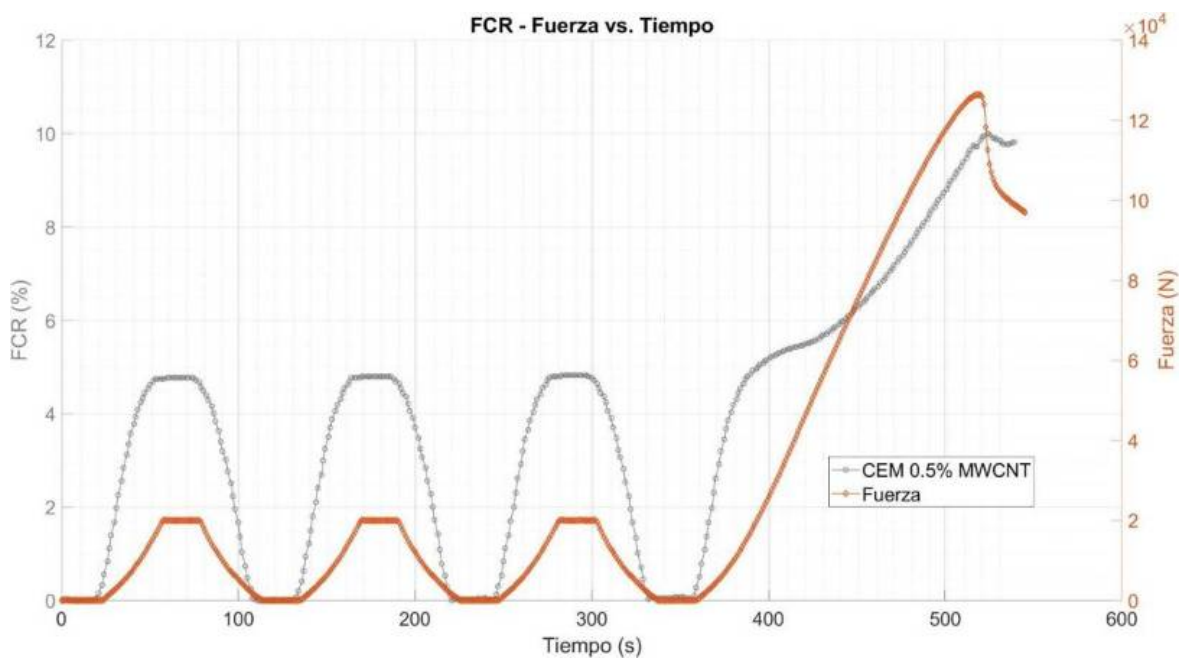
El siguiente análisis se centra en los especímenes sometidos a condiciones de falla, tanto en compresión como en tensión. Esto para los especímenes estudiados anteriormente, cada uno con distintos tipos de electrodos para medir la respuesta eléctrica. Los datos de las gráficas están justo antes de la falla (en tensión), con el fin de preservar la resolución suficiente en los datos para observar cómo cada configuración de electrodos captura la progresión de los cambios relacionados con la tensión y compresión. Este enfoque permite rastrear el aumento del FCR sin permitir que un único pico extremo opaque el comportamiento de los datos. A través de cada caso (mallas de alambre, láminas de acero y electrodos serigrafiados), obtenemos información sobre cómo se manifiesta eléctricamente el daño microestructural en especímenes cúbicos y de briquetas sometidos a cargas severas.

Cubos con electrodo de malla de alambre (CEM 0.5 % MWCNT)

Bajo cargas de compresión, el electrodo de malla de alambre muestra un aumento constante del FCR a medida que aumenta la carga aplicada (**Figura 4-60**), se identifica

que en los ciclos de 20000 N las pendientes son iguales, pero después de superar este valor la gráfica de FCR presenta una curvatura que no sigue una linealidad como la de la fuerza, esto hasta el aproximadamente 60000 N, en donde vuelve a tener un comportamiento lineal reflejando el mismo comportamiento de la fuerza. En el valor de 126000 N se comienza a producir la falla, en este punto la fuerza comienza a caer al igual que el valor de FCR, esto quiere indicar que el contacto del electrodo de malla parece soportar altos niveles de compresión sin experimentar saltos drásticos en la FCR, lo que sugiere que las vías conductoras permanecen en gran medida intactas hasta la última fase de carga.

Figura 4-60. FCR vs tiempo: electrodo de malla de alambre (CEM), compresión hasta la falla.



En la **Figura 4-61** se presenta el espécimen con configuración CEM luego de la falla.

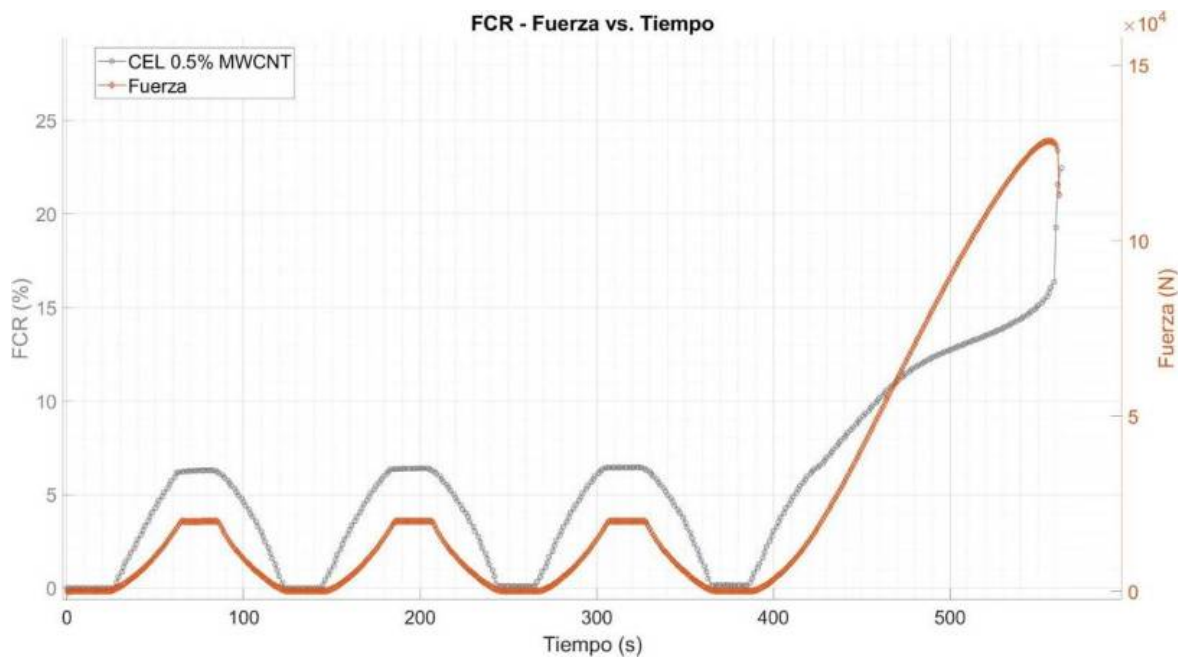
Figura 4-61. Falla espécimen CEM 0.5 % MWCNT.



Cubos con electrodo de lámina de acero (CEL 0.5 % MWCNT)

Al acercarse al punto de fractura bajo compresión, el electrodo con lamina de acero muestra un aumento más pronunciado del FCR (**Figura 4-62**), este aumento con mayor pendiente es indicativo de una mayor sensibilidad al agrietamiento y a las concentraciones de tensión localizadas cerca del punto de falla. La curva de FCR presenta un cambio de concavidad al aplicarse una fuerza de aproximadamente 101000 N, la pendiente permanece constante hasta alrededor de 65000 N, después de set valor se aprecia un cambio de pendiente para luego volver a cambiar en 101000 N, donde los valores son más pronunciados. En general, esta configuración ilustra cómo el electrodo laminado puede ofrecer una señal con variaciones de concavidad no tan drásticas.

Figura 4-62. FCR vs tiempo: electrodo de lámina de acero (CEL), compresión hasta la falla.



En la **Figura 4-63** se presenta el espécimen con configuración CEL luego de la falla.

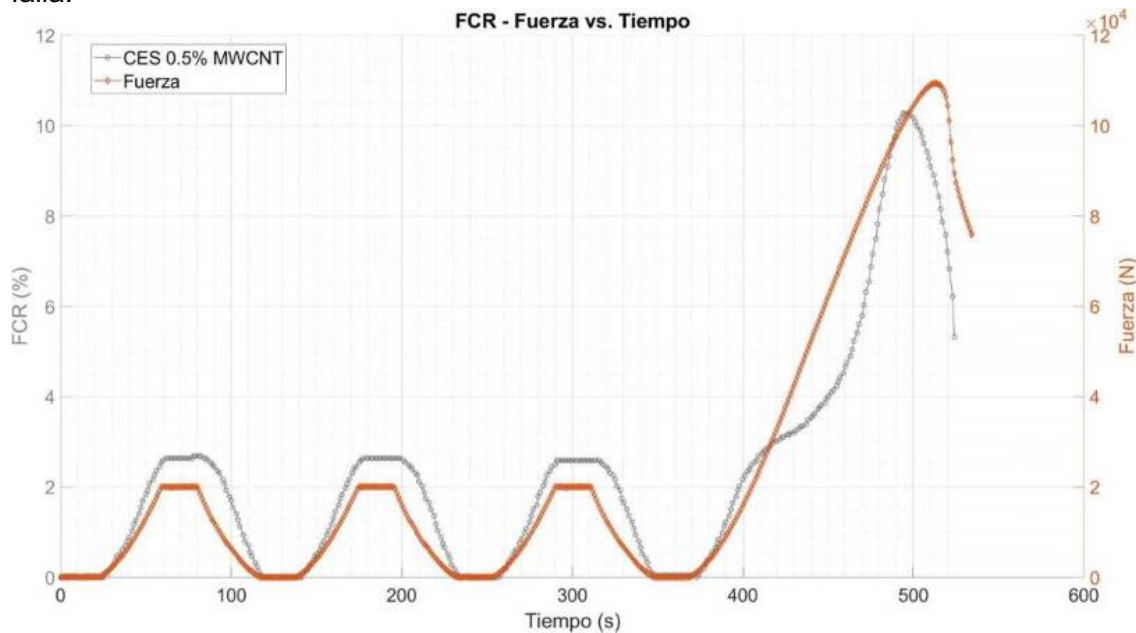
Figura 4-63. Falla espécimen CEL 0.5 % MWCNT.



Cubos con electrodo serigrafiado (CES 0.5 % MWCNT)

El electrodo serigrafiado en el cubo muestra un aumento moderado pero constante en el FCR (**Figura 4-64**), que parece estabilizarse justo antes de que el espécimen alcance su límite crítico en compresión. La gráfica de FCR presenta un cambio de concavidad alrededor de 53000 N, la gráficas de fuerza como de FCR presentan pendientes muy similares lo cual indica que este electrodo es capaz de reflejar el comportamiento de la carga en el espécimen. Al llegar al punto de la falla los valores de FCR no se ven drásticamente afectados ya que al estar embebido en el centro del espécimen y contar un área menor, las fisuras no han llegado aún a este punto, pero se evidencia como a medida que el espécimen no es capaz de soportar más carga y esta va disminuyendo así mismo se disminuye el FCR.

Figura 4-64. FCR vs tiempo: electrodo serigrafiado cerámico (CES), compresión hasta la falla.



En la **Figura 4-65** se presenta el espécimen con configuración CES luego de la falla.

Figura 4-65. Falla espécimen CES 0.5 % MWCNT.



Briquetas con electrodo de malla de alambre (BEM 0.5 % MWCNT)

La **Figura 4-66** presenta el comportamiento del electrodo de malla de alambre en la briqueta, donde se registra un aumento progresivo de la FCR. Debido a que el mortero es más débil en tensión, la formación de microgrietas significativas puede comenzar con cargas comparativamente más bajas, causando aumentos continuos en la resistencia eléctrica. Como resultado, el gráfico registrado destaca la progresión constante en los cambios de resistencia, ilustrando cómo evoluciona el daño microestructural a medida que se intensifica la tensión, haciendo más pronunciada la curva antes de llegar a

la falla, aproximadamente después de 1700 N. Al ser una falla frágil en tensión la maquina deja de registrar datos, en cuanto a las medidas de FCR aumenta a valores que se salen de la escala en que se trabaja debido la perdida de la red conductora.

Figura 4-66. FCR vs tiempo: electrodo de malla de alambre (BEM), tensión hasta la falla.



En la **Figura 4-67** se presenta el espécimen con configuración CES luego de la falla.

Figura 4-67. Falla espécimen BEM 0.5 % MWCNT.



Briquetas con electrodo de lámina de acero (BEL 0.5 % MWCNT)

El electrodo de lámina de acero muestra un falla mucho más temprana en comparación a los demás electrodos en briquetas (**Figura 4-68**), esto ocurre ya que el electrodo al tener una área mayor produce que el espécimen pierda área efectiva y se produzca una falla más temprana. Respecto al FCR crece de manera constante hasta que el espécimen este al borde de la falla. La forma de la gráfica de FCR nota una curvatura no tan marcada como la del electrodo con malla, la cual se mantiene constante a medida que se acerca a la falla. El área de contacto estable de la lámina de acero ayuda a mantener lecturas fiables, a pesar de la susceptibilidad del material a la iniciación y propagación de grietas bajo cargas de tensión.

Figura 4-68. FCR vs tiempo: electrodo de lámina de acero (BEL), tensión hasta la falla.



En la **Figura 4-69** se presenta el espécimen con configuración BEL luego de la falla.

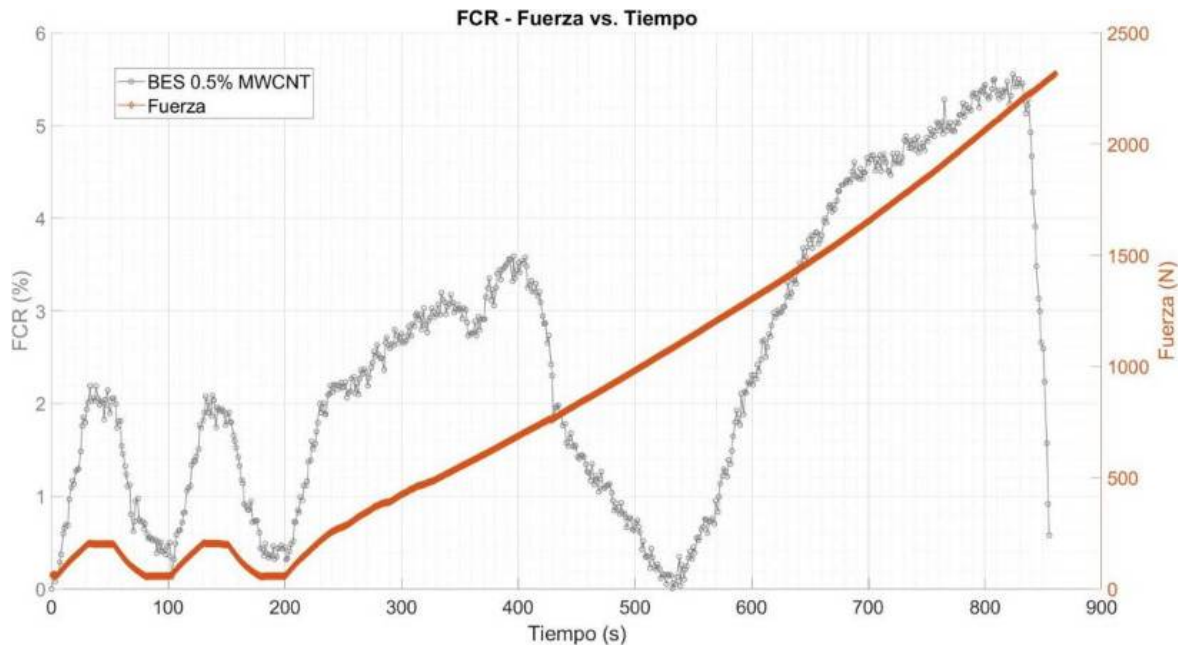
Figura 4-69. Falla espécimen BEL 0.5 % MWCNT.



Briquetas con electrodo serigrafiado (BES 0.5 % MWCNT)

Entre las briquetas tensadas, el electrodo serigrafiado produce las variaciones más drásticas en la FCR a medida que aumenta la carga (**Figura 4-70**). Alrededor de 800 N, la FCR cae brevemente y luego se recupera, lo que sugiere un cambio temporal en las vías conductoras, posiblemente causado por la formación o el cierre de microgrietas dentro de la matriz o de la propia capa del electrodo. Aproximadamente en 1000 N los valores de FCR comienzan nuevamente a crecer manteniendo una pendiente constante hasta 1600 N, en donde sufre un cambio de pendiente manteniéndose hasta llegar a la falla. En particular, este electrodo presenta valores de rápido decrecimiento en el FCR antes de llegar a la falla, lo cual indica su alta sensibilidad.

Figura 4-70. FCR vs tiempo: electrodo de malla de alambre (BES), tensión hasta la falla.



En la **Figura 4-71** se presenta el espécimen con configuración BES luego de la falla.

Figura 4-71. Falla espécimen BES 0.5 % MWCNT.



En todas las configuraciones ensayadas, tanto en compresión (cubos) como en tensión (briquetas), las curvas de FCR mantuvieron una forma consistente en relación con la respuesta del electrodo observada durante la aplicación de las cargas. Esto indica que el comportamiento de detección de cada tipo de electrodo siguió siendo fiable incluso cuando la carga aplicada se acercó al umbral de fallo del material. En compresión, todos los

electrodos mostraron un aumento progresivo del FCR, lo que reflejaba la acumulación de daños internos antes del fallo final. De manera similar, en tensión, a pesar de la mayor inestabilidad de medición inherente a este modo, todos los electrodos captaron una tendencia creciente en el FCR a medida que la carga se intensificaba. En particular, el electrodo serigrafiado bajo tensión reveló una caída y recuperación en el FCR, posiblemente debido a la propagación de grietas o a un reordenamiento localizado en la interfaz electrodo-matriz. En general, los patrones de respuesta eléctrica observados en condiciones cercanas al fallo reafirman las tendencias identificadas en ciclos de carga anteriores, lo que demuestra que cada tipo de electrodo es capaz de rastrear eficazmente los cambios estructurales a lo largo de todo el proceso de carga.

5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

En este trabajo se investigaron tres adiciones distintas de MWCNT (0.0 %, 0.5 % y 1.0 %) empleando tres tipos de electrodos (malla de alambre, lamina de acero y electrodo serigrafiado cerámico), para evaluar cómo el comportamiento mecánico se ve reflejado en las mediciones eléctricas de los morteros. De igual manera, se analizó la influencia del contenido de MWCNT en la mezcla del mortero en estado fresco y sus resistencias a la compresión, tensión y flexión. Estos resultados condujeron a una cantidad ideal de adición de MWCNT (0.5 %) que equilibrará la mejora de la respuesta eléctrica con los requisitos prácticos de trabajabilidad de la mezcla y rendimiento mecánico.

Se empleó una configuración experimental diseñada para rastrear el cambio fraccional en la resistencia (FCR), lo cual permitió establecer una clara correlación entre la carga mecánica y la respuesta eléctrica del material. Cada uno de los tres tipos de electrodos probados respondió de manera consistente tanto a la compresión como a la tensión, lo que permitió establecer ecuaciones polinomiales que vinculan los valores de impedancia real con los niveles de carga correspondientes. Este resultado resalta la viabilidad de crear sistemas de detección prácticos para la monitorización en tiempo real, utilizando materiales multifuncionales. Con las ecuaciones polinómicas determinadas se puede llegar a leer una señal basada en la impedancia real medida en cualquier momento e inferir de manera fiable el estado de carga de una estructura, lo que ofrece una herramienta eficaz para el monitoreo de las estructuras. Los electrodos que mejor correlación presentaron fueron las láminas de acero, debido a que por su mayor área de contacto permitían crear más conductores de flujo, generando así medias más estables. Por otra parte, el uso de electrodos serigrafiados cerámicos presentó una gran sensibilidad y estabilidad en las mediciones, a pesar de su reducida área de contacto. Cabe destacar que los electrodos

serigrafiados a pesar de ser frágiles luego de la falla se pudieron recuperar sin comprometer su funcionamiento.

La adición de 0.5 % MWCNT mejoró significativamente la respuesta eléctrica (valores FCR) en todas las configuraciones de electrodos y tipos de muestras, logrando aproximadamente el doble de sensibilidad en comparación con las muestras sin MWCNT. Esto demuestra claramente que la incorporación de MWCNT mejora notablemente las propiedades eléctricas, lo que da lugar a una respuesta mucho más sensible y pronunciada. Aunque la sensibilidad eléctrica estaba presente en las muestras sin MWCNT, la adición de MWCNT duplicó los valores de FCR medidos y mejoró su sensibilidad, lo que pone de relieve su importante contribución.

En el proceso del diseño de las mezclas de mortero con MWCNT se identificó que el método de dispersión por ultrasonido con sonda (aplicado en pulsos de 20 segundos) es el más efectivo para lograr una adecuada distribución de los MWCNT en la mezcla. Este enfoque no solo disminuye la generación de calor excesivo, sino que también maximiza la conductividad eléctrica y minimiza la resistencia, según lo evidenciado por los diagramas de Nyquist y las mediciones complementarias con el conductímetro de mesa. De esta manera, se estableció una metodología de dispersión confiable que sirvió como base para elaborar las mezclas de acuerdo con los procedimientos de las normativas vigentes.

La evaluación mecánica de los especímenes demostró que incluso en la adición más alta de MWCNT (1.0 %), la resistencia a compresión del mortero solo se vio reducida en un 3.5 %, mientras que los valores de tensión y flexión se mantuvieron prácticamente inalterados. Sin embargo, el principal desafío encontrado es la trabajabilidad de la mezcla, pues al aumentar la concentración de MWCNT produce una degradación significativa de su fluidez. Este factor causa una importante limitación durante la elaboración de especímenes, pero no invalida la aplicabilidad de los MWCNT en el diseño y evaluación de morteros que busquen mejorar su respuesta eléctrica.

Mediante la caracterización de especímenes en forma de cubo y briquetas equipados con diferentes tipos de electrodo y adición de MWCNT, se evidenció que el porcentaje de 0.5 % logra un equilibrio óptimo entre la manejabilidad del mortero y la sensibilidad de sus mediciones eléctricas. Aunque la adición de un 1.0 % de MWCNT puede ofrecer pequeñas mejoras en la respuesta eléctrica, la disminución de la fluidez y la dificultad para preparar

los especímenes hacen que la concentración del 0.5 % sea la opción más práctica y eficiente para correlacionar las cargas mecánicas con la variación de la impedancia real.

Un importante aporte para el monitoreo estructural es la obtención de ecuaciones polinómicas que relacionan directamente la impedancia real con las cargas aplicadas. Tanto para compresión como para tensión, se puede derivar la fuerza a la que está sometido un espécimen conociendo el valor de la impedancia en cualquier instante. De este modo, cada configuración de electrodo y forma del espécimen puede adaptarse a distintas condiciones de servicio, facilitando la implementación como sensor en sistemas de monitorización. Para compresión, se encontró que la mejor correlación se obtuvo para los especímenes cúbicos con electrodos de tipo lamina de acero, asimismo, al evaluar bajo tensión, el espécimen en forma de briqueta con electrodo de lámina igualmente presentó un gran comportamiento. Es importante resaltar el buen desempeño de los electrodos serigrafiados cerámicos para la medición de respuestas eléctricas, a pesar de que de acuerdo con la literatura estos no han sido empleados anteriormente con este propósito.

La reproducibilidad en las medidas eléctricas no solo demuestra la estabilidad en la repetición de medidas en los especímenes, sino también evidencia la eficacia de la metodología empleada.

5.2 Trabajos futuros

En este trabajo las cargas siempre se mantuvieron en un rango elástico con el fin de no comprometer la integridad de la estructura de los especímenes, a modo de ejemplificar hasta qué punto se podía mantener las mediciones de FCR se llevaron los especímenes a la falla. Sin embargo, no se correlacionaron cargas mayores a las establecidas inicialmente en la metodología, por lo que se surge la inquietud de poder estudiar el comportamiento de los especímenes en un ambiente inelástico, y como esto afecta las medidas de la impedancia.

La forma de los especímenes se definió en función de los métodos empleados para ensayar morteros bajo compresión y tensión, ubicando los electrodos uno frente al otro. No obstante, se propone investigar la respuesta en configuraciones donde los electrodos no estén necesariamente enfrentados, de manera que puedan captar fuerzas procedentes de distintas direcciones, al tiempo que se conserve la distancia adecuada entre ellos.

Las gráficas entre el FCR y el desplazamiento se obtuvieron a partir del recorrido del cabezal de la maquina universal. Aunque esta lectura resulta una aproximación aceptable, no reproduce con fidelidad la deformación local del espécimen. Por lo cual no se correlacionaron datos ni se calcularon regresiones polinómicas. Se descartó el uso de galgas extensométricas por dos motivos: su costo excedía el presupuesto disponible y su funcionamiento se ve comprometido por los cambios bruscos de humedad, inevitables en especímenes saturados. Para investigaciones futuras se sugiere emplear sensores más robustos (por ejemplo, galgas encapsuladas o fibra óptica) que toleren ambientes húmedos y aporten un campo de deformaciones más representativo.

Bibliografía

- Adhikary, S. K., Rudžionis, Ž., Tučkutė, S., & Ashish, D. K. (2021). Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81665-y>
- Allam, H., Duplan, F., Amziane, S., & Burtshell, Y. (2022). Assessment of manufacturing process efficiency in the dispersion of carbon fibers in smart concrete by measuring AC impedance. *Cement and Concrete Composites*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104394>
- Almeida Junior, E. F. de, & Martini, S. (2023). Measurements of electrical impedance in cementitious mortars: Influence of electrodes and physical dimensions of specimens. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01880>
- Alzate López, G. I. (2010). *Producción Y Simulación De Nanotubos De Carbono Crecidos Por La Técnica Deposición Química De Vapores Optimizada Por Plasma PE CVD*. Universidad Nacional de Colombia.
- Analytik Jena. (2020). *Technical Data SPECORD PLUS Series UV/Vis Spectrophotometer*. www.analytik-jena.com
- Argos. (2024). *Ficha técnica Cemento Estructural Max*. www.argos.co
- Arrechea, S., Guerrero-Gutiérrez, E. M. A., Velásquez, L., Cardona, J., Posadas, R., Callejas, K., Torres, S., Díaz, R., Barrientos, C., & García, E. (2020). Effect of additions of multiwall carbon nanotubes (MWCNT, MWCNT-COOH and MWCNT-Thiazol) in mechanical compression properties of a cement-based material. *Materialia*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100739>
- Asadi, A., Pourfattah, F., Miklós Szilágyi, I., Afrand, M., Żyła, G., Seon Ahn, H., Wongwises, S., Minh Nguyen, H., Arabkoohsar, A., & Mahian, O. (2019). Effect of sonication characteristics on stability, thermophysical properties, and heat transfer of nanofluids: A comprehensive review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104701>

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
- ASTM International. (1885). *ASTM C190 – Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars*.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007>
- Batiston, E., Gleize, P. J. P., Mezzomo, P., Pelisser, F., & de Matos, P. R. (2021). Effect of Carbon Nanotubes (CNTs) aspect ratio on the rheology, thermal conductivity and mechanical performance of Portland cement paste. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(5). <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000500010>
- BOECO Germany. (2024). *Laboratory Equipment*.
- Box, G. E. P. (1990). Integration of techniques in process development. *Quality Engineering*, 3(1), 9–26. <https://doi.org/10.1080/08982119008918834>
- Branson Ultrasonics Corporation. (2001). *Digital Sonifier ® Models 250 & 450 User's Manual*.
- Branson Ultrasonics Corporation. (2013). *Operator's Manual Ultrasonic Bath Models 1800, 2800, 3800, 5800, 8800*.
- Burstein, E. (2003). A major milestone in nanoscale material science: The 2002 Benjamin Franklin Medal in Physics presented to Sumio Iijima. *Journal of the Franklin Institute*, 340(3–4), 221–242. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(03\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(03)00041-3)
- Carriço, A., Bogas, J. A., Hawreen, A., & Guedes, M. (2018). Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>
- Castaneda-Saldarriaga, D., Sierra-Pe´rez, J., & Alvarez-Montoya, J. (2019). Synthesis and characterization of cement/carbon-nanotube composite for structural health monitoring applications. *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.11159/icsect19.149>
- Cerro-Prada, E., Pacheco-Torres, R., & Varela, F. (2021). Effect of multi-walled carbon nanotubes on strength and electrical properties of cement mortar. *Materials*, 14(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma14010079>
- Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Torkittikul, P. (2010). Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites. *Materials Science and Engineering: A*, 527(4–5), 1063–1067. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.039>

- Chung, D. D. L., & Ozturk, M. (2024). Spatially resolved capacitance-based stress self-sensing in concrete. *ISA Transactions*, 152, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.06.034>
- Cía, G. de A. (2024). *Ficha Técnica Acero Inoxidable 304 - 304L*. <https://www.cga.com.co>
- Coppola, L., Buoso, A., & Corazza, F. (2013). The influence of AC and DC electrical resistance and piezoresistivity measurements of CNTs/cement composites. *The New Boundaries of Structural Concrete*.
- D'Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A. L., & Kenny, J. M. (2016). Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. *Cement and Concrete Composites*, 65, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.001>
- DANE. (2024). *Boletín Técnico: Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC)*.
- Das, S., & Saha, P. (2018). A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures. In *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* (Vol. 129, pp. 68–90). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.008>
- De Siqueira, J. E. L., & Gleize, P. J. P. (2020). Effect of carbon nanotubes sonication on mechanical properties of cement pastes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 13(2), 455–463. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000200013>
- Del, M., & Camacho Ballesta, M. del C. (2013). *Desarrollo de materiales cementantes conductores multifuncionales mediante adición de nanotubos de carbono* [Tesis Doctoral]. Universidad de Alicante.
- Dong, W., Guo, Y., Sun, Z., Tao, Z., & Li, W. (2021). Development of piezoresistive cement-based sensor using recycled waste glass cullets coated with carbon nanotubes. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127968>
- Ebrahim, A., & Kandasamy, S. (2023). The effect of using multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(9). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01219-1>
- Echeverry Cardona, L. M. (2020). *Energías De Dispersión Y Surfactantes En Una Solución De Nanotubos De Carbono En Agua: Aplicaciones En Pastas De Cemento Portland* [Maestría En Ciencias-Física]. Universidad Nacional De Colombia.
- Espinosa, C., Ortiz-Trujillo, I. C., Carlos-Cornelio, J. A., Zapata-Hernández, R. D., & Hoyos-Palacio, L. M. (2017). Dispersión de nanotubos de carbono para aplicaciones in-vitro. *DYNA (Colombia)*, 84(203), 24–30. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.64132>

- Fan, S., Li, X., & Li, M. (2018). The effects of damage and self-healing on impedance spectroscopy of strain-hardening cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 106, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.016>
- Farias de Medeiros, M. H., Dranka, F., Mattana, A. J., & Maron da Costa, M. do R. de M. (2015). Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. *Revista Materia*, 20(1), 127–144. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0014>
- Ferreira, A. D. B. L., Nóvoa, P. R. O., & Marques, A. T. (2016a). Multifunctional Material Systems: A state-of-the-art review. *Composite Structures*, 151, 3–35. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.028>
- Fiore, J. M. (2024). *AC Electrical Circuit Analysis AC Electrical Circuit Analysis A Practical Approach A Practical Approach* (1.1.11).
- Gamry Instruments. (2022). *Reference 600+ Potentiostat/Galvanostat/ZRA Operator's Manual*. www.gamry.com/service-support/
- Gao, F., Tian, W., Wang, Z., & Wang, F. (2020). Effect of diameter of multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and microstructure of the cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120452>
- Germann Instruments. (2021). *PROOVE'it system*. <https://www.germanninstruments.com/rapid-chloride-permeability-test-prooveit/>
- Han, X., Li, G., Wang, P., Chen, Z., Cui, D., Zhang, H., Tian, L., Zhou, X., Jin, Z., & Zhao, T. (2022). A new method and device for detecting rebars in concrete based on capacitance. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111721>
- Hawreen, A., & Bogas, J. A. (2019). Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 198, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.253>
- Hong, G., Choi, S., Yoo, D. Y., Oh, T., Song, Y., & Yeon, J. H. (2022). Moisture dependence of electrical resistivity in under-percolated cement-based composites with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.151>
- Huang, B., Wang, J., Piukovics, G., Zabihi, N., Ye, J., Saafi, M., & Ye, J. (2023). Hybrid cement composite-based sensor for in-situ chloride monitoring in concrete structures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 385. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133638>
- INCONTEC. (1979). *NTC 1522: Suelos. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado. (Reaprobación en 2022)*.

- INCONTEC. (2004). *NTC 3329: Concretos. Especificaciones del mortero para unidades de mampostería.*
- INCONTEC. (2008). *NTC 5653: Determinación De La Gravedad Específica, Absorción Y Vacíos En El Concreto Endurecido.*
- INCONTEC. (2017a). *NTC 112: Cementos. Mezcla Mecánica De Pastas Y Morteros De Cemento Hidráulico De Consistencia Plástica.*
- INCONTEC. (2017b). *NTC 6222: Concretos. Método de ensayo para determinar el potencial de reactividad de los agregados al álcali (método de barras de mortero).*
- INCONTEC. (2019). *NTC 115: Alambre de acero al carbono para uso general.*
- INCONTEC. (2020). *NTC 237: Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.*
- INCONTEC. (2021). *NTC 5784: Cementos. Método de ensayo para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico.*
- INCONTEC. (2022a). *NTC 120: Cementos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico.*
- INCONTEC. (2022b). *NTC 220: Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado.*
- INCONTEC. (2022c). *NTC 3937: Cementos. Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico.*
- INCONTEC. (2022d). *NTC 3938: Cementos. Aparatos y equipos para la determinación de cambios de longitud en pasta endurecida de cemento, mortero y concreto.*
- INCONTEC. (2023a). *NTC 121: Especificación de desempeño para cemento hidráulico (121).* Instituto Colombiano de Normas Técnicas.
- INCONTEC. (2023b). *NTC 4024: Muestreo y métodos de ensayo de unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas.*
- Instituto del Concreto (Asocreto). (2000). *Tecnología y Propiedades* (J. Gomez & Sánchez de Guzmán, Eds.; Segunda edición).
- Jung, M., Lee, Y. soon, Hong, S. G., & Moon, J. (2020). Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE). *Cement and Concrete Research*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106017>

- Jung, M., Park, J., Hong, S. gul, & Moon, J. (2022). The critical incorporation concentration (CIC) of dispersed carbon nanotubes for tailoring multifunctional properties of ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3361–3370. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.103>
- Kanagaraj, B., Anand, N., Lubloy, E., & Andrushia A, D. (2024). Influence of Multi-walled Carbon Nanotube (MWCNT) on flexural behavior and microstructure characteristics of geopolymers concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03317>
- Karpova, E., Skripkiūnas, G., Barauskas, I., Barauskienė, I., & Hodul, J. (2021). Influence of carbon nanotubes and polycarboxylate superplasticiser on the Portland cement hydration process. *Construction and Building Materials*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124648>
- Kim, J., Suryanto, B., & McCarter, W. J. (2019). Conduction, relaxation and complex impedance studies on Portland cement mortars during freezing and thawing. *Cold Regions Science and Technology*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102819>
- Kreupl, F., P. Graham, A., Liebau, M., S. Duesberg, G., Seidel, R., & Unger, E. (2004). Carbon Nanotubes for Interconnect Applications. *Electron Devices Meeting (IEDM) Technical Digest*, 683–686. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0412537>
- Lariza, M., Cuel, A., Itzel, L., López, L., & Calindo, A. S. (2012). Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 43.
- Layssi, H., & Alizadeh, A. R. (2015). Electrical Resistivity of Concrete. *ACI Concrete International*, 37(5). <https://www.researchgate.net/publication/282611489>
- Lee, S. H., Kim, S., & Yoo, D. Y. (2018). Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 185, 530–544. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.071>
- Lee, S. J., Ahn, D., You, I., Yoo, D. Y., & Kang, Y. S. (2020). Wireless cement-based sensor for self-monitoring of railway concrete infrastructures. *Automation in Construction*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103323>
- Li, G. Y., Wang, P. M., & Zhao, X. (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 43(6), 1239–1245. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>
- Li, S., Zhang, Y., Cheng, C., Wei, H., Du, S., & Yan, J. (2021). Surface-treated carbon nanotubes in cement composites: Dispersion, mechanical properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125262>

- Li, W., Dong, W., Guo, Y., Wang, K., & Shah, S. P. (2022). Advances in multifunctional cementitious composites with conductive carbon nanomaterials for smart infrastructure. *Cement and Concrete Composites*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104454>
- Lim, M. J., Lee, H. K., Nam, I. W., & Kim, H. K. (2017). Carbon nanotube/cement composites for crack monitoring of concrete structures. *Composite Structures*, 180, 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.042>
- Liu, Y., & Cheng, X. (2022). Effect of Carbon Nanotube Size on Electrical Properties of Cement Mortar under Different Temperatures and Water Content. *Geofluids*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7237049>
- Lizarazo-Marriaga, J., & Claisse, P. (2009). Determination of the concrete chloride diffusion coefficient based on an electrochemical test and an optimization model. *Materials Chemistry and Physics*, 117(2–3), 536–543. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.06.047>
- Lopes, J. P., Ferrari, V. J., Camões, A., Souza, A., & Figueiro, R. (2022). Influence of carbon nanotubes on the performance of concrete and fiber reinforced concrete (FRC). *Revista Materia*, 27(2). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1397>
- Lu, D., Huo, Y., Jiang, Z., & Zhong, J. (2023). Carbon nanotube polymer nanocomposites coated aggregate enabled highly conductive concrete for structural health monitoring. *Carbon*, 206, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.02.043>
- Lu, L., Ouyang, D., & Xu, W. (2016). Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. *Materials*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/ma9060419>
- Mansouri Sarvandani, M., Mahdikhani, M., Aghabarati, H., & Haghparast Fatmehsari, M. (2021). Effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and durability of cement mortars. *Journal of Building Engineering*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102407>
- Marcondes, C. G. N., & Medeiros, M. H. F. (2016). Análisis de la dispersión de soluciones conteniendo nanotubos de carbono para su uso en concretos de cemento Portland. *Revista ALCONPAT*, 6(2), 84–100. <https://doi.org/10.21041/ra>
- Marcondes, C. G. N., Medeiros, M. H. F., Marques Filho, J., & Helene, P. (2015). Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. *Revista ALCONPAT*, 5(2).
- Masciotta, M. G., Ramos, L. F., & Lourenço, P. B. (2017). The importance of structural monitoring as a diagnosis and control tool in the restoration process of heritage

- structures: A case study in Portugal. *Journal of Cultural Heritage*, 27, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.04.003>
- Materazzi, A. L., Ubertini, F., & D'Alessandro, A. (2013). Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.013>
- Melo, O. O., López, L. A., & Melo, S. E. (2020). *Diseño de Experimentos Métodos y Aplicaciones* (Coordinación de publicaciones - Facultad de Ciencias, Ed.; Segunda edición).
- Mendoza, O., Sierra, G., & Tobón, J. I. (2013). Influence of super plasticizer and Ca(OH)₂ on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications. *Construction and Building Materials*, 47, 771–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.100>
- Mendoza, O., Sierra, G., & Tobón, J. I. (2014). Effect of the reagglomeration process of multi-walled carbon nanotubes dispersions on the early activity of nanosilica in cement composites. *Construction and Building Materials*, 54, 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.084>
- Mendoza Reales, O. A. (2013). Efecto Híbrido De Los Nanotubos De Carbono Y La Nanosílice Sobre Las Propiedades Mineralógicas Y Mecánicas De Morteros De Cemento Pórtland [Universidad Nacional de Colombia]. In *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (Vol. 114, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s10973-013-2973-y>
- Mendoza Reales, O. A., Arias Jaramillo, Y. P., Ochoa Botero, J. C., Delgado, C. A., Quintero, J. H., & Toledo Filho, R. D. (2018). Influence of MWCNT/surfactant dispersions on the rheology of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 107, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.020>
- Mendoza Reales, O. A., & Dias Toledo Filho, R. (2017). A review on the chemical, mechanical and microstructural characterization of carbon nanotubes-cement based composites. *Construction and Building Materials*, 154, 697–710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.232>
- Mendoza Reales, O. A., Ocampo, C., Arias Jaramillo, Y. P., Ochoa Botero, J. C., Quintero, J. H., Silva, E. C. C. M., & Toledo Filho, R. D. (2018). Reinforcing Effect of Carbon Nanotubes/Surfactant Dispersions in Portland Cement Pastes. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2057940>
- MFG Robots. (2024). *Propiedades AISI 1006 estirado en frío*. <https://es.mfgrobots.com/material/metal/1003035893.html>
- Miera, P. (2021). Air Content in Fresh Air-Entraining Cement Mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(3), 032016. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/3/032016>

- Morris, W., Moreno, E. I., & Sagüés, A. A. (1996). Practical Evaluation Of Resistivity Of Concrete In Test Cylinders Using A Wenner Arra Y Probe. *Pergamon Cement and Concrete Research*, 26(12), 1779–1787.
- Nazari, G., Takayuki, S., & Date, S. (2020). Evaluation of Mechanical Hardened Properties of Mortar Using Carbon-Free Fly Ash and Normal Fly Ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 829(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/829/1/012016>
- Ocampo Ruiz, E. (2011). Nanotecnología aplicada a la Arquitectura. La investigación arquitectónica de nuevos materiales y sistemas constructivos como detonante en la creación de nuevos nichos laborales para el arquitecto. *Nova Scientia*, 3, 179–193.
- Pan, H. H., & Huang, M. W. (2020). Piezoelectric cement sensor-based electromechanical impedance technique for the strength monitoring of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119307>
- Park, H. M., Kim, G. M., Lee, S. Y., Jeon, H., Kim, S. Y., Kim, M., Kim, J. W., Jung, Y. C., & Yang, B. J. (2018). Electrical resistivity reduction with pitch-based carbon fiber into multi-walled carbon nanotube (MWCNT)-embedded cement composites. *Construction and Building Materials*, 165, 484–493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.205>
- Parvaneh, V., & Khiabani, S. H. (2019). Mechanical and piezoresistive properties of self-sensing smart concretes reinforced by carbon nanotubes. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(11), 993–1000. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1432789>
- Peñaranda Sanjuán, S. D. (2022). *Metodología Para La Medición De La Hidratación Del Cemento Adicionado Con Ceniza Volante A Partir De Impedancia Eléctrica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pérez Urbano, W. (2006). *Fabricación Y Caracterización De Nanotubos De Carbono De Multicapa Producidos Por Papvd Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales Facultad De Ciencias Exactas Y Naturales Departamento De Física Y Química*. Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales.
- Piro, N. S., Mohammed, A. S., & Hamad, S. M. (2023). Compressive strength and piezoresistivity of smart cement paste modified with waste steel slag. *Journal of Building Engineering*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106393>
- QSONICA. (2023). *OPERATION MANUAL*. www.sonicator.com
- Radoeva, M., & Radoev, B. (1995). Ohm resistivity of electroless copper layers as a function of their thicknesses. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 30, 2219.

- Ramezani, M., Kim, Y. H., Sun, Z., & Sherif, M. M. (2022). Influence of carbon nanotubes on properties of cement mortars subjected to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104596>
- Ramírez Arrieta, S. S. (2017). *Caracterización hidráulica de mezclas asfálticas abiertas mediante la técnica de Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Rana, S., & Figueiro, R. (2018). *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2>
- Rao, R. K., & Sasmal, S. (2020). Smart nano-engineered cementitious composite sensors for vibration-based health monitoring of large structures. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112088>
- Rao, R. K., & Sasmal, S. (2022). Electromechanical impedance-based embeddable smart composite for condition-state monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113856>
- Reis, E. D., Borges, L. A., Camargos, J. S. F., Gatuingt, F., Poggiali, F. S. J., & Bezerra, A. C. S. (2023). A systematic review on the engineering properties of concrete with carbon nanotubes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(4). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04117-w>
- Ren, J., Zhang, J., Wang, X., Li, D., Han, N., & Xing, F. (2020). Electrochemical Impedance Spectroscopy: A potential approach for detecting the breakage rate of microcapsules for self-healing cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103776>
- Rodríguez, B., Quintero, J. H., Arias, Y. P., Mendoza-Reales, O. A., Ochoa-Botero, J. C., & Toledo-Filho, R. D. (2017). Influence of MWCNT/surfactant dispersions on the mechanical properties of Portland cement pastes. *Journal of Physics: Conference Series*, 935(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012014>
- Ruan, Y., Han, B., Yu, X., Zhang, W., & Wang, D. (2018). Carbon nanotubes reinforced reactive powder concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.06.025>
- Rudyak, V., Pryazhnikov, M., Minakov, A., & Shupik, A. (2024). Electrical conductivity of nanofluids with single- and multi-walled carbon nanotubes. Experimental study. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101143>
- Sánchez, D., & Martínez, C. (2025). *Concretos y morteros Hidráulicos* (C. Salazar, Ed.; Primera). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez Romate, X. F., Artigas, J., Jiménez-Suárez, A., Sánchez, M., Güemes, A., & Ureña, A. (2019). Critical parameters of carbon nanotube reinforced composites for

- structural health monitoring applications: Empirical results versus theoretical predictions. *Composites Science and Technology*, 171, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.010>
- Sánchez-Romate, X. F., García, C., Rams, J., Sánchez, M., & Ureña, A. (2021). Structural health monitoring of a CFRP structural bonded repair by using a carbon nanotube modified adhesive film. *Composite Structures*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114091>
- SHIMADZU. (2014). *Autograph AG-X plus Series C224-E053C*. www.shimadzu.com/an/
- SI Analytics. (2016). *Lab and ProLab Series MEASUREMENT OF pH, ISE, CONDUCTIVITY AND DISSOLVED OXYGEN-ACCURATE, RELIABLE AND SENSITIVE*. www.si-analytics.com.
- Siahkouhi, M., Razaqpur, G., Hoult, N. A., Hajmohammadian Baghban, M., & Jing, G. (2021). Utilization of carbon nanotubes (CNTs) in concrete for structural health monitoring (SHM) purposes: A review. *Construction and Building Materials*, 309, 125137. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125137>
- Siddique, R., & Mehta, A. (2014). Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 50, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.019>
- Sika Colombia S.A.S. (2025). *Hoja de datos del producto Sika® ViscoCrete®-3100*. www.col.sika.com
- Silvestro, L., & Jean Paul Gleize, P. (2020). Effect of carbon nanotubes on compressive, flexural and tensile strengths of Portland cement-based materials: A systematic literature review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 264). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120237>
- Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M., & Leonhardt, A. (2012). Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1104–1113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.008>
- Stutzman, P. E. (2012). Microscopy of clinker and hydraulic cements. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74, 101–146. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.3>
- Sulochana, G., Prasad, C. V., Bhatti, S. K., Venu Madhav, V. V., Saxena, K. K., Khan, M. I., Aloui, Z., Prakash, C., & Khan, M. I. (2024). Impact of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on hybrid biodiesel blends for cleaner combustion in CI engines. *Energy*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131911>
- Sumio Lijima. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *NATURE*, 354.

- Tafesse, M., Lee, N. K., Alemu, A. S., Lee, H. K., Kim, S. W., & Kim, H. K. (2021). Flowability and electrical properties of cement composites with mechanical dispersion of carbon nanotube. *Construction and Building Materials*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123436>
- Taha, H. M., Ball, R. J., Heath, A., & Paine, K. (2023). Insights into the piezoceramic electromechanical impedance response for monitoring cement mortars during water saturation curing. *Construction and Building Materials*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130364>
- Triana-Camacho, D. A., Miranda, D. A., García-Macías, E., Mendoza Reales, O. A., & Quintero-Orozco, J. H. (2022). Effective medium electrical response model of carbon nanotubes cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128293>
- Tugelbayev, A., Kim, J. H., Lee, J. U., & Chung, C. W. (2023). The effect of acid treated multi-walled carbon nanotubes on the properties of cement paste prepared by ultrasonication with polycarboxylate ester. *Journal of Building Engineering*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105638>
- Ubertini, F., Materazzi, A. L., D'Alessandro, A., & Laflamme, S. (2014). Natural frequencies identification of a reinforced concrete beam using carbon nanotube cement-based sensors. *Engineering Structures*, 60, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.12.036>
- Vafaeva, K. M., & Zegait, R. (2024). Carbon nanotubes: revolutionizing construction materials for a sustainable future: A review. In *Research on Engineering Structures and Materials* (Vol. 10, Issue 2, pp. 559–621). MIM RESEARCH GROUP. <https://doi.org/10.17515/resm2023.42ma0818rv>
- Vesmawala, G. R., Vaghela, A. R., Yadav, K. D., & Patil, Y. (2019). Effectiveness of polycarboxylate as a dispersant of carbon nanotubes in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1170–1174. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.102>
- Wang, L., & Aslani, F. (2023). Structural performance of reinforced concrete beams with 3D printed cement-based sensor embedded and self-sensing cementitious composites. *Engineering Structures*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115266>
- Wang, X., Zhang, J., Han, R., Han, N., & Xing, F. (2019). Evaluation of damage and repair rate of self-healing microcapsule-based cementitious materials using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Cleaner Production*, 235, 966–976. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.294>

- Wansom, S., Kidner, N. J., Woo, L. Y., & Mason, T. O. (2006). AC-impedance response of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.014>
- Weldcote Metals. (2024). *WELDCOTE 95/5 TIN/ANTIMONY SOLDER*. https://weldcotemetals.com/dataFiles/specs/techSolder95-5TinAntimony.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Yesudhas Jayakumari, B., Nattanmai Swaminathan, E., & Partheeban, P. (2023). A review on characteristics studies on carbon nanotubes-based cement concrete. In *Construction and Building Materials* (Vol. 367). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130344>
- Yin, T., Xu, J., Wang, Y., & Liu, L. (2020). Increasing self-sensing capability of carbon nanotubes cement-based materials by simultaneous addition of Ni nanofibers with low content. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119306>
- Yoo, D. Y., You, I., & Lee, S. J. (2018). Electrical and piezoresistive sensing capacities of cement paste with multi-walled carbon nanotubes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(2), 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.09.007>
- Yoo, D. Y., You, I., Youn, H., & Lee, S. J. (2018). Electrical and piezoresistive properties of cement composites with carbon nanomaterials. *Journal of Composite Materials*, 52(24), 3325–3340. <https://doi.org/10.1177/0021998318764809>
- Yu, X., Zhang, Z., & Yao, Y. (2024). Water Permeability Monitoring Based on the Electrical Signal Changes of Piezoresistive Cementitious Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(11). <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-18163>
- Zhan, M., Pan, G., Zhou, F., Mi, R., & Shah, S. P. (2020). In situ-grown carbon nanotubes enhanced cement-based materials with multifunctionality. *Cement and Concrete Composites*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103518>
- Zhang, J., Ke, Y., Zhang, J., Han, Q., & Dong, B. (2020). Cement paste with well-dispersed multi-walled carbon nanotubes: Mechanism and performance. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120746>
- Zhang, L., Ding, S., Han, B., Yu, X., & Ni, Y. Q. (2019). Effect of water content on the piezoresistive property of smart cement-based materials with carbon nanotube/nanocarbon black composite filler. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 119, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.010>
- Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, Z., & Yao, Y. (2017). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of hydration process and drying shrinkage for cement paste with W/C of 0.25

affected by high range water reducer. *Construction and Building Materials*, 131, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.099>

Zou, B., Chen, S. J., Korayem, A. H., Collins, F., Wang, C. M., & Duan, W. H. (2015). Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes. *Carbon*, 85, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.094>

Anexos

Anexo A

Diagramas de Nyquist en distintos periodos de tiempo, para todos los métodos de dispersión.

Figura A - 1. Diagramas Nyquist y valores de R, muestra patrón.

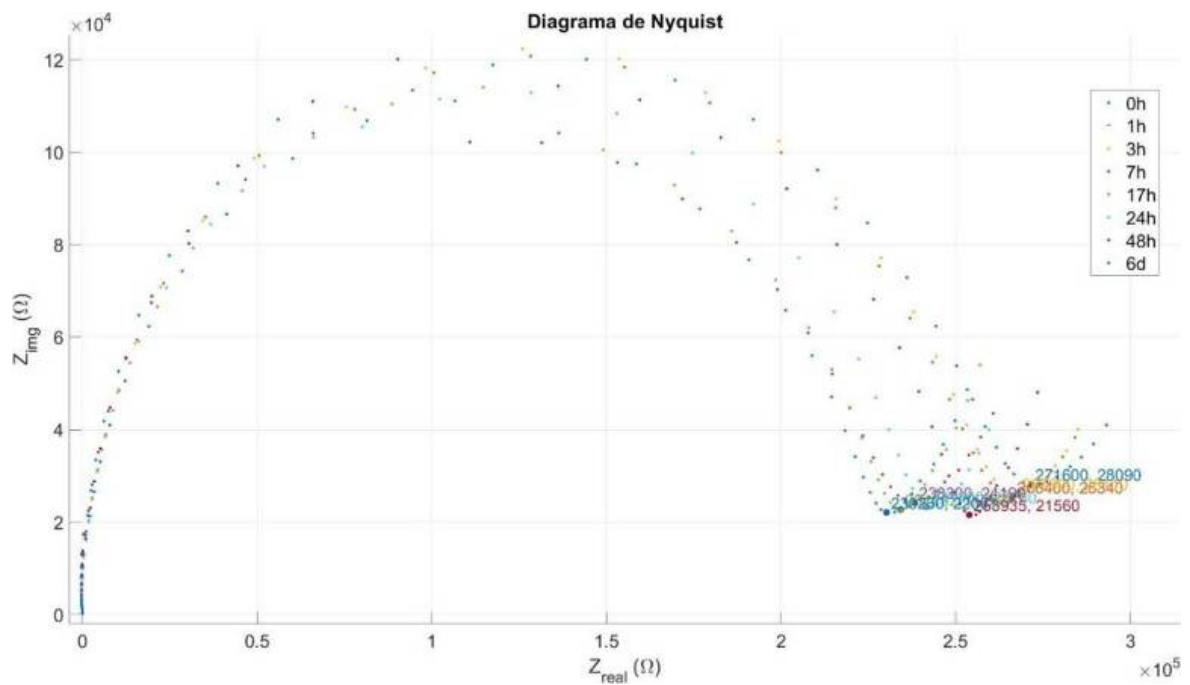


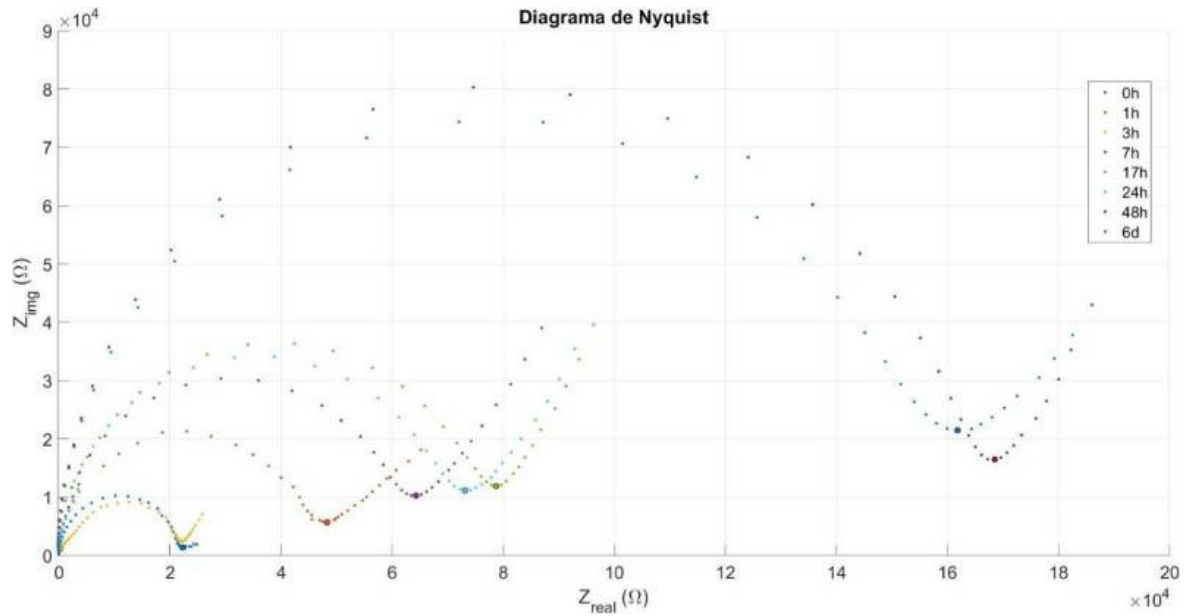
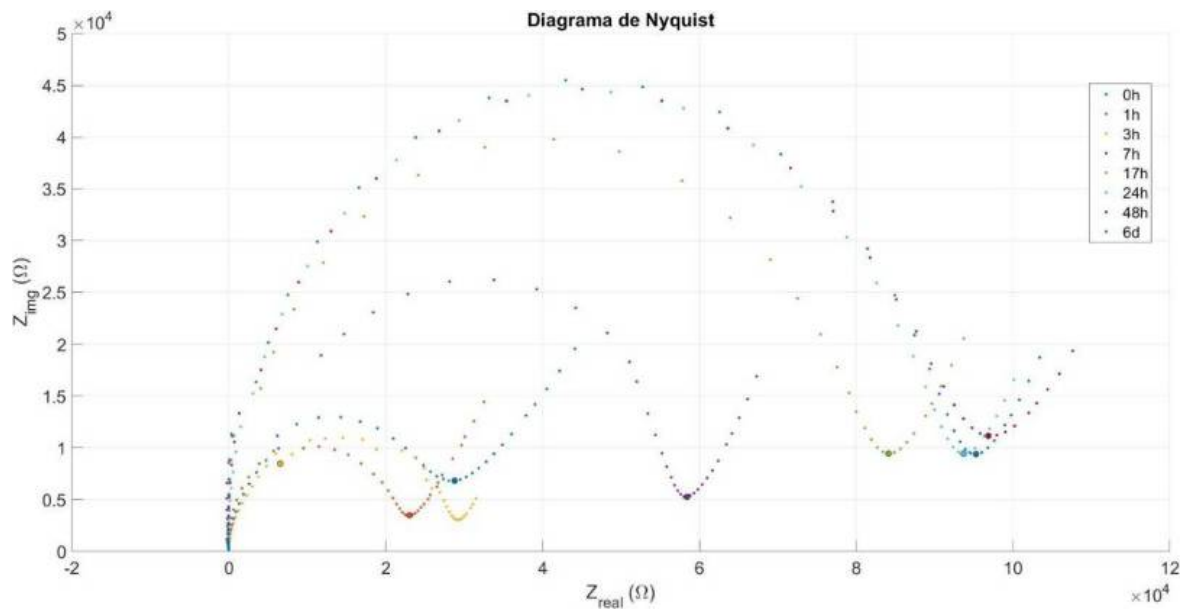
Figura A - 2. Diagramas Nyquist, muestra 1.**Figura A - 3.** Diagramas Nyquist, muestra 2.

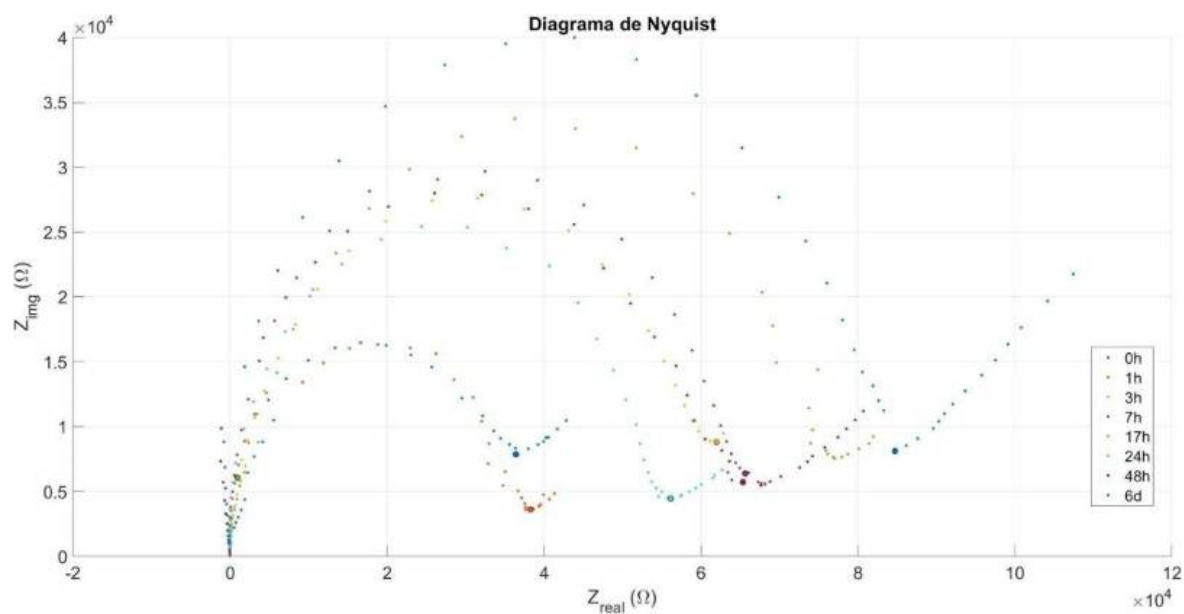
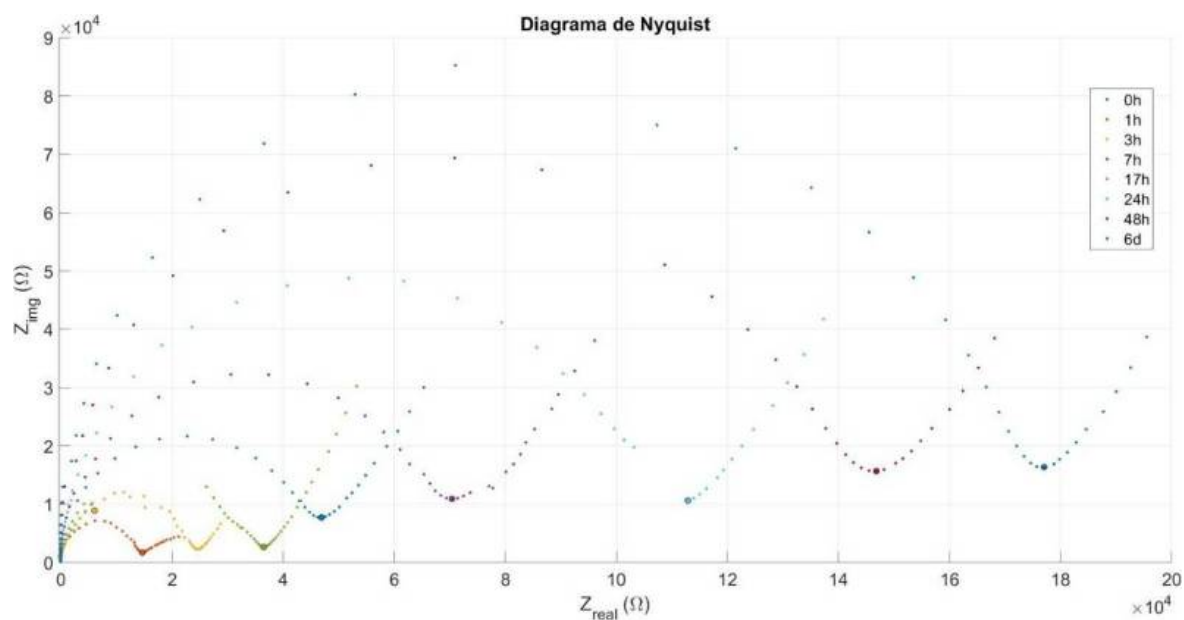
Figura A - 4. Diagramas Nyquist, muestra 3.**Figura A - 5.** Diagramas Nyquist, muestra 4.

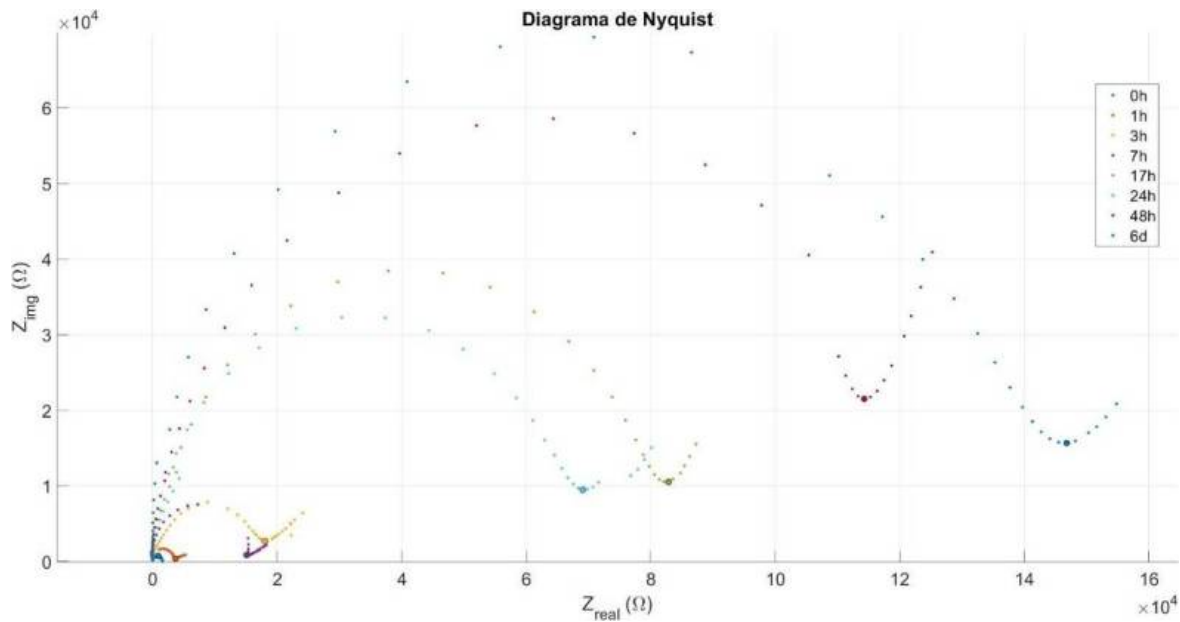
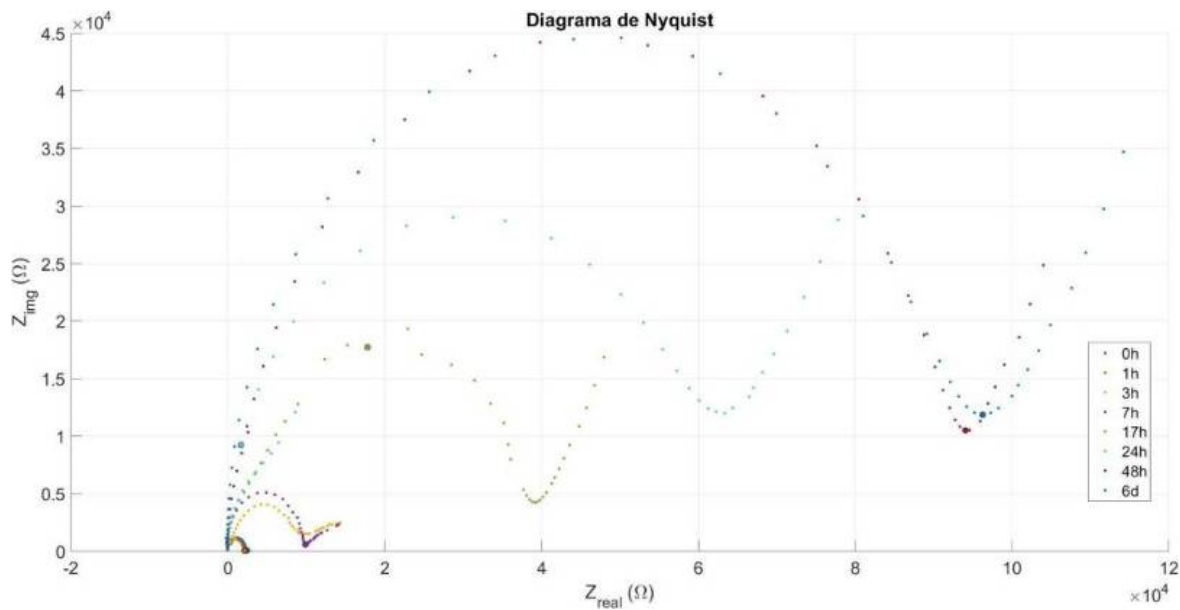
Figura A - 6. Diagramas Nyquist, muestra 5.**Figura A - 7.** Diagramas Nyquist, muestra 6.

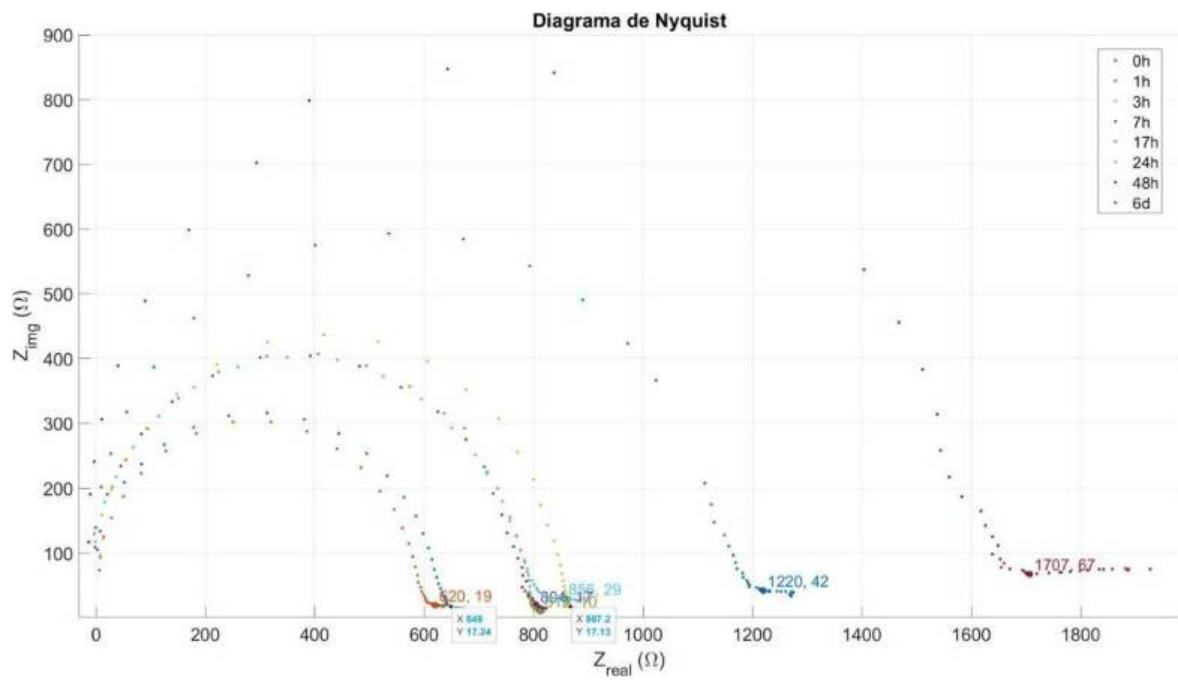
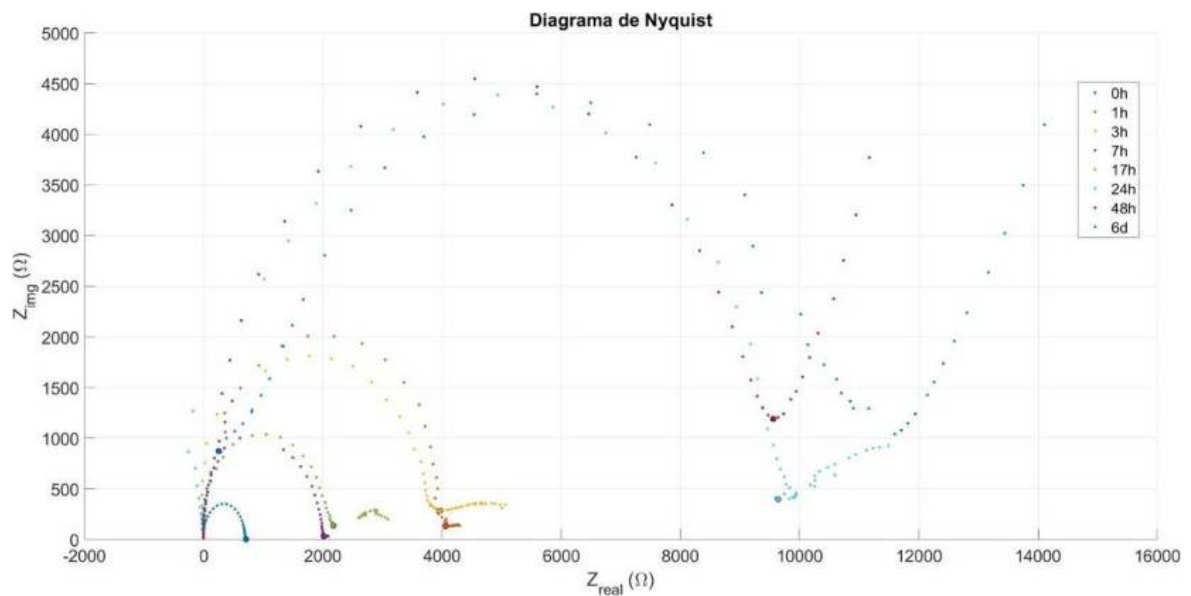
Figura A - 8. Diagramas Nyquist y valores de R, muestra 7.**Figura A - 9.** Diagramas Nyquist, muestra 8.

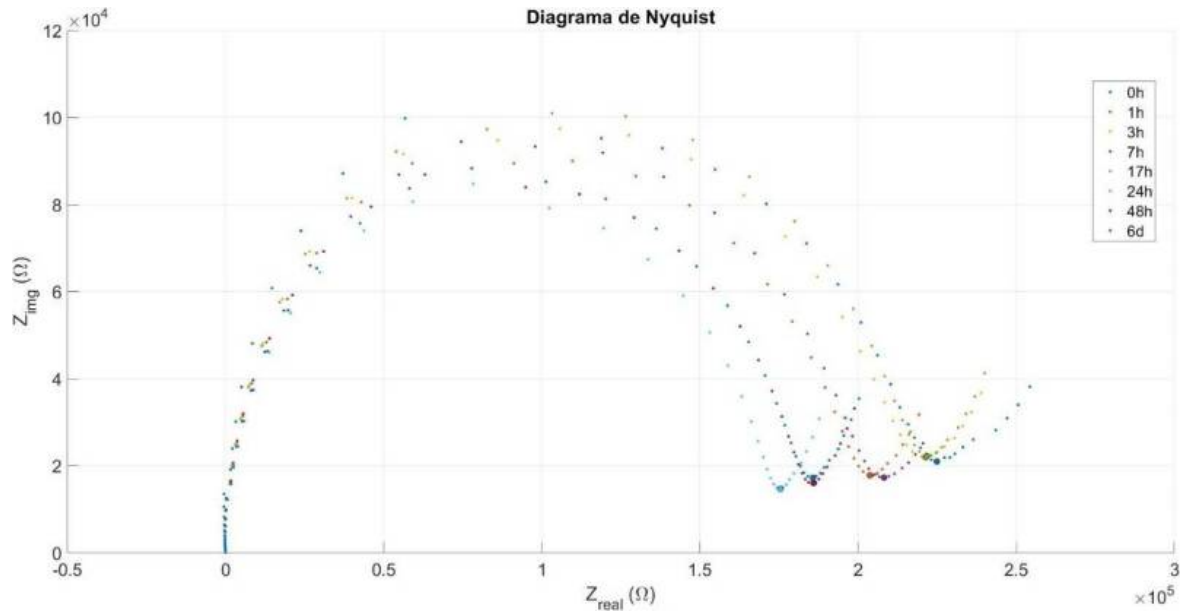
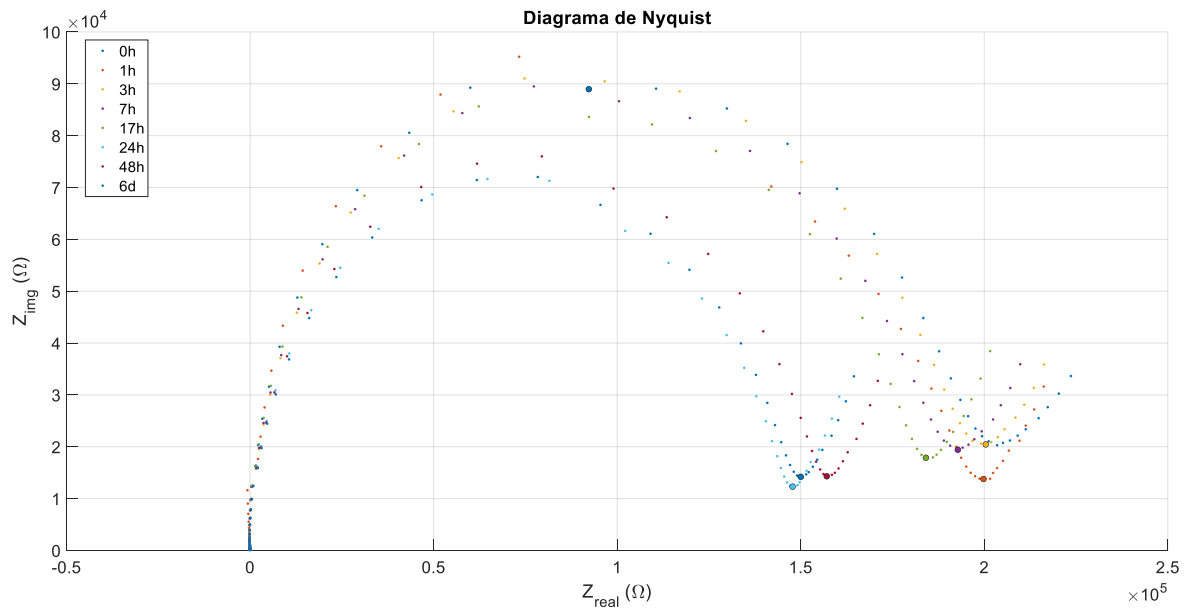
Figura A - 10. Diagramas Nyquist, muestra 9.**Figura A - 11.** Diagramas Nyquist, muestra 10.

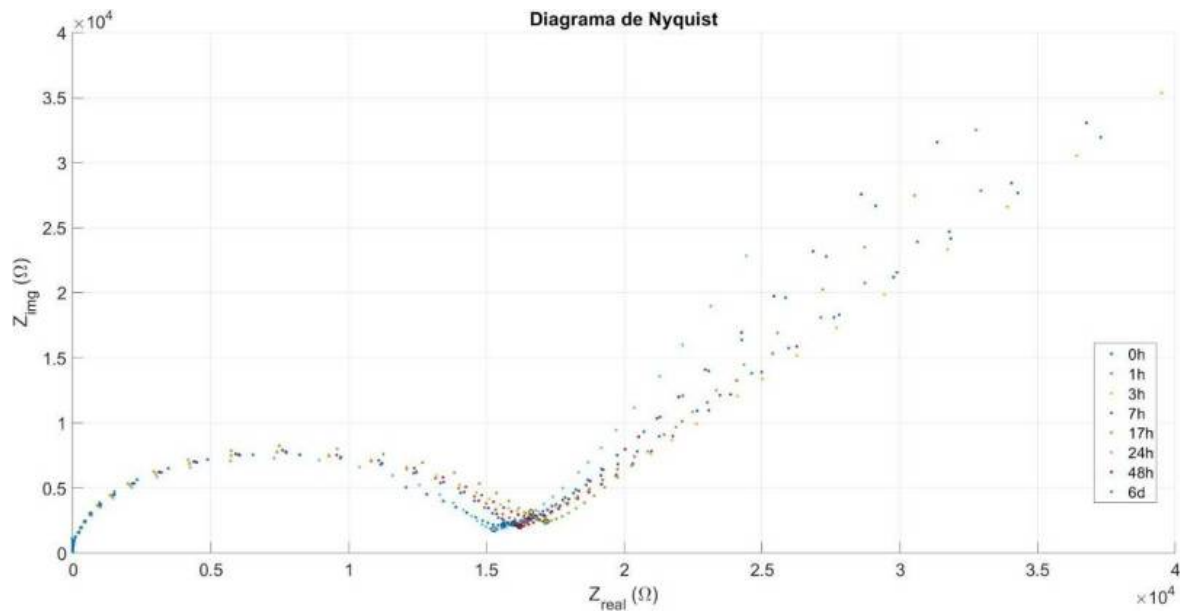
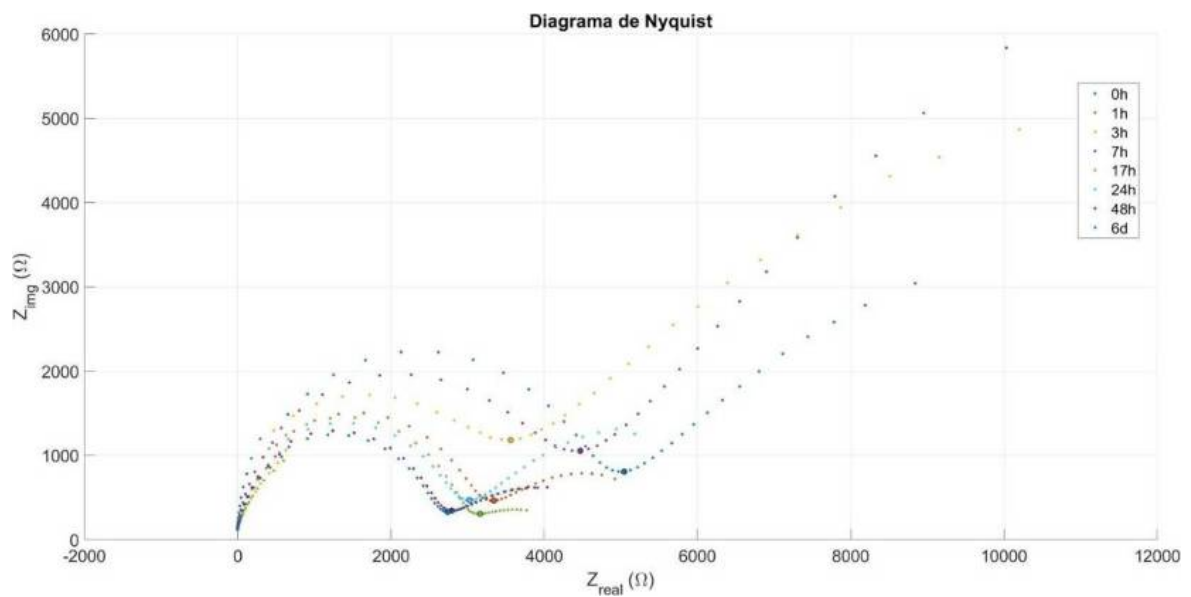
Figura A - 12. Diagramas Nyquist, muestra 11.**Figura A - 13.** Diagramas Nyquist, muestra 12.

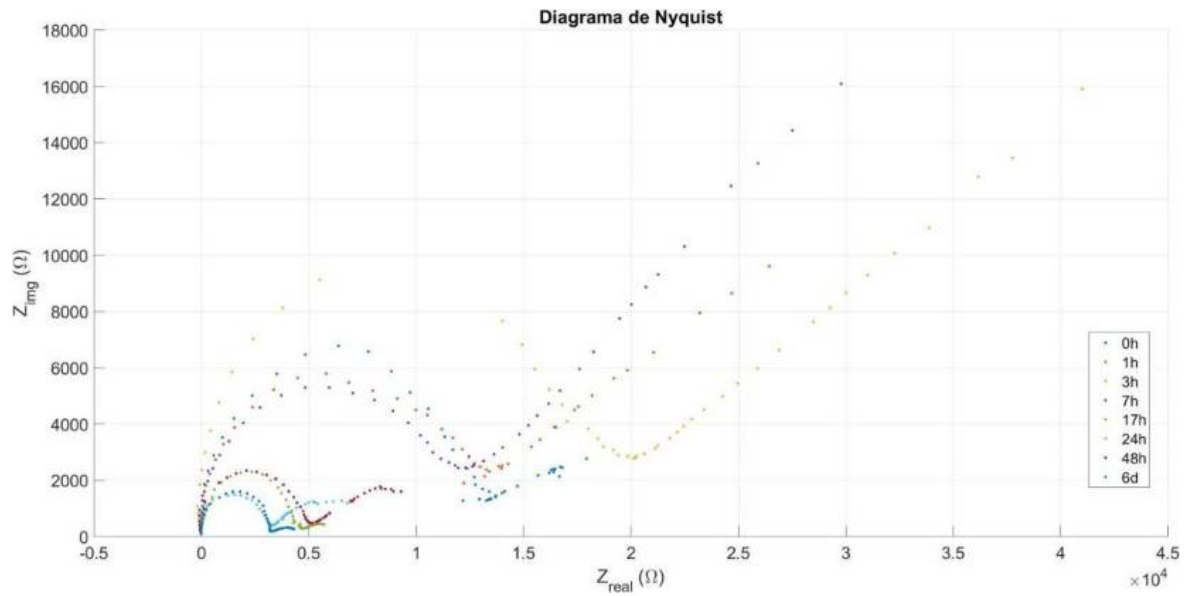
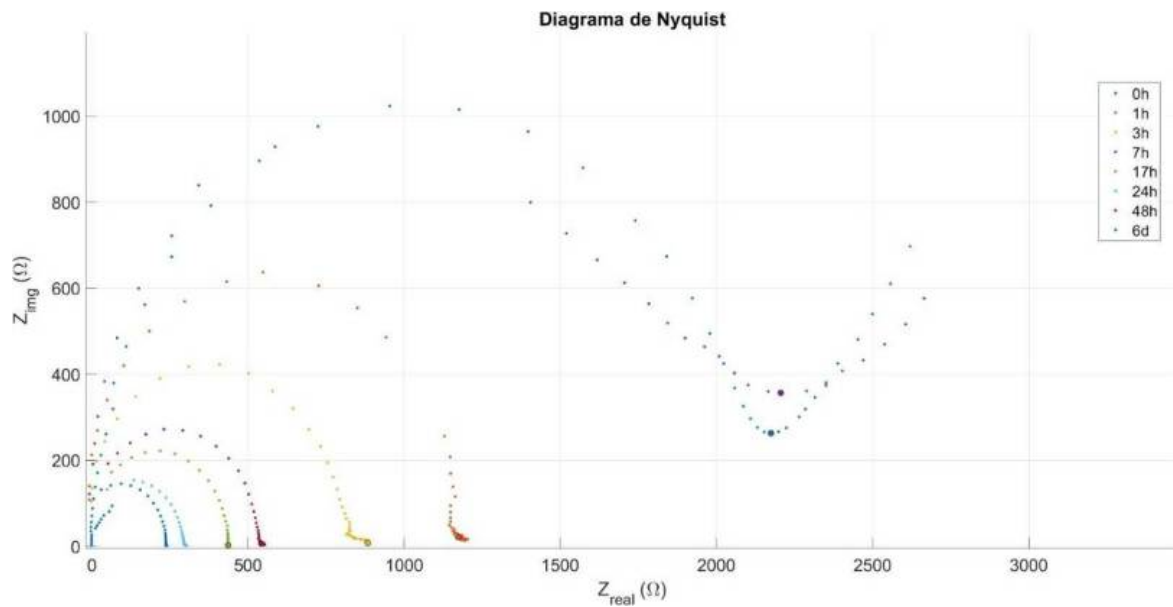
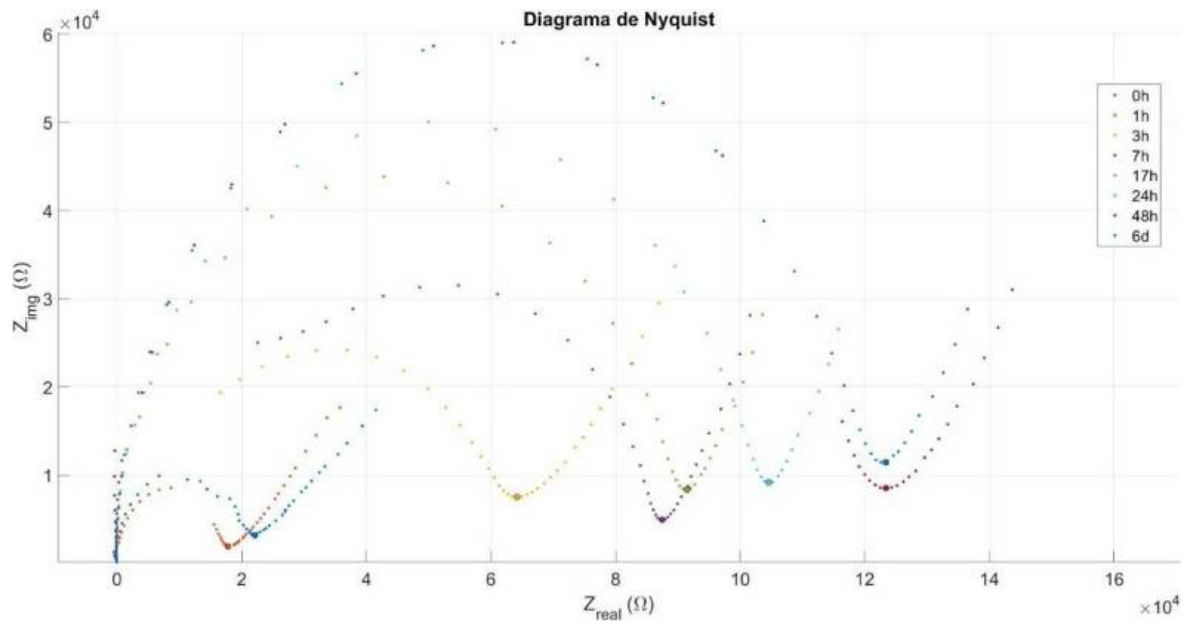
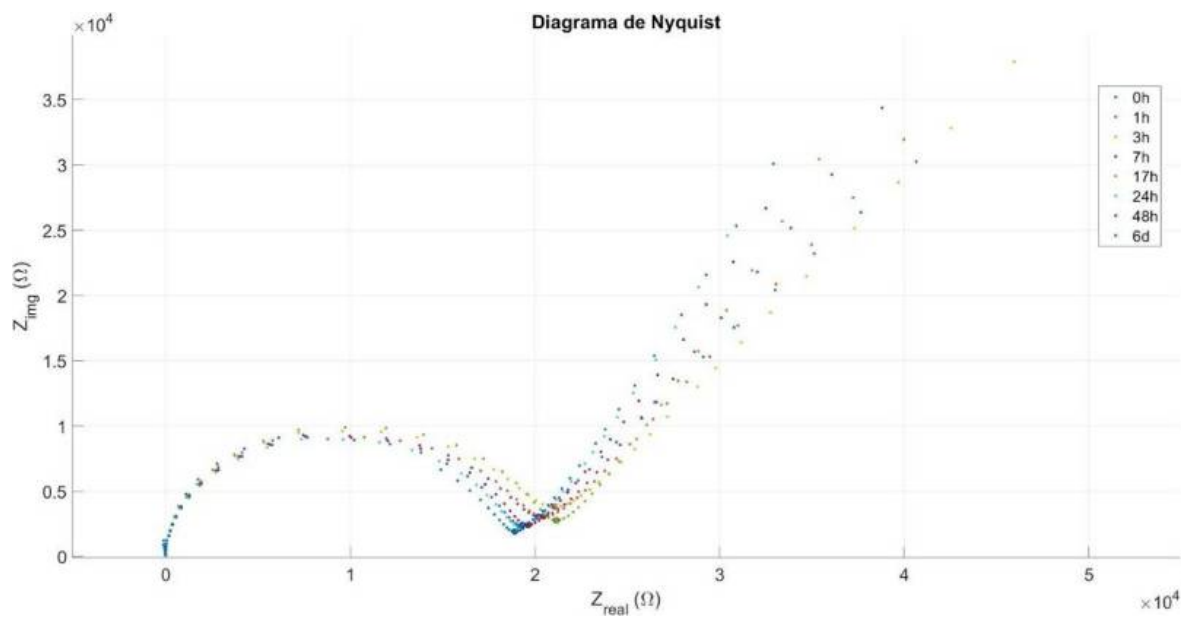
Figura A - 14. Diagramas Nyquist, muestra 13.**Figura A - 15.** Diagramas Nyquist, muestra 14.

Figura A - 16. Diagramas Nyquist, muestra 15.**Figura A - 17.** Diagramas Nyquist, muestra 16.

Anexo B

Gráficas de Nyquist y Bode para la determinación de frecuencias de cada clase de espécimen y tipo de electrodo.

Figura B - 1. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo de lámina de acero, adición de 0.0 % MWCNT.

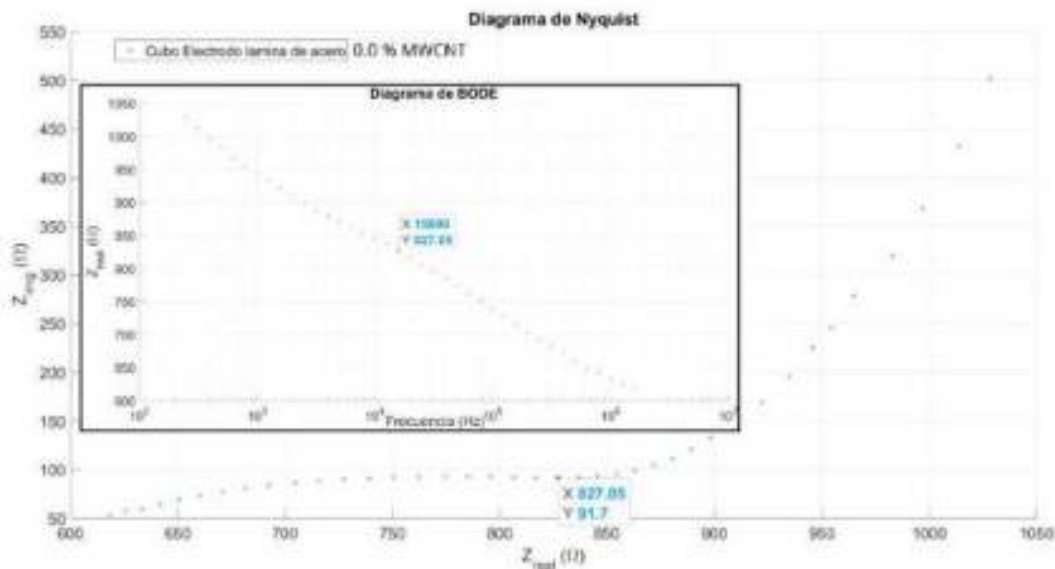


Figura B - 2. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo de lámina de acero, adición de 0.5 % MWCNT.

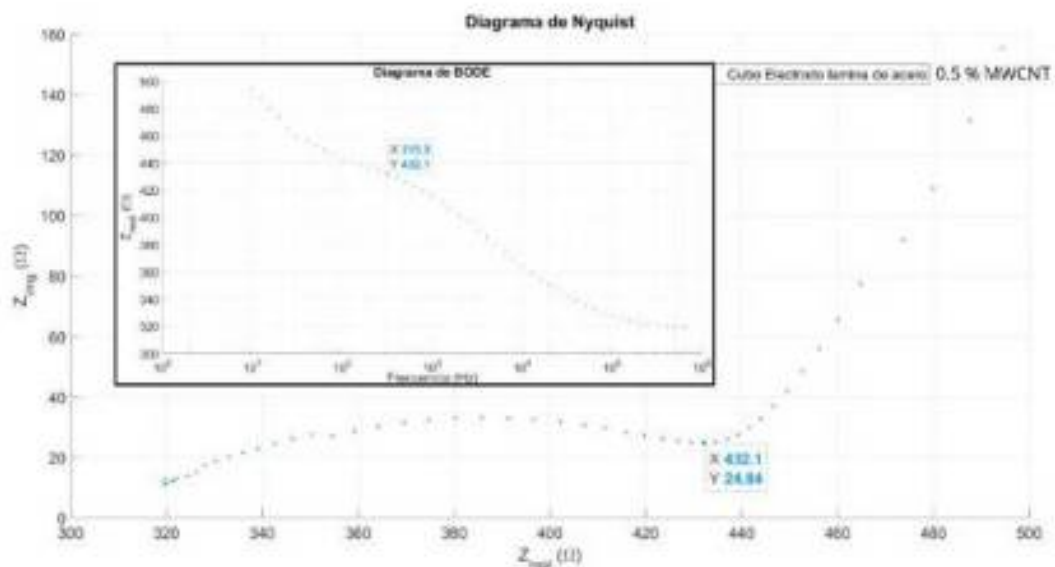


Figura B - 3. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo de lámina de acero, adición de 1.0 % MWCNT.

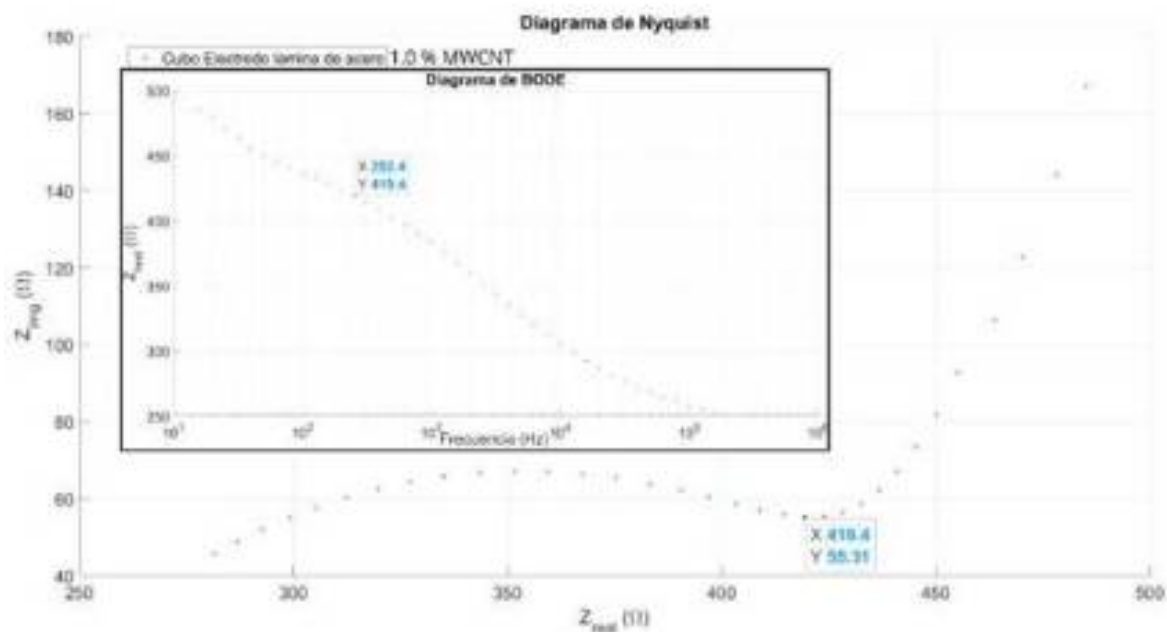


Figura B - 4. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo de malla de acero, adición de 0.0 % MWCNT.

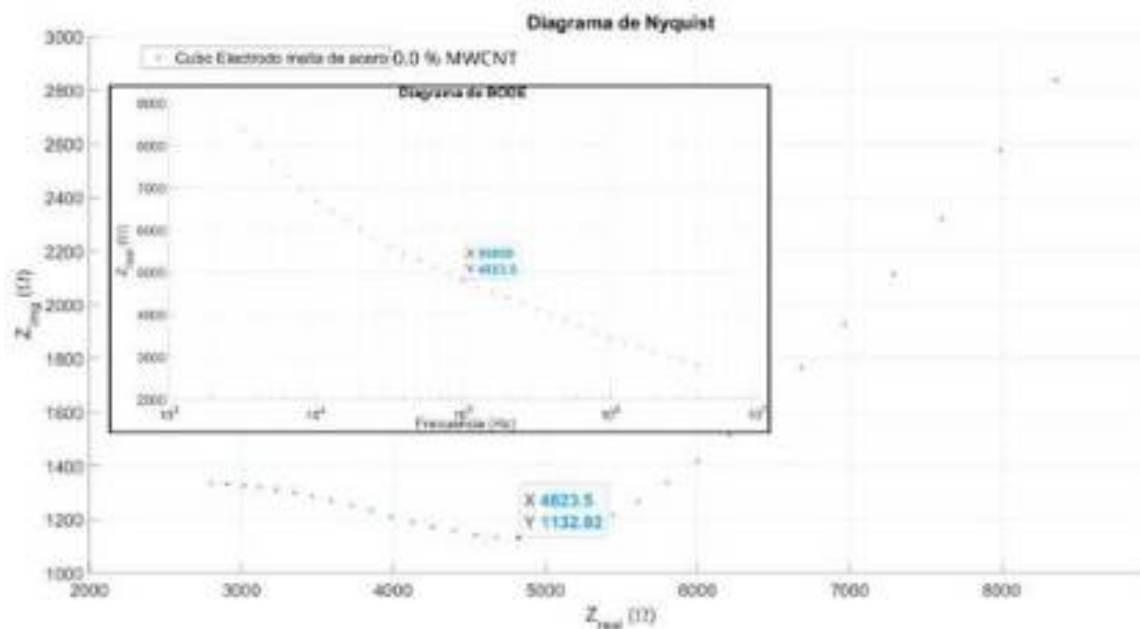


Figura B - 5. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo de malla de acero, adición de 0.5 % MWCNT.

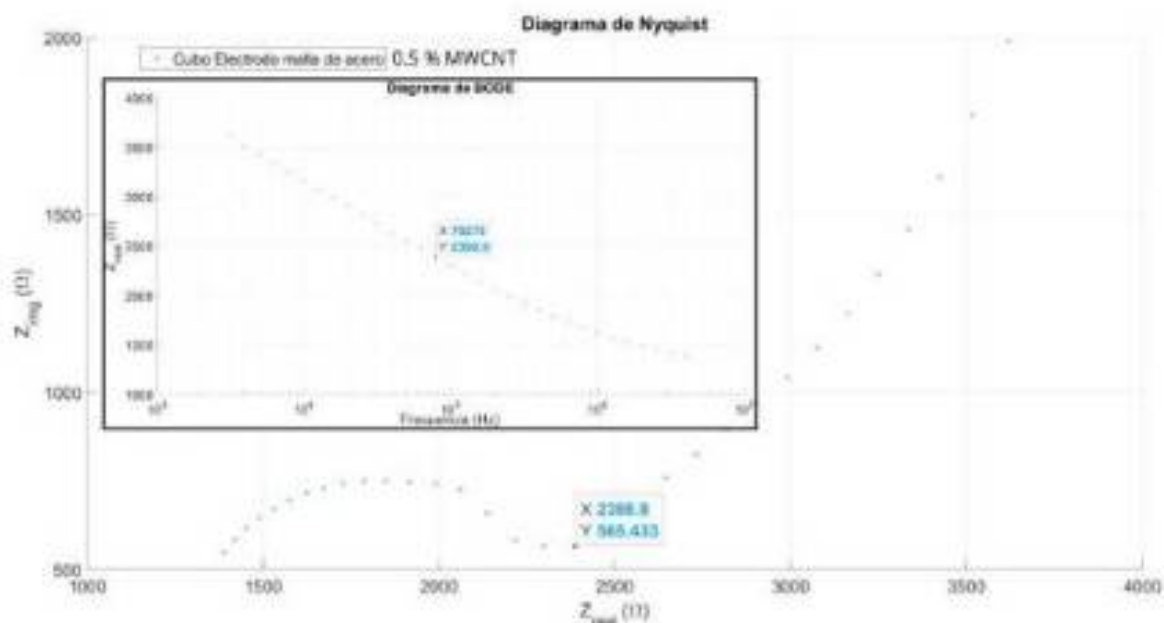


Figura B - 6. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo de malla de acero, adición de 1.0 % MWCNT.

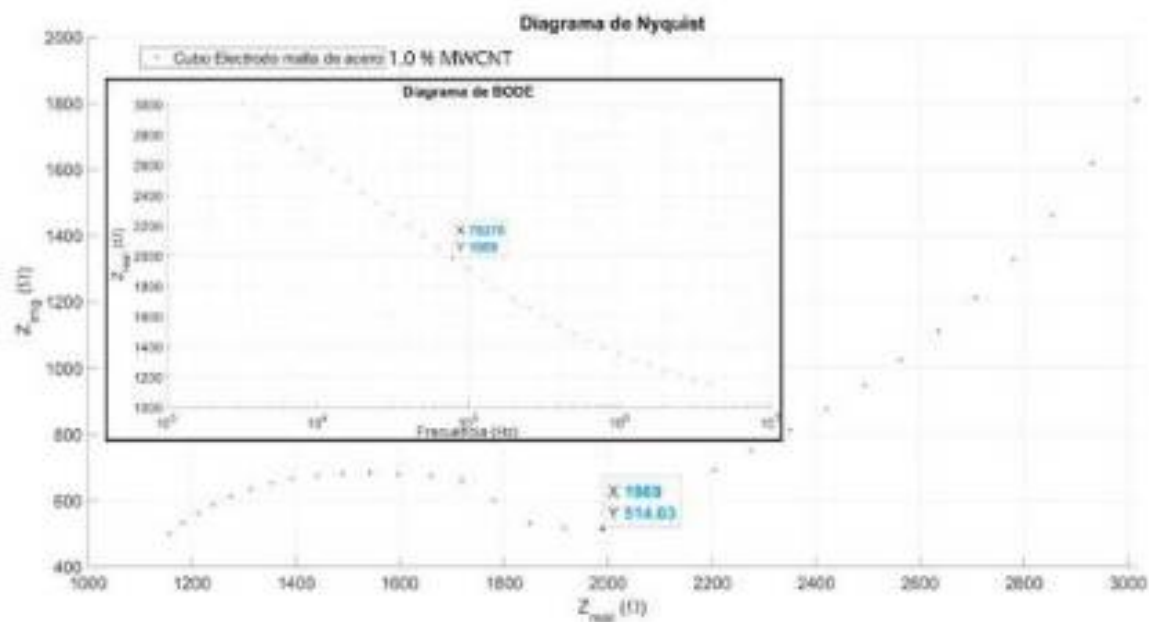


Figura B - 7. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo serigrafiado, adición de 0.0 % MWCNT.

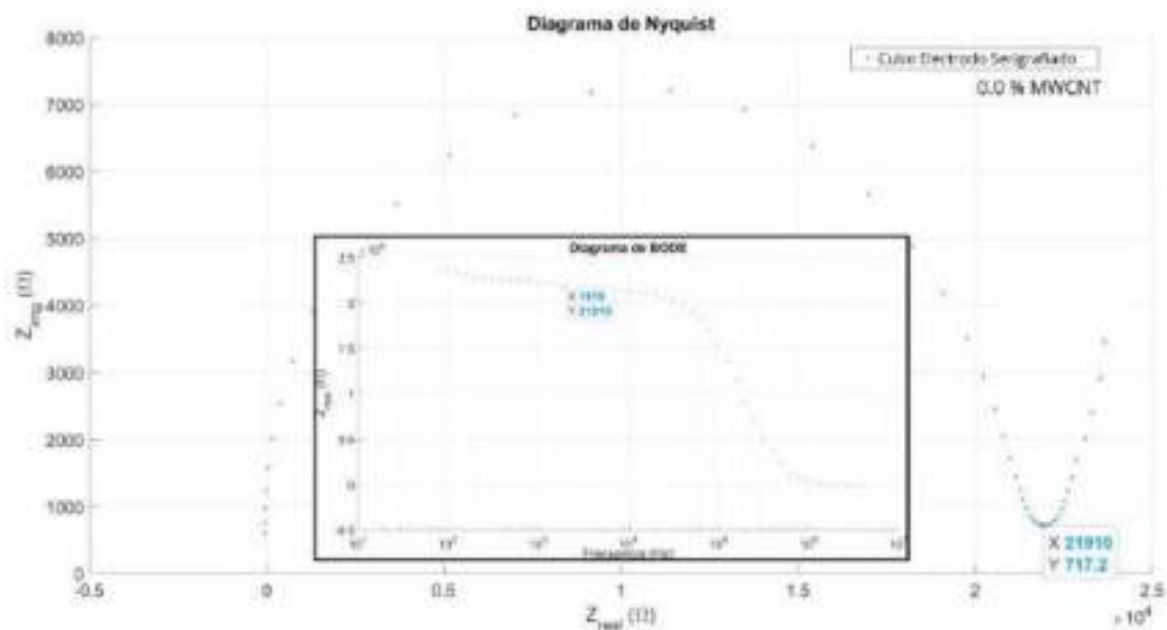


Figura B - 8. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo serigrafiado, adición de 0.5 % MWCNT.

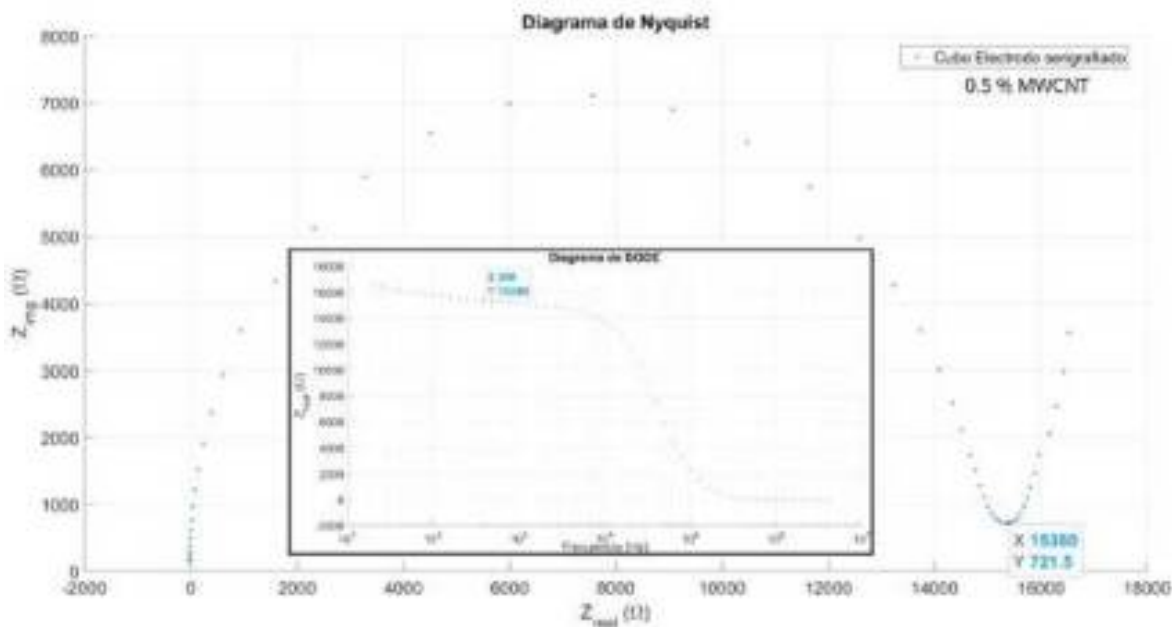


Figura B - 9. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Cubo con electrodo serigrafiado, adición de 1.0 % MWCNT.

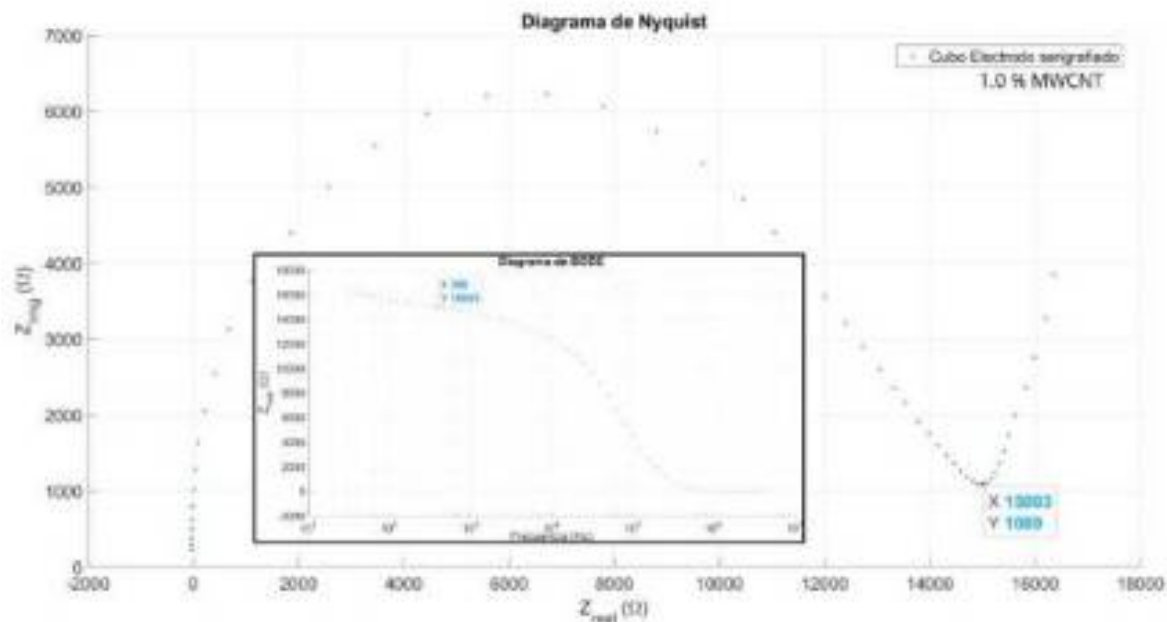


Figura B - 10. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo de lámina de acero, adición de 0.0 % MWCNT.

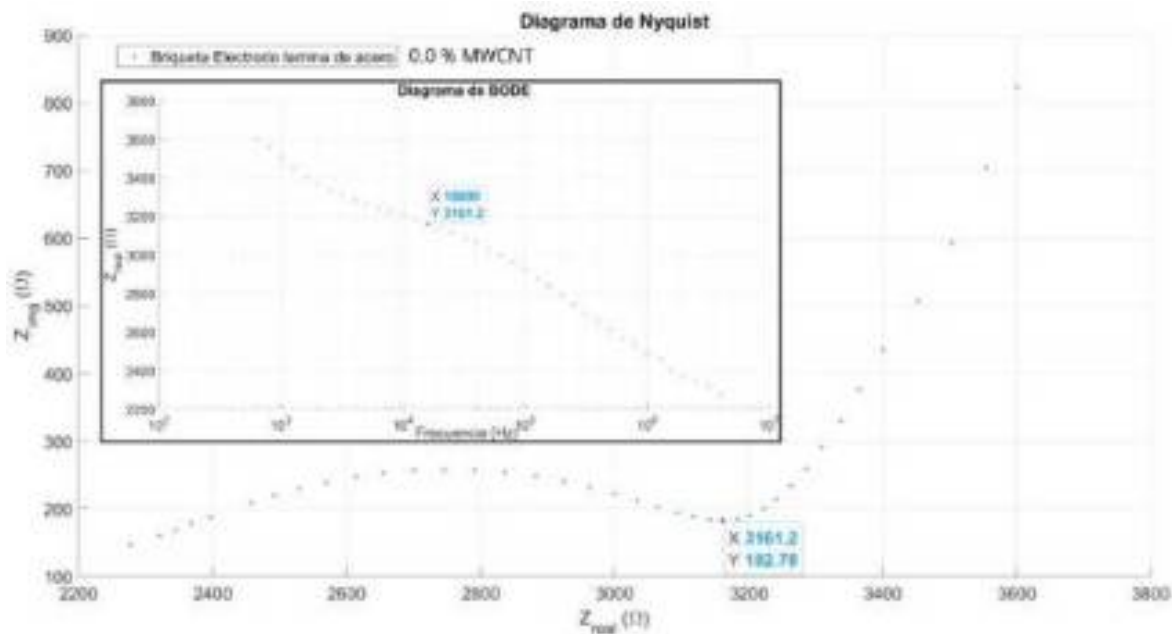


Figura B - 11. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo de lámina de acero, adición de 0.5 % MWCNT.

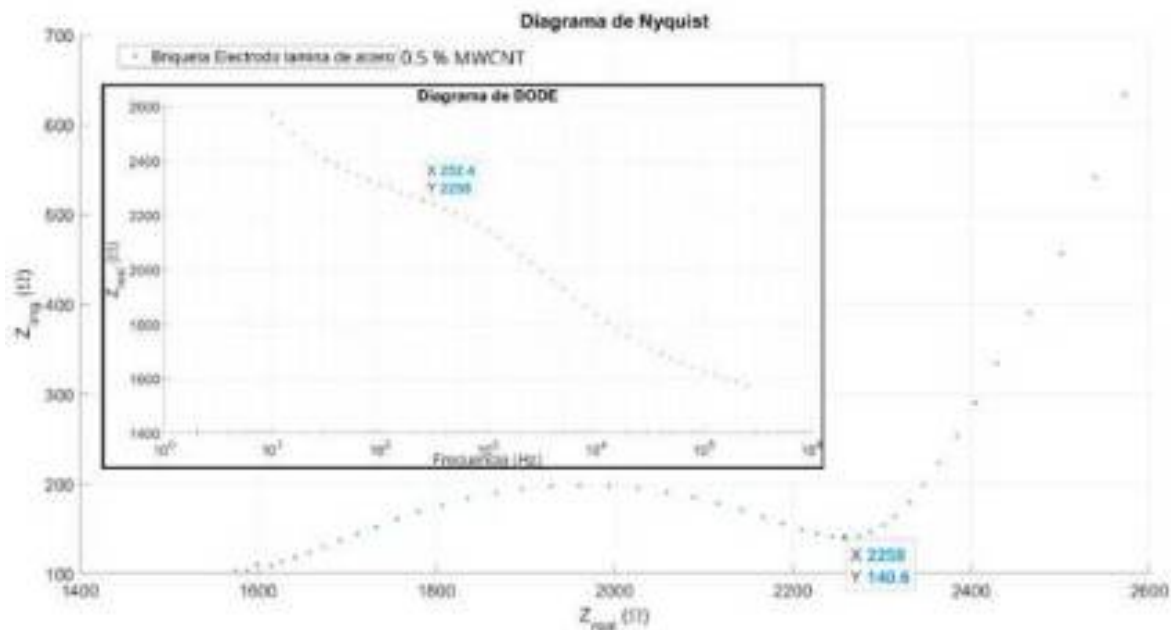


Figura B - 12. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo de lámina de acero, adición de 1.0 % MWCNT.

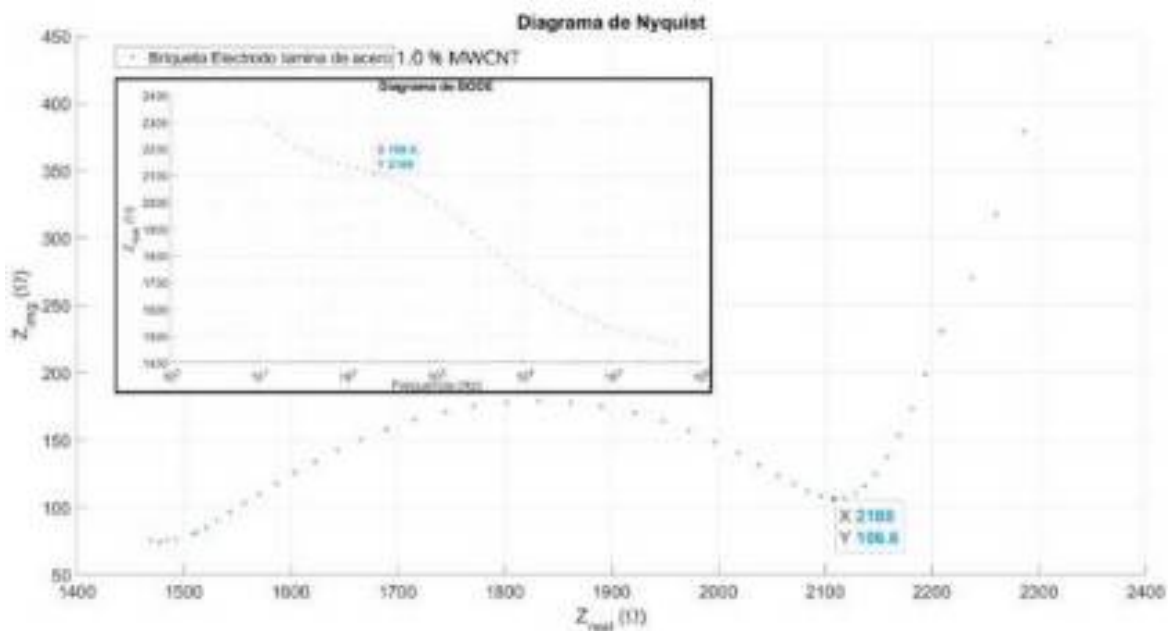


Figura B - 13. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo de malla de acero, adición de 0.0 % MWCNT.

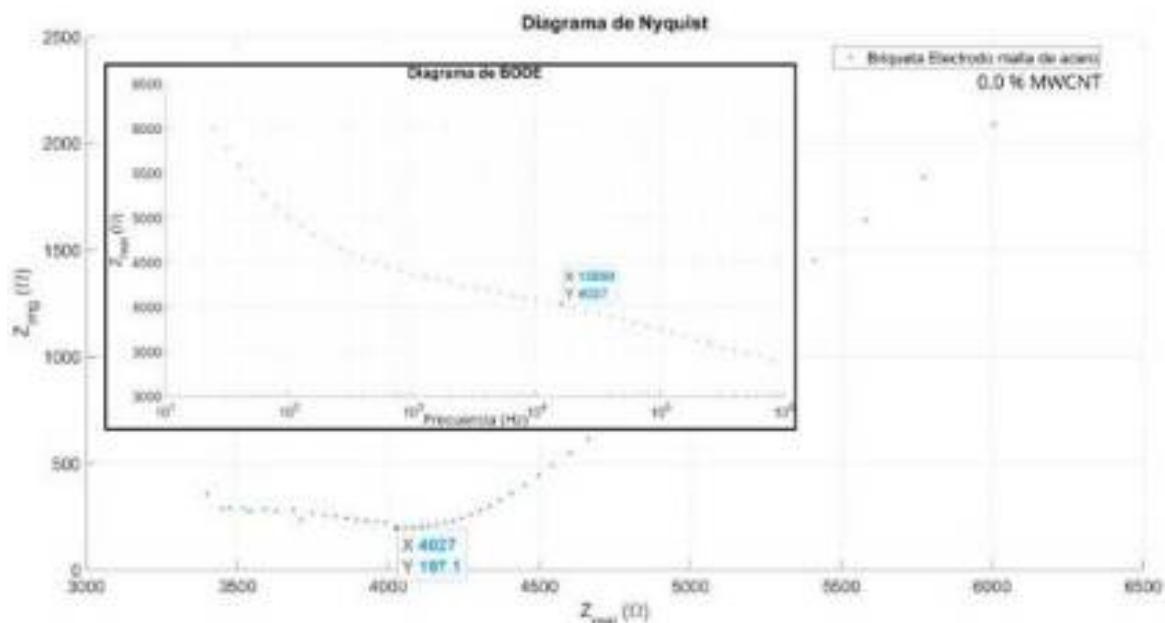


Figura B - 14. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo de malla de acero, adición de 0.5 % MWCNT.

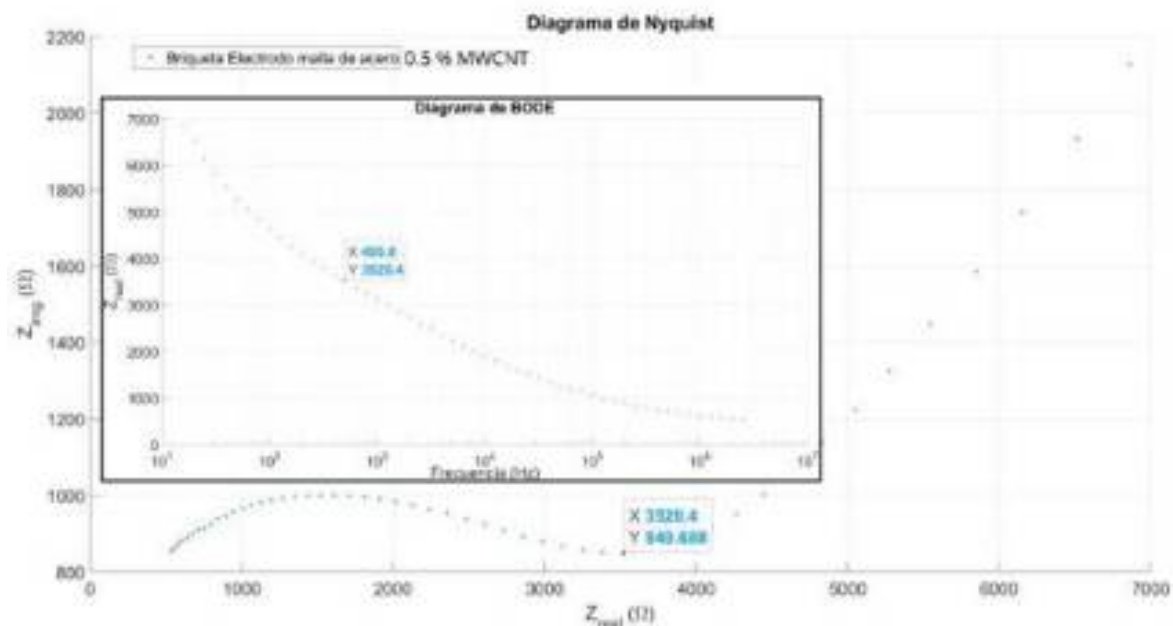


Figura B - 15. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo de malla de acero, adición de 1.0 % MWCNT.

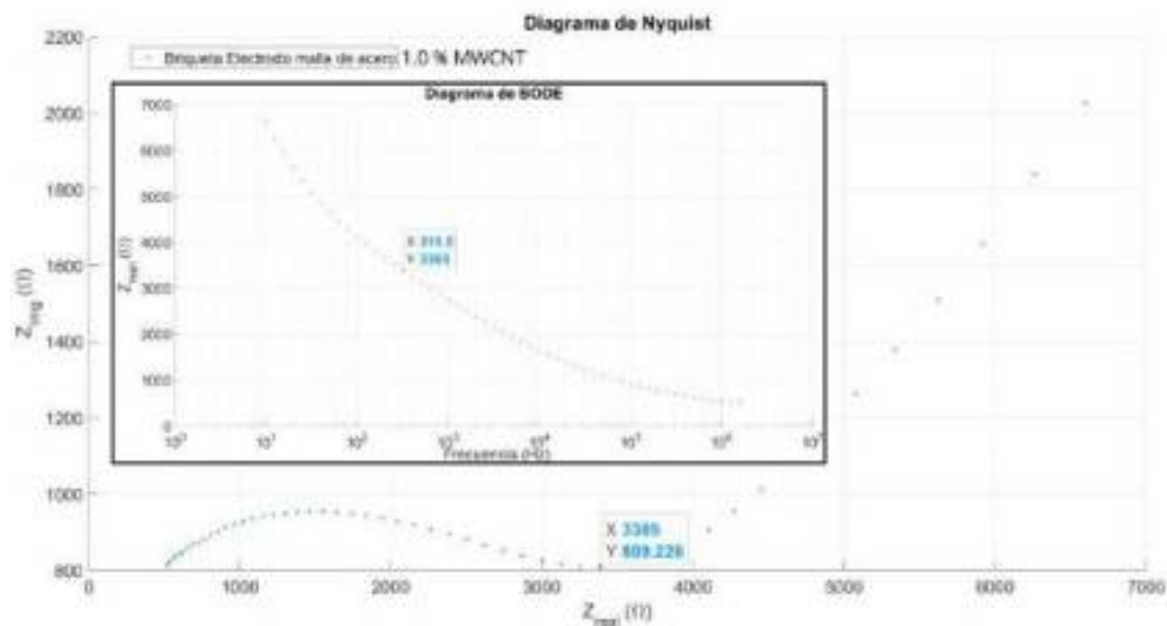


Figura B - 16. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo serigrafado, adición de 0.0 % MWCNT.

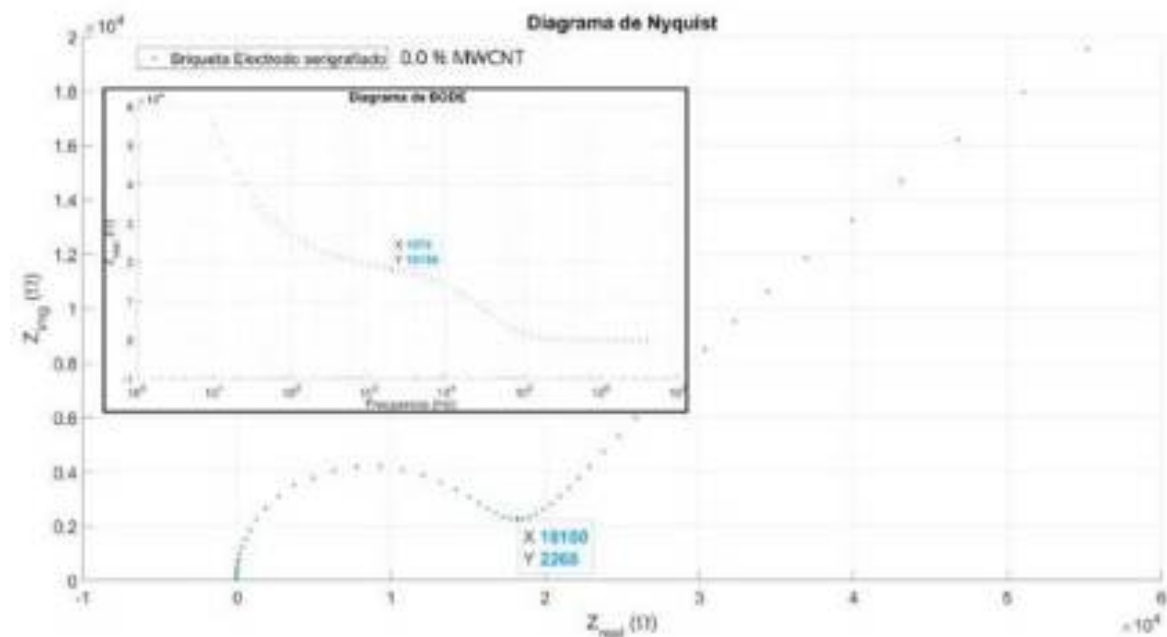
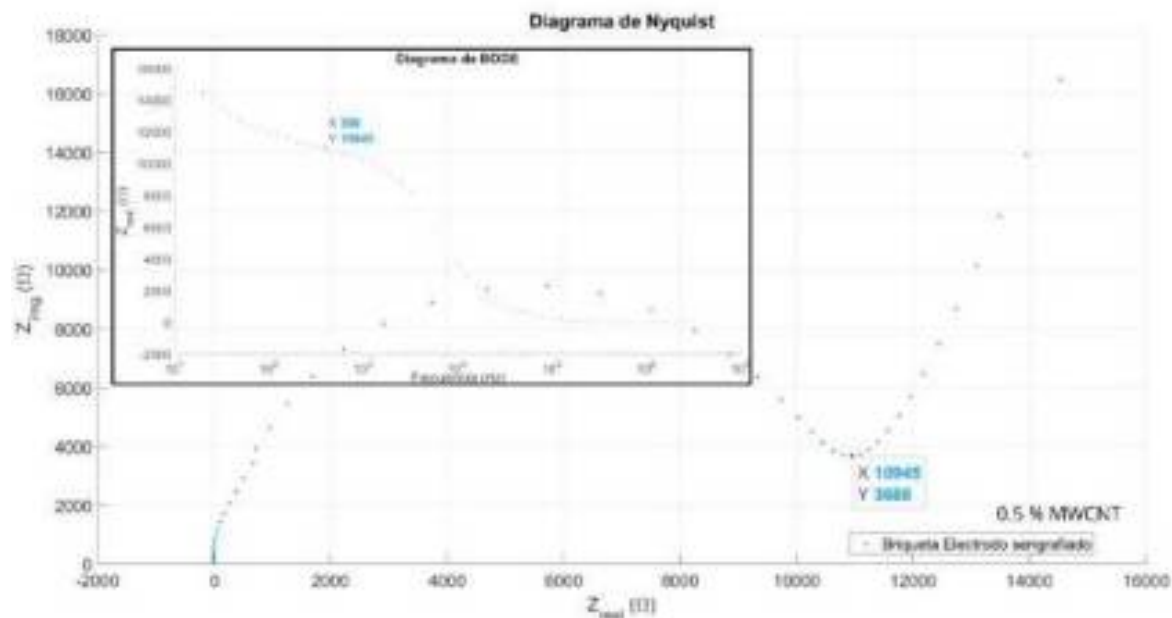


Figura B - 17. Gráficas de Nyquist y Bode para determinar frecuencia. Briqueta con electrodo serigrafiado, adición de 0.0 % MWCNT.



Anexo C

Gráficas de FCR vs tiempo para todas las distintas adiciones y configuraciones de especímenes.

Figura C - 1. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEM 0.0 % MWCNT.

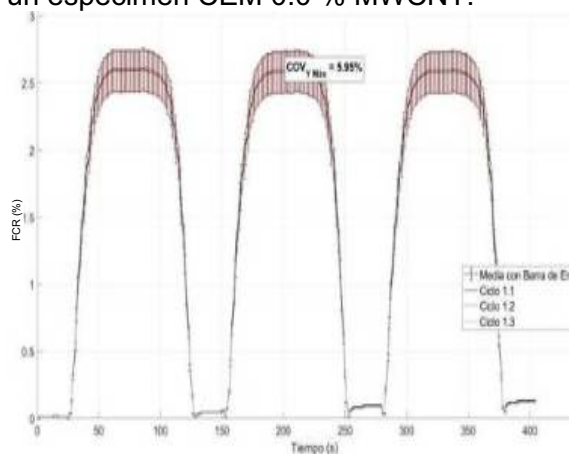


Figura C - 2. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEM 0.5 % MWCNT.

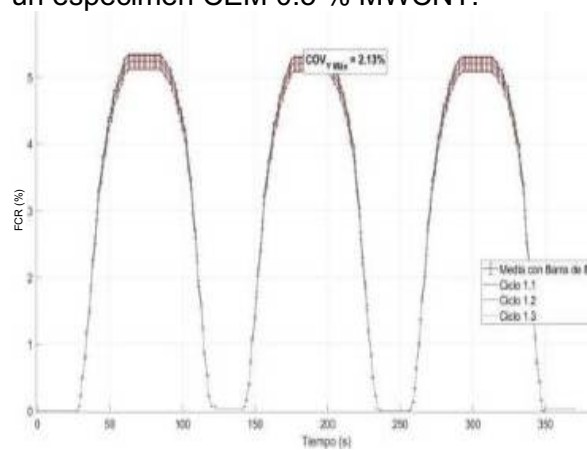


Figura C - 3. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEM 1.0 % MWCNT.

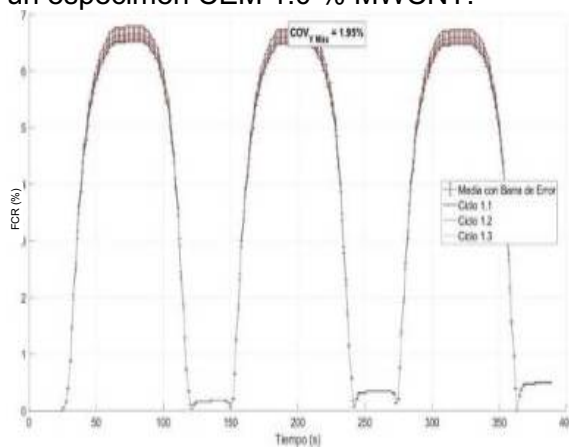


Figura C - 4. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEL 0.0 % MWCNT.

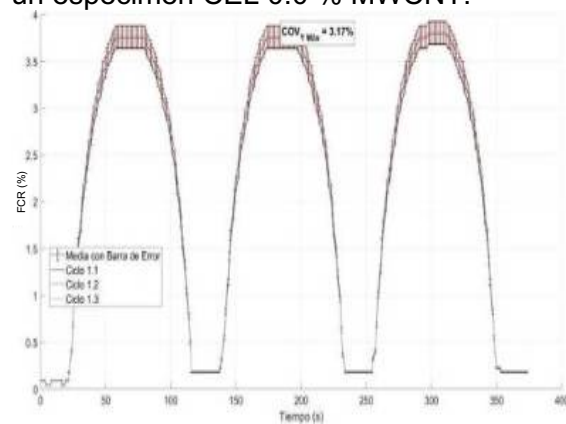


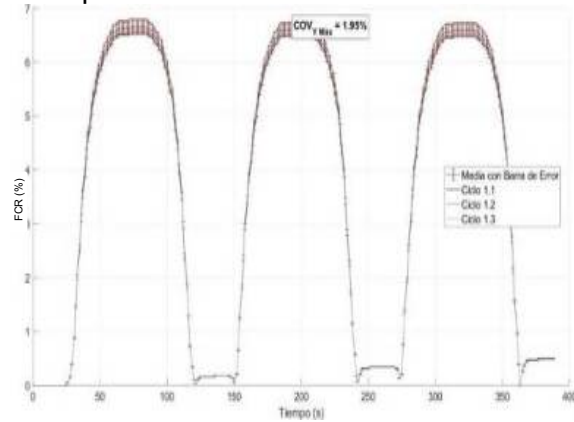
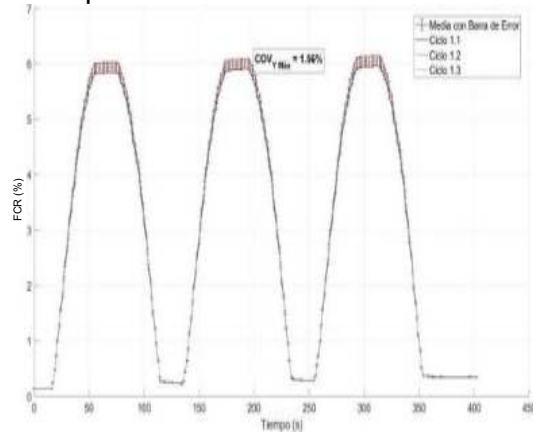
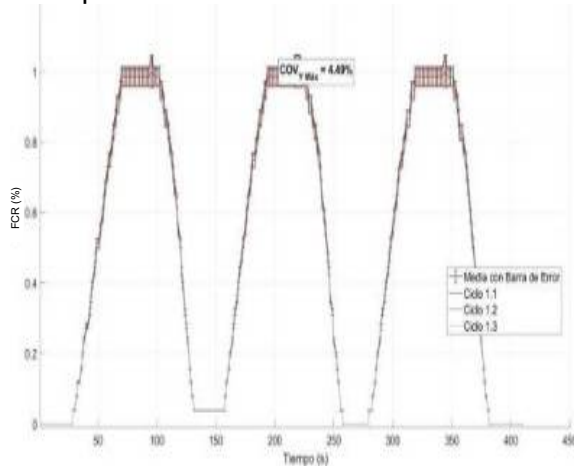
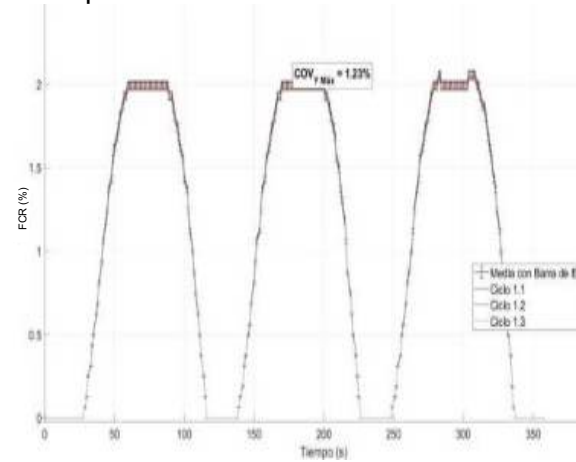
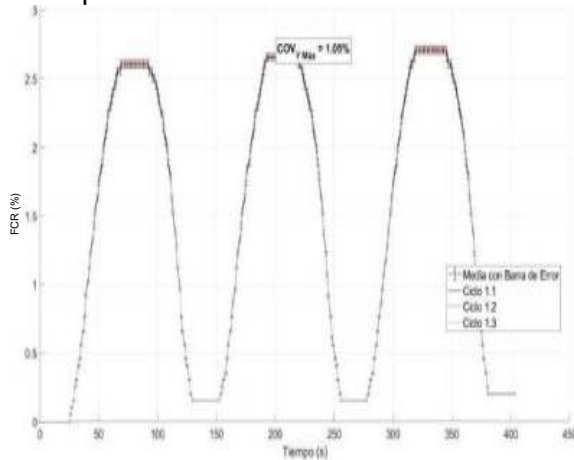
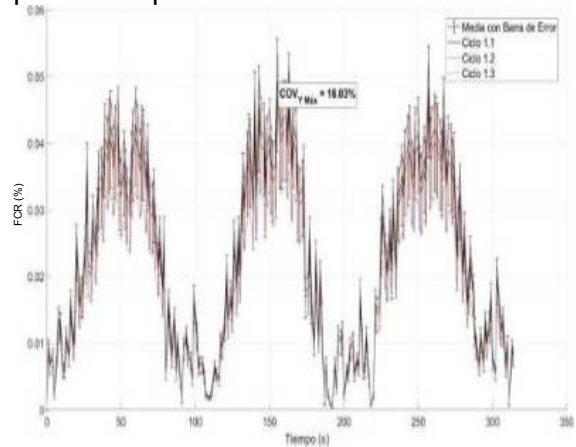
Figura C - 5. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEL 0.5 % MWCNT.**Figura C - 6.** Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CEL 1.0 % MWCNT.**Figura C - 7.** Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CES 0.0 % MWCNT.**Figura C - 8.** Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CES 0.5 % MWCNT.**Figura C - 9.** Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen CES 1.0 % MWCNT.**Figura C - 10.** Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEM 0.0 % MWCNT.

Figura C - 11. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEM 0.5 % MWCNT.

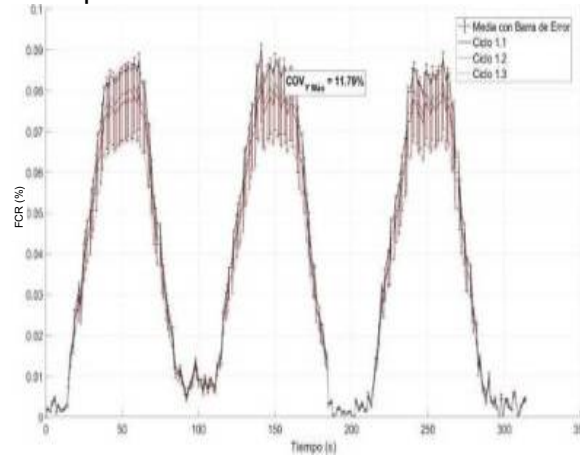


Figura C - 12. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEM 1.0 % MWCNT.

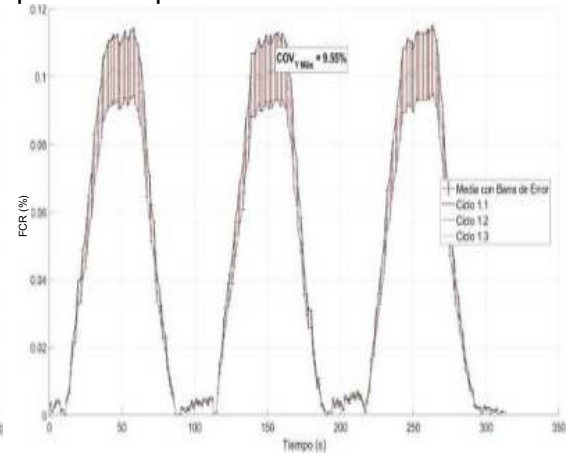


Figura C - 13. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEL 0.0 % MWCNT.

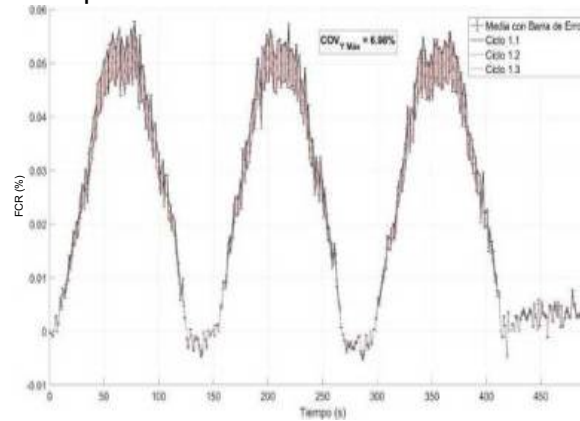


Figura C - 14. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEL 0.5 % MWCNT.

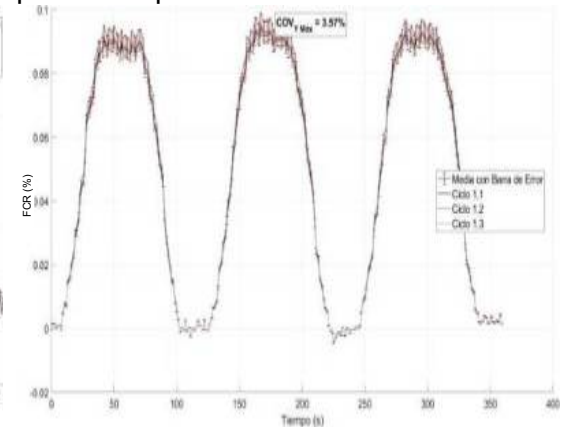


Figura C - 15. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BEL 1.0 % MWCNT.

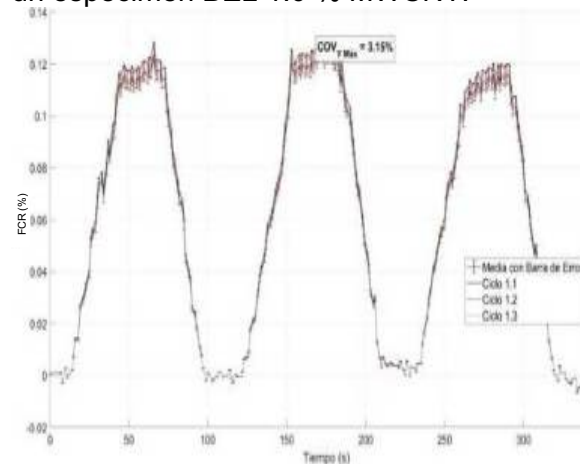


Figura C - 16. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BES 0.0 % MWCNT.

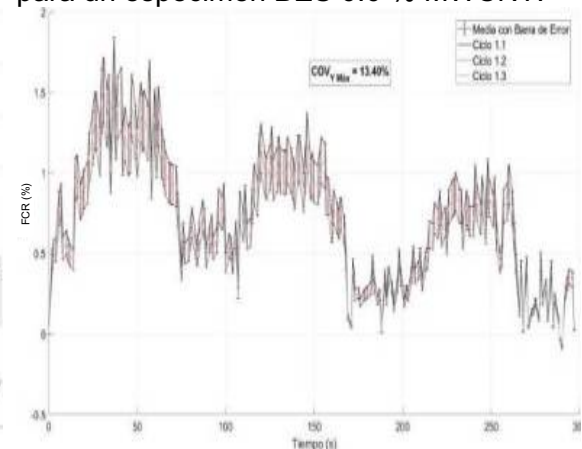
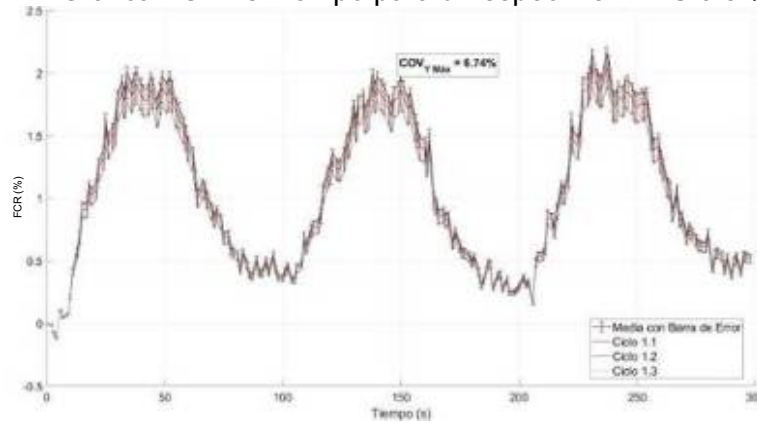


Figura C - 17. Gráfica FCR vs Tiempo para un espécimen BES 0.5 % MWCNT.

Gráficas de valores FCR promedios por espécimen vs tiempo bajo ciclos de carga. Los especímenes en forma de cubos se llevaron a ciclos de carga de 20000 N y los especímenes en forma de briquetas hasta 200 N.

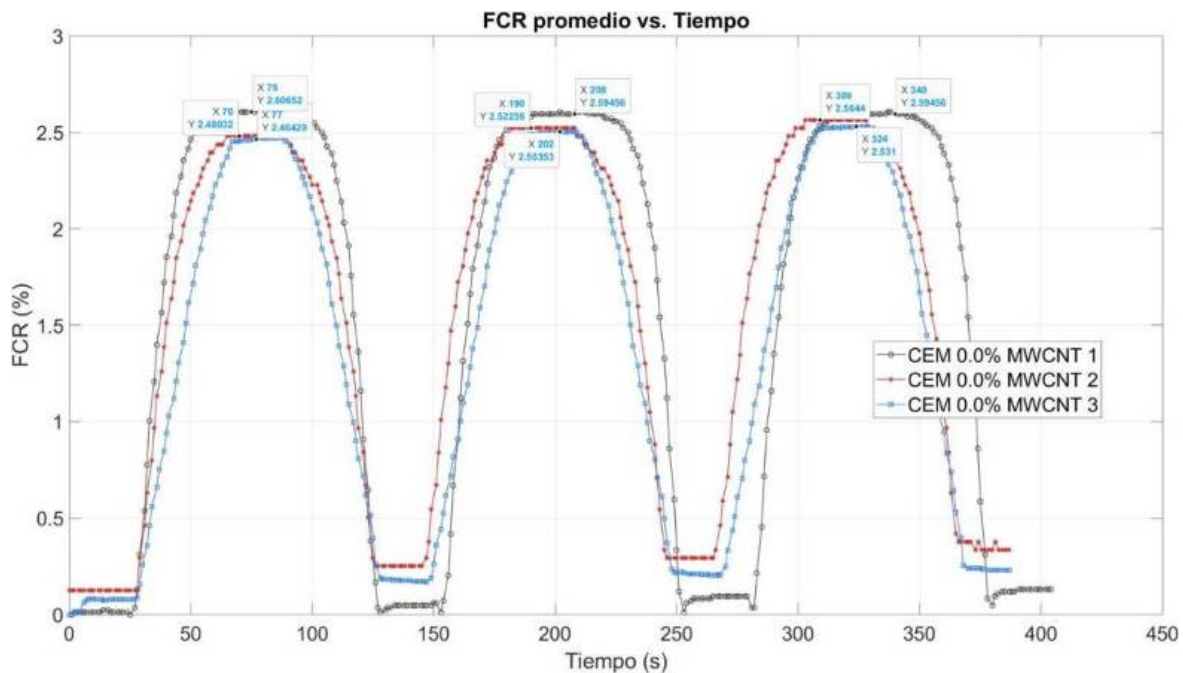
Figura C - 18. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.0 % MWCNT y electrodo de malla de acero.

Figura C - 19. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de malla de acero.

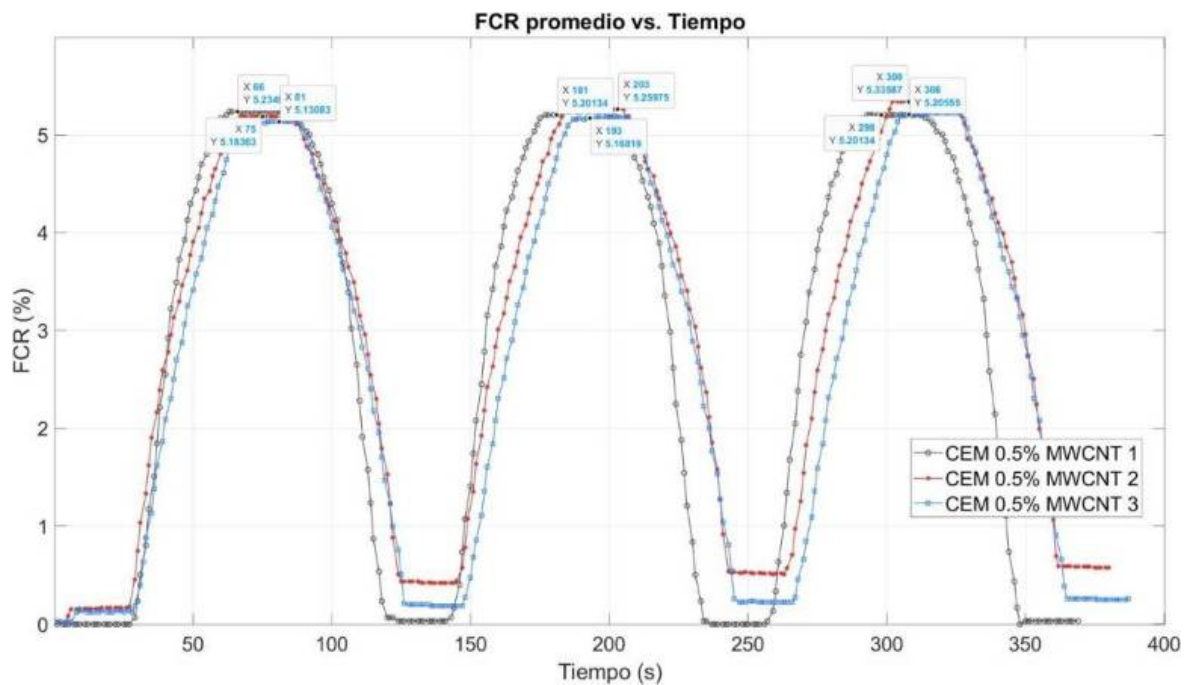


Figura C - 20. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 1.0 % MWCNT y electrodo de malla de acero.

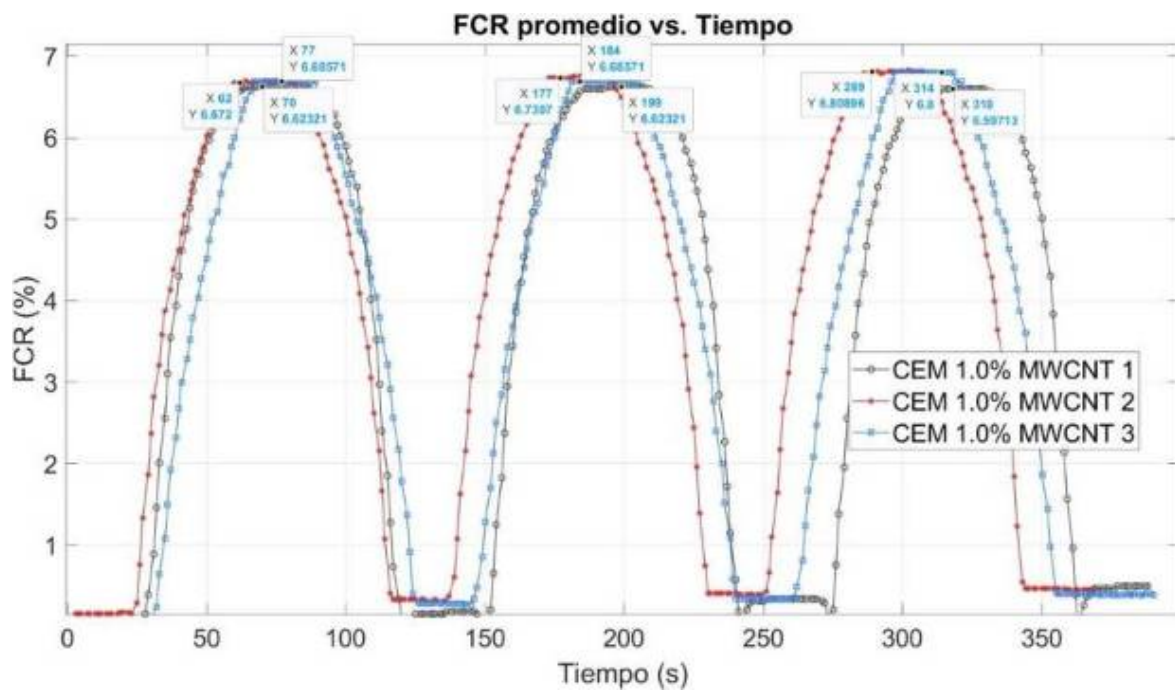


Figura C - 21. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.0 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.

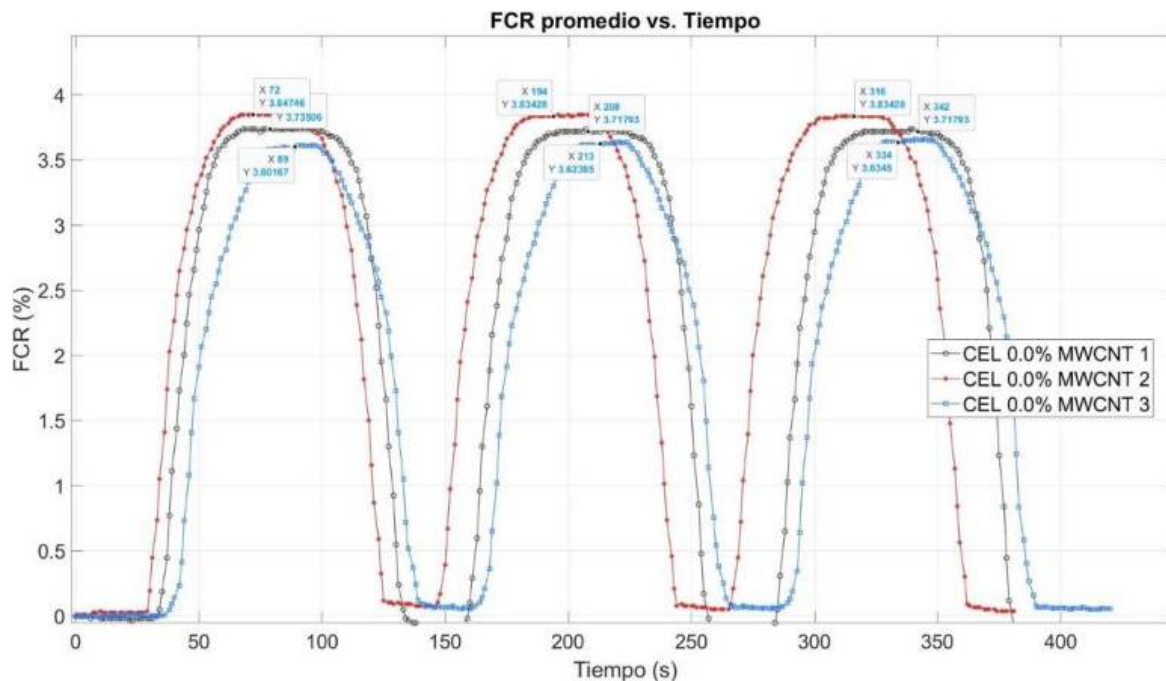


Figura C - 22. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.

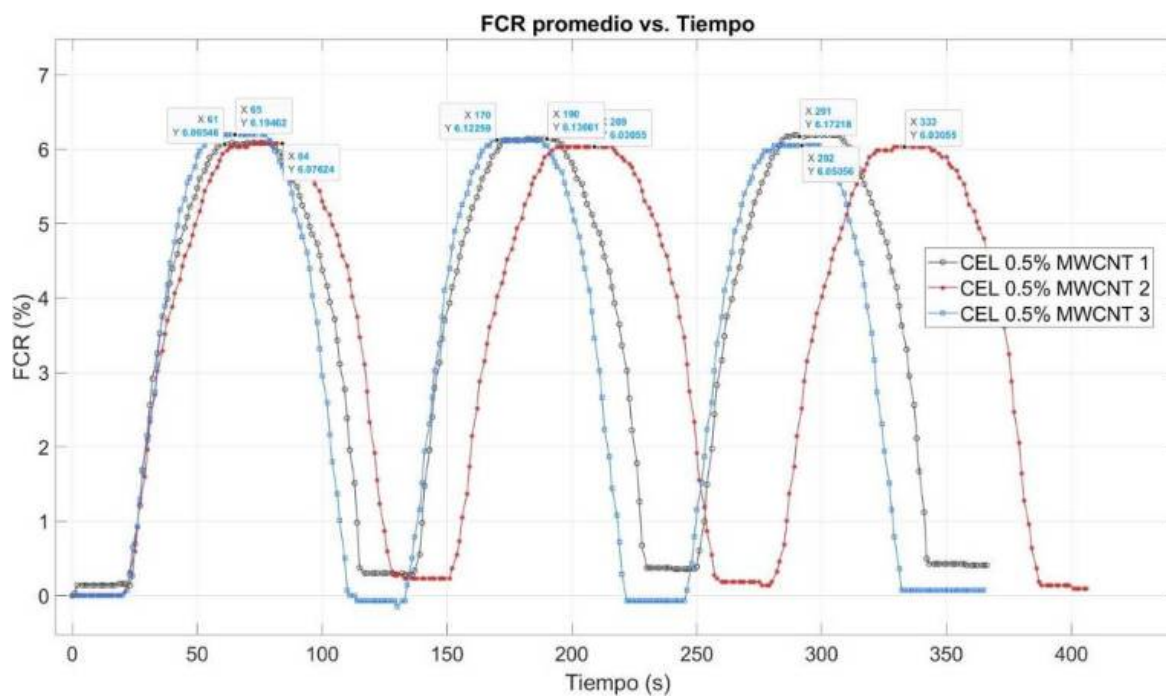


Figura C - 23. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes cúbicos con adición de 1.0 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.

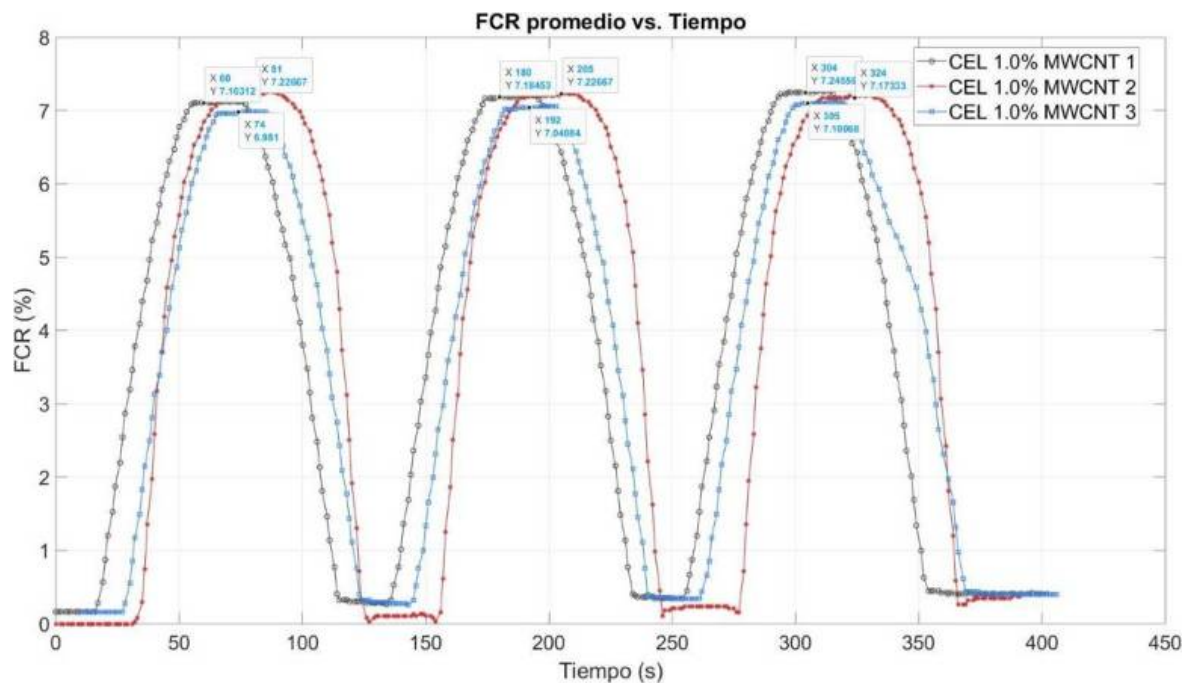


Figura C - 24. Figura C - 25. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes en forma de briquetas con adición de 0.0 % MWCNT y electrodo de malla de acero.

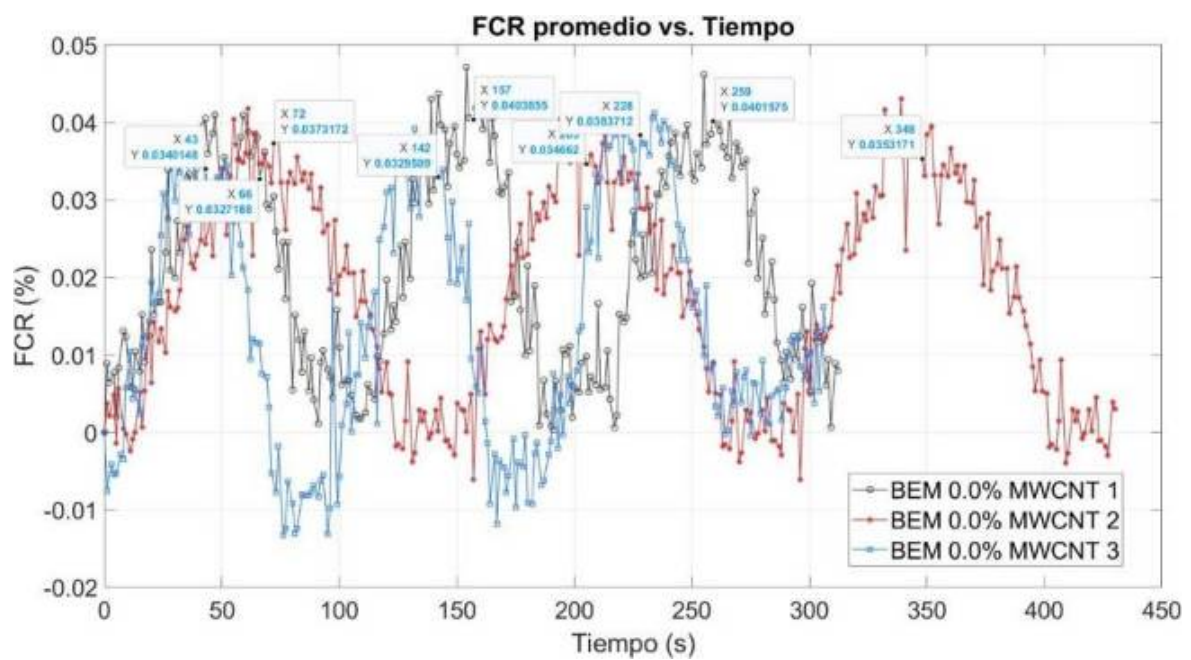


Figura C - 26. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes en forma de briquetas con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de malla de acero.

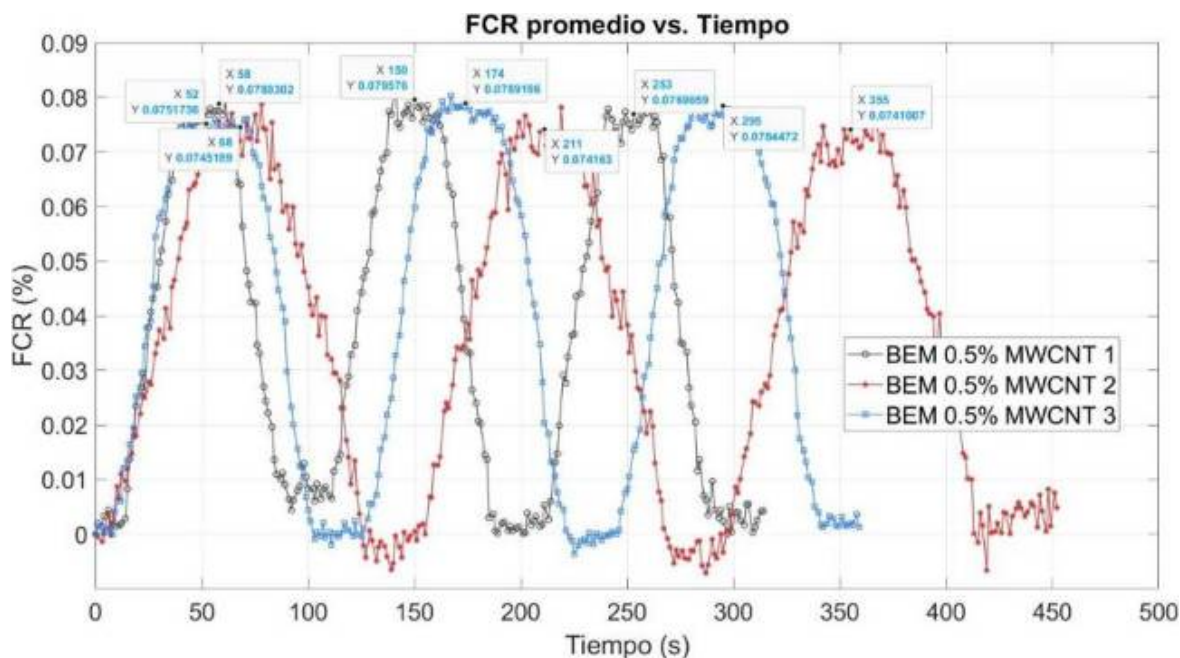


Figura C - 27. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes en forma de briquetas con adición de 1.0 % MWCNT y electrodo de malla de acero.

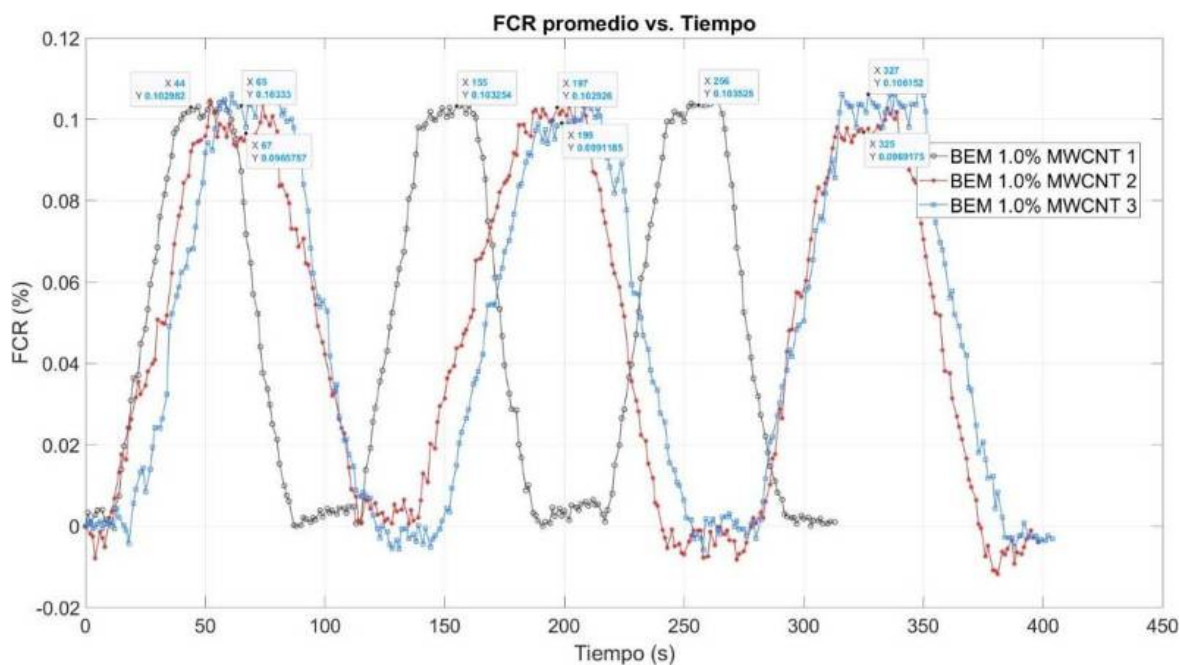


Figura C - 28. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes en forma de briquetas con adición de 0.0 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.

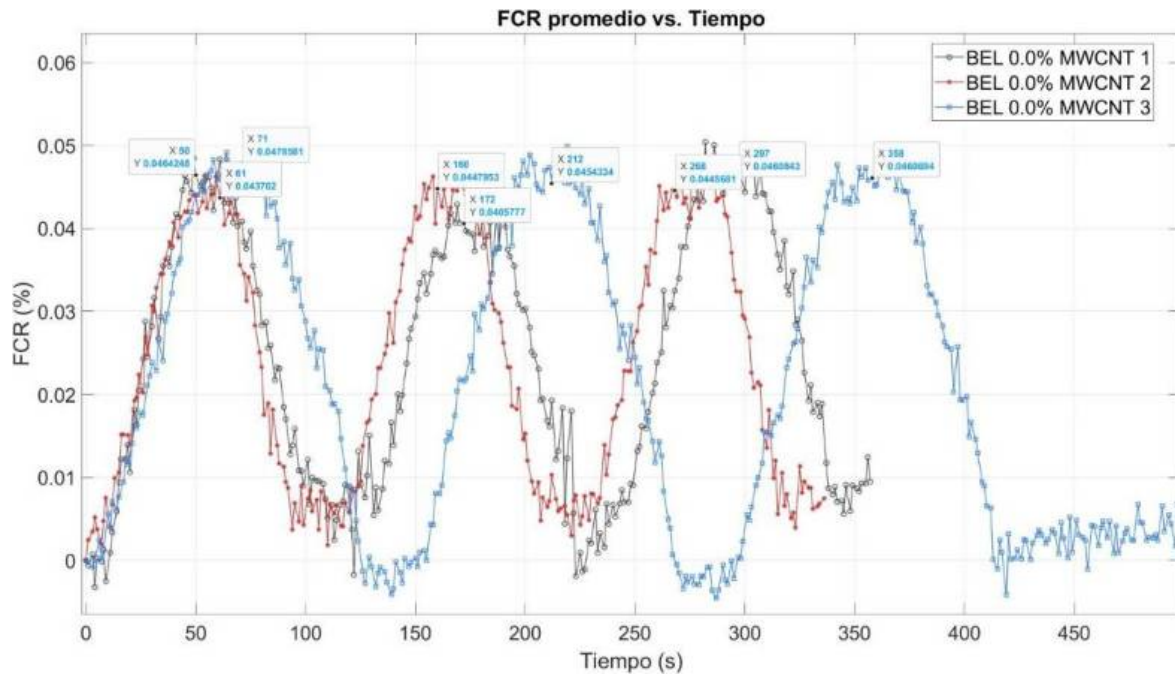


Figura C - 29. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes en forma de briquetas con adición de 0.5 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.

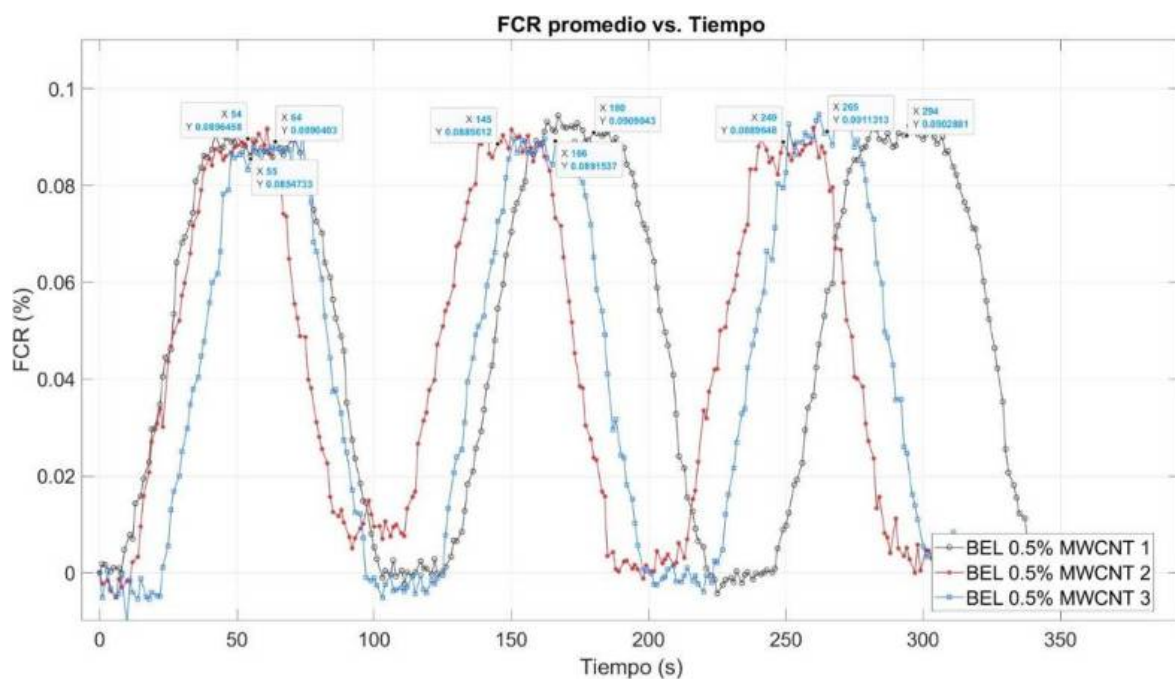
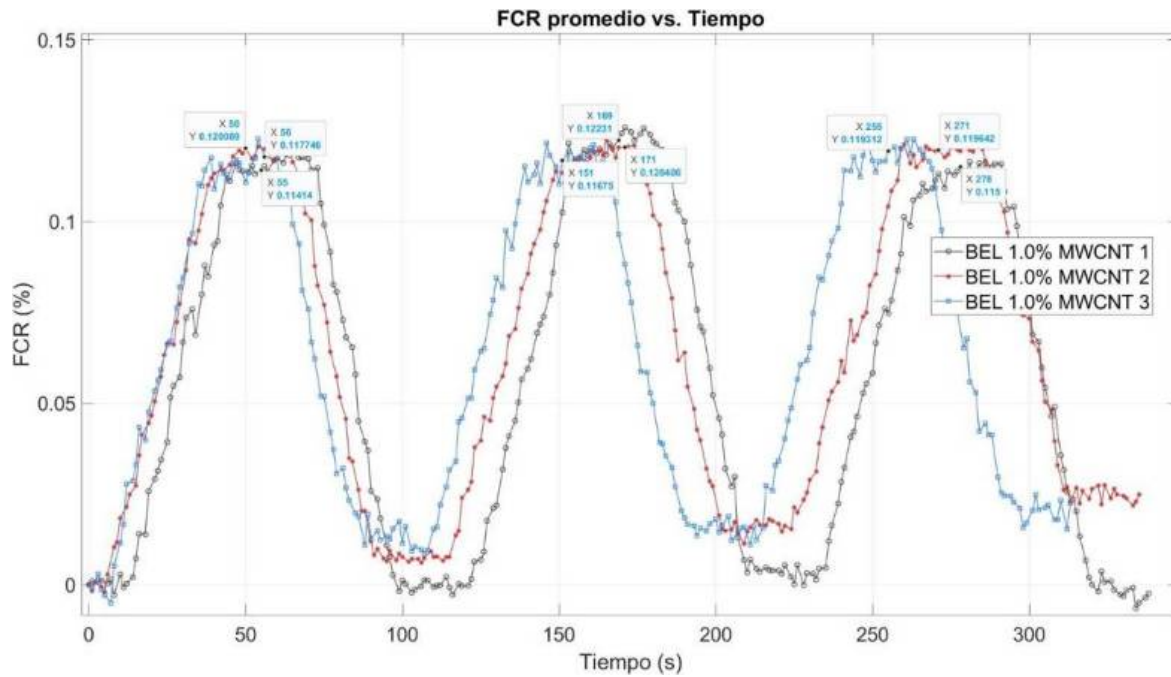


Figura C - 30. Valores de FCR promedios bajo ciclos de carga en los tres tipos de especímenes en forma de briquetas con adición de 1.0 % MWCNT y electrodo de lámina de acero.



Anexo D

Diseño de la mezcla de mortero patrón

El diseño de una mezcla de mortero constituye un procedimiento sistemático, partiendo de requisitos de desempeño (principalmente resistencia a compresión y trabajabilidad). Mediante el diseño se define las proporciones de cemento, agua y agregados finos. Una vez fijados estos parámetros deseados, se caracterizan los materiales disponibles (densidad, módulo de finura, absorción y tipo de cemento), de modo que la dosificación resultante refleje tanto las exigencias planteadas al inicio. Con el apoyo de correlaciones empíricas, ábacos y relaciones consolidadas en la literatura o en la experiencia previa. Se calculan las relaciones agua-cemento y arena-cemento que garantizan el cumplimiento de los criterios de diseño. En este estudio, la metodología de diseño toma fuentes bibliográficas especializadas.

El proceso de diseño de la mezcla se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita en el libro *Concretos y Morteros Hidráulicos* de Sánchez & Martínez (2025), la cual establece un procedimiento válido y sistemático mediante una serie de pasos orientados a definir las proporciones del mortero. Esta metodología incluye el uso de ábacos que relacionan variables como el módulo de finura de la arena, la resistencia requerida y la relación agua-cemento, permitiendo así una dosificación coherente y fundamentada. En este estudio, el diseño se realizó para la mezcla patrón, con el objetivo de alcanzar una resistencia aproximada de 40 MPa (alrededor de 400 kg/cm²). Esta resistencia fue seleccionada considerando que los especímenes elaborados podrían funcionar como sensores embebidos en estructuras de concreto, por lo que se requiere que el mortero tenga una resistencia mayor a la del concreto circundante. Dado que en edificaciones convencionales se emplean concretos de alrededor de 30 MPa, se optó por diseñar un mortero con al menos 10 MPa adicionales, garantizando así su integridad estructural y funcional dentro del sistema.

A continuación, se presenta la **Figura D - 1** que resume de manera clara y estructurada, la serie de pasos necesarios para realizar el diseño de morteros de cemento hidráulico correspondiente a la metodología planteada por Sánchez & Martínez (2025). Este esquema facilita la comprensión del proceso general, desde la definición inicial de

parámetros como resistencia y fluidez, hasta la determinación final de las proporciones de los materiales.

Figura D - 1. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de mezcla.



D.1 Determinación del tipo de arena

Se empleó una arena normalizada natural de sílice que cumple con los requisitos de la NTC 3937; sus granos exhiben una forma predominantemente redondeada y superficie lisa. La descripción de este material se presenta en el numeral 3.2.2.

Figura D - 2. Arena 20-30 vista desde el microscopio.



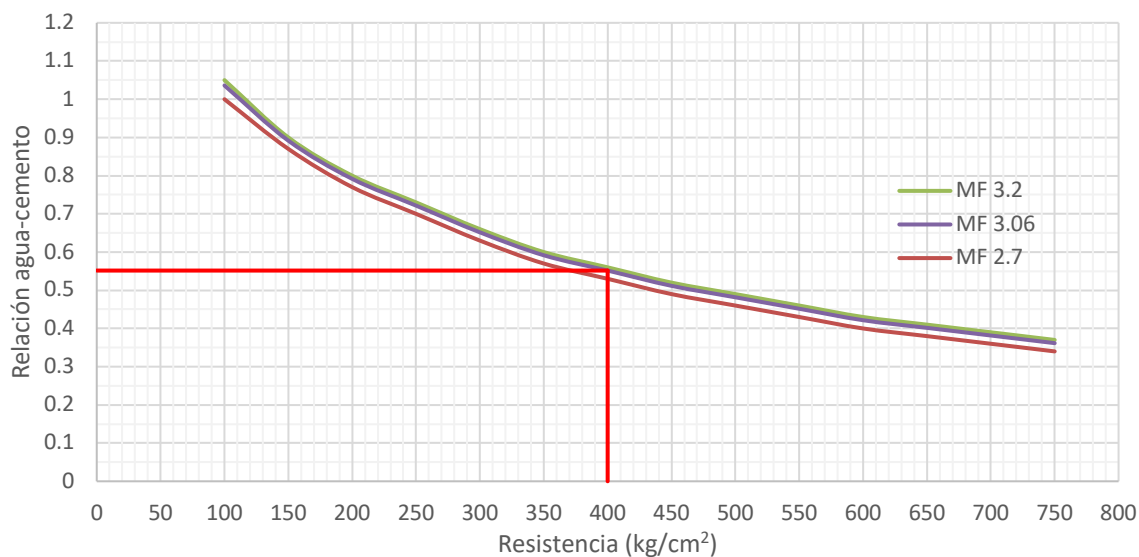
D.2 Determinación de la relación agua material cementante

Como se mencionó anteriormente, el diseño de la mezcla se basó en el procedimiento descrito por Sánchez & Martínez (2025), el cual ofrece ábacos que vinculan la resistencia a compresión y la relación agua-cemento con el módulo de finura de la arena. El análisis granulométrico arrojó un módulo de finura (MF) de 3.06 (ver **Tabla 3-13**); dado que los ábacos solo presentan curvas para MF 2.7 y MF 3.2, se realizó una interpolación lineal con el fin de obtener una curva entre los anteriores módulos de finura, para así determinar los valores correspondientes a la arena seleccionada. Se definió una resistencia esperada de 400 kg/cm^2 ($\approx 40 \text{ MPa}$) y un consistencia plástica. Cabe señalar que dichos ábacos fueron desarrollados para morteros con cemento Portland Tipo I; sin embargo, el cemento empleado es un cemento tipo ART, conforme a la NTC 121, pero al realizar los ensayos de compresión se alcanzó la resistencia objetivo.

Para efectuar la interpolación con la precisión requerida, las curvas impresas en el libro de Sánchez & Martínez (2025) correspondientes a módulos de finura 2.7 y 3.2 se digitalizaron en una hoja de cálculo (**Figura D - 3**). Allí se registraron cuidadosamente los puntos característicos de cada curva y se reconstruyeron gráficamente, lo que permitió verificar la

congruencia con la fuente original y, al mismo tiempo, disponer de un soporte numérico. Sobre esta base digital se generó la curva interpolada para un módulo de finura de 3.06, empleando técnicas de interpolación lineal y validando gráficamente la continuidad entre las trayectorias. Este procedimiento garantiza mayor claridad, reproducibilidad y exactitud en la determinación de la relación agua-cemento y la resistencia asociada, evitando la subjetividad inherente a la lectura directa de los ábacos impresos.

Figura D - 3. Curva interpolada para módulo de finura 3.06, construida mediante digitalización y procesamiento numérico a partir de Sánchez & Martínez (2025).



Con los puntos digitalizados, se aplicó una interpolación numérica para determinar la relación agua-cemento correspondiente a la resistencia objetivo de 400 kg/cm²; el procedimiento arrojó un valor de 0.552.

D.3 Selección de la consistencia

De acuerdo con Sánchez & Martínez (2025), la consistencia del mortero se clasifica como seca, plástica o fluida en función del porcentaje de flujo obtenido en el ensayo de mesa de flujo. La **Tabla D-1** detalla los rangos de flujo que corresponden a cada categoría. En el presente estudio se registró un flujo de 108.88 % (ver **Tabla 3-22**), valor que ubica la mezcla dentro del rango de consistencia plástica.

Tabla D-2. Adaptación clasificación de consistencia (Sánchez & Martínez, 2025).

Consistencia	% de flujo
Seca	90 % $\pm$ 5 %
plástica	110 % $\pm$ 5 %
Fluida	130 % $\pm$ 5 %

Una consistencia plástica garantiza la adecuada trabajabilidad para el moldeo de los especímenes. Esta elección permite un fácil manejo durante la preparación, colocación y compactación del mortero, evitando problemas asociados con segregación o excusación excesiva.

D.4 Determinación de los factores que influyen en el contenido de agua

El procedimiento más preciso es por prueba y error, aunque es lento. También pueden desarrollarse ecuaciones matemáticas que relacionen consistencia y composición del mortero. Sánchez & Martínez (2025) muestran que el requerimiento de agua/cementante para una consistencia dada puede expresarse como en la ecuación (D.1).

$$(A/MC) = K * e^{bn} \quad (D.1)$$

Donde:

A/MC : relación agua/material cementante.

n : proporción de arena por unidad de cementante (en peso).

b : factor que depende de la consistencia, módulo de finura, forma y textura de la arena.

K : relación agua/cementante de una pasta de cemento para la fluidez deseada (sin arena).

e : base de logaritmos naturales (≈ 2.7183).

Sánchez & Martínez (2025) presentan la **Tabla D-2** que permite obtener el coeficiente b en función del módulo de finura de la arena. Cuando el valor exacto de dicho módulo no aparece de forma explícita, los autores recomiendan aplicar una interpolación lineal entre los dos registros tabulados más próximos; de este modo, se calcula un valor de b ajustado al módulo de finura real de la arena empleada, garantizando la coherencia del diseño de la mezcla.

Tabla D-2. Valores de b para distintas consistencias y módulos de finura de la arena adaptada de Sánchez & Martínez (2025), con la interpolación para el módulo de finura 3.06.

Consistencia	Módulo de finura	Arena de granos redondos y lisos	Arena de granos angulares y rugosos
Seca (90 % $\pm$ 5 %)	1.7	0.3293	0.3215
	2.2	0.311	0.3028
	2.7	0.2772	0.293
	3.2	0.2394	0.2494
Plástica (110 % $\pm$ 5 %)	1.7	0.3242	0.3238
	2.2	0.3033	0.2947
	2.7	0.2734	0.2879
	3.06	0.2470	0.2590
	3.2	0.2368	0.2477
Fluida (130 % $\pm$ 5 %)	1.7	0.3172	0.3216
	2.2	0.2927	0.3003
	2.7	0.2687	0.2949
	3.2	0.234	0.2629

El valor de K se calculó siguiendo la norma NTC 110 (equivalente a la ASTM C187), la cual establece el procedimiento para determinar la consistencia normal de una pasta de cemento mediante el aparato de Vicat. Según la norma, se alcanza esta consistencia cuando el émbolo penetra $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ en la superficie fresca 30 s después de ser liberado. En las pruebas realizadas, dicha condición se logró con una relación agua-cemento de 0.28, valor que, por tanto, se adoptó como K en los cálculos.

D.5 Determinación de la proporción 1: n

Una vez conocidos los valores de A/C , K y b , se procede a calcular n mediante la ecuación (D.2):

$$n = \frac{\ln(a/c) - \ln(K)}{b} \quad (\text{D.2})$$

Donde:

n : proporción de arena por unidad de cementante (en peso).

a/c: relación agua/cemento.

b: factor que depende de la consistencia, módulo de finura, forma y textura de la arena.

K: relación agua/cementante de una pasta de cemento para la fluidez deseada (sin arena).

$$n = \frac{\ln(0.552) - \ln(0.28)}{0.2470} = 2.74$$

D.6 Cálculo del contenido de cementante

La cantidad de cementante por unidad de volumen se obtiene a partir de los volúmenes que conforman 1 000 L (1 m³) de mortero (ecuación D.3).

$$V_c + V_a + A + V_v = 1000 \text{ L} \quad (\text{D.3})$$

Donde:

V_c: volumen de cementante

V_a: volumen de arena

A: peso o volumen de agua

V_v: volumen de aire aproximadamente 16.36 % del volumen total

El método de ensayo para determinar el contenido de aire en un mortero de cemento hidráulico consiste en preparar una mezcla con proporciones conocidas de cemento, arena y agua, la cual se compacta en un recipiente de volumen conocido y se pesa cuidadosamente. A partir de la densidad de cada uno de los materiales que componen la mezcla, se calcula el porcentaje de aire presente comparando el volumen ocupado por la masa sólida real con el volumen que ocuparía si no hubiera vacíos. Este procedimiento permite conocer la cantidad de vacíos de aire atrapados, el resultado de realizar este ensayo para un volumen conocido de 400 mL fue de 16.36 %. En revisión bibliográfica se han encontrado que cementos adicionados pueden llegar este tipo de valores de contenido de aire (Miera, 2021; Nazari et al., 2020). También hay que mencionar que la arena que se utilizó es una arena que tiene una gradación específica donde su mayor porcentaje se retiene en un tamiz, por lo cual no hay una gran distribución de tamaños, esto fomenta a que se presente una mayor cantidad de aire atrapado.

El volumen se puede expresar en términos de masa y densidad, tal como se refleja en la ecuación (D.4)

$$Volumen = \frac{masa}{Densidad} \quad (D.4)$$

La ecuación (D.3) se puede reescribir entonces como:

$$\frac{C}{G_c} + \frac{a}{G_a} + A = 1000 - 163.6 \quad (D.5)$$

Donde:

C: cemento, en kg

a: arena, en kg

A: agua, en kg o L

G_c: densidad del cemento

G_a: densidad SSS de la arena

El valor de la densidad del cemento se determinó siguiendo la norma NTC 221, el cual se obtuvo un valor de 3.02 kg/m³. La densidad de la arena se determinó en el numeral 3.2.2, con un valor de 2.59 kg/m³.

De la ecuación (D.5) se puede despejar el cemento (C), esto teniendo en cuenta que la arena se puede expresar como $a=nC$ y el agua esta expresada como $A=C*(A/C)$, con lo anterior presentado la cantidad de cemento por metro cubico se puede expresar en la ecuación (D.6)

$$C = \frac{970}{\frac{1}{G_c} + \frac{n}{G_a} + \frac{A}{C}} \quad (D.6)$$

Remplazando los valores en la ecuación (D.6), se obtiene la cantidad de cemento por metro cubico:

$$C = \frac{836.7}{\frac{1}{3.02} + \frac{2.74}{2.59} + 0.552} = 430.61 \text{ kg/m}^3$$

D.7 Determinación del contenido de agua

Conocido la relación agua/material cementante del numeral D.2, y el contenido de cementante del paso 6. El contenido de agua es:

$$A = \frac{A}{C} \times C = 0.552 \times 430.6 = 237.5 \text{ kg/m}^3$$

D.8 Determinación del contenido de arena

Conocido el valor n del numeral D.5 y el valor del contenido de cemento del numeral D.6, el contenido de arena es:

$$\text{Arena} = n \times C = 2.74 \times 430.6 = 1181.8 \text{ kg/m}^3$$

Se realiza una verificación rápida para determinar el volumen total:

Tabla D-3. Valores de los distintos materiales del mortero para un volumen de 1000 L (1 m³).

Material	Kg/m ³	Volumen (L)
Cemento	430.6	142.6
Agua	237.5	237.5
Arena	1181.8	456.3
Aire		163.6
Total		1000

D.9 Ajustes por humedad de arena

Dado que la arena presenta una absorción de 0.64 % y su humedad actual es apenas 0.06 % (numeral 3.2.2), llegará a condición saturada-superficialmente-seca (SSS) solo después de absorber la diferencia, es decir 0.64 % – 0.06 % = 0.58 % de su masa seca. Para que no se vea afectada el agua de mezclado de mortero, se deberá añadir ese volumen adicional de agua: 0.58 g por cada 100 g de arena en condición normal. Incluyendo este ajuste la mezcla mantendrá la relación agua-cemento prevista y evitará pérdida de trabajabilidad.

En resumen, el procedimiento de dosificación se llevó hasta un volumen de referencia de 1000 L (1 m³), del cual se derivaron las masas correspondientes de agua, arena y cemento (**Tabla D-4**). A partir de estas proporciones se fijó un lote de laboratorio con 300 g de cemento, cantidad que produce suficiente mortero para elaborar los tres especímenes requeridos y disponer de un remanente de seguridad ante cualquier eventualidad (**Tabla D-5**).

Tabla D-4. Masas de los distintos materiales del mortero para un volumen de 1 m³.

Material	Masa kg
Cemento	497.0
Agua (con la humedad ajustada)	244.4
Arena	1181.8
Total	1856.8

Tabla D-5. Masas de los distintos materiales del mortero con masa constante de cemento de 300 g.

Material	Masa kg
Cemento	300.0
Arena	823.4
Agua (con la humedad ajustada)	170.3
Total	1293.4

Se utilizaron 825 g de arena y 171 g de agua en los ensayos, aunque estas cantidades presentan una ligera desviación respecto a los valores originales del diseño de mezcla (823.4 g de arena y 170.3 g de agua). Este pequeño ajuste se debió a precisiones propias durante la dosificación manual en el laboratorio. Sin embargo, es importante resaltar que estas cantidades proporcionaron resultados ideales tanto en los ensayos de compresión como en los de fluidez, alcanzando plenamente las características esperadas de resistencia y trabajabilidad establecidas en el diseño inicial. Por esta razón, se consideró apropiado mantener estos valores ligeramente ajustados para garantizar la reproducibilidad y efectividad de las pruebas futuras.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión realizados sobre los cubos, según el procedimiento establecido en la norma NTC 220, arrojaron un promedio de resistencia de 40.2 MPa. Este valor supera en aproximadamente 0.2 MPa la resistencia inicialmente definida en el diseño, confirmando que la mezcla cumple adecuadamente con los requerimientos iniciales establecidos (resistencia y fluidez). Este diseño corresponde a la muestra patrón de mortero sin adición de nanotubos. Posteriormente, para las mezclas con adición, se mantuvieron fijas las cantidades de los materiales (cemento, arena y agua) y se concentró la investigación en la incorporación de

MWCNT y su proceso de dispersión. Esto permitió definir las proporciones definitivas de los materiales base, facilitando la identificación del porcentaje óptimo de adición de MWCNT respecto a la masa del cemento, que mejore las propiedades eléctricas del mortero minimizando el impacto sobre su resistencia mecánica y fluidez.

Para evitar la introducción de variables adicionales que pudieran afectar la interpretación de los resultados, se decidió no emplear ningún tipo de aditivo en la mezcla de mortero. Esta elección permitió mantener el control sobre los factores principales (cemento, arena y agua) asegurando que las propiedades evaluadas, como la resistencia y la fluidez, dependieran exclusivamente de las proporciones de estos materiales y de las condiciones de mezcla establecidas. De esta forma, se garantiza que cualquier variación observada en los ensayos se atribuya únicamente a los parámetros definidos en el diseño y no a efectos externos derivados del uso de aditivos.