



Estudio de la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas en materiales a base de cemento con la adición de partículas de carbono

Llerena Pozo, Mateo Alejandro y Reina Recalde, Pablo Sebastian

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando PhD.

28 de marzo del 2022



FINAL TESIS_CORREGIDO_REINA_LLERENA_SIN_ANEXOS.pdf

Scanned on: 15:20 March 4, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	5
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	7
Omitted Words	0



Escanea este código QR para:
XAVIER ROLANDO
SANCHEZ SANCHEZ



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular, "Estudio de la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas en materiales a base de cemento con la adición de partículas de carbono" fue realizado por los señores **Llerena Pozo, Mateo Alejandro** y **Reina Recalde, Pablo Sebastian**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de marzo del 2022

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando PhD.

C. C.: 1712575826



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, Llerena Pozo, Mateo Alejandro y Reina Recalde, Pablo Sebastian, con cédulas de ciudadanía n° 1722303953 y 1723664395, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **"Estudio de la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas en materiales a base de cemento con la adición de partículas de carbono"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 29 de marzo del 2022

Llerena Pozo, Mateo Alejandro

C.C.: 1722303953

Reina Recalde, Pablo Sebastian

C.C.: 1723664395



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros Llerena Pozo, Mateo Alejandro y Reina Recalde, Pablo Sebastian, con cédulas de ciudadanía n°1722303953 y 1723664395, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: “Estudio de la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas en materiales a base de cemento con la adición de partículas de carbono” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 29 de marzo del 2022

Llerena Pozo, Mateo Alejandro

C.C.: 1722303953

Reina Recalde, Pablo Sebastian

C.C.: 1723664395

Dedicatoria

A mis amados padres, quienes siempre han sido mi fuente de apoyo y motivación. Por ellos, todo este sacrificio ha valido la pena. Gracias por tanto.

Mateo Llerena

A mis padres y hermanos, que constantemente han estado apoyándome en cada una de las metas que me he planteado, y han sido el pilar en el cual siempre me he podido apoyar.

Pablo Reina

Agradecimiento

A Dios, por darme la capacidad, entendimiento e inteligencia para culminar mis estudios universitarios y darme miles de bendiciones en el proceso.

A mis padres, por todo su apoyo durante mis estudios y por el amor que me han dado siempre en todo lo que me he propuesto en mi vida.

A Pablo, por ser el mejor compañero de tesis que pude tener. Porque la vida nos puso en el mismo camino y nos alineó en todo sentido; no solo en ámbito académico, sino también en el ámbito social y generacional. Nuestro sentido de responsabilidad y determinación han hecho que el desarrollo de este proyecto vea la luz y nos resuelva como ingenieros mecánicos.

Al Ingeniero Mario Echeverría, por ilustrarnos sobre el fenómeno eléctrico que ocurrió en la experimentación y cuya ayuda fue de gran importancia para terminar de comprender lo ocurrido en esta investigación.

Al Ingeniero Hernán Lara, por su valiosa ayuda en el desarrollo de la metodología de medición de la caída de voltaje.

Al Ingeniero Nicolás Páez y al Ingeniero Luis Jiménez, por su calidez y valiosa ayuda en toda la experimentación y ensayos llevados a cabo en el laboratorio de reología.

Mateo Llerena

Agradecimiento

A Dios, por siempre bendecirme y darme las herramientas necesarias para poder superar cada uno de los retos que me he propuesto.

A mi padre, que me ha enseñado que la disciplina, constancia y perseverancia son las armas más fuertes que un hombre puede tener para alcanzar cada uno de sus objetivos. Así mismo, le agradezco por siempre brindarme su apoyo en cada una de mis metas, y haberme dado un grandioso ejemplo de cómo tiene que ser un excelente hombre y padre.

A mi amada madre, que siempre ha estado para mí en cualquier ocasión y me ha sabido formar con mucha disciplina y amor.

A mis hermanos, por ser mis primeros amigos y haberme dado tantas alegrías.

A mi compañero de tesis Mateo, por haber hecho una excelente labor en la realización de este trabajo y ser como un hermano para mí.

A los ingenieros Mario Echeverría, Nicolás Páez, Xavier Sánchez, Hernán Lara y Luís Jiménez por haber aportado su conocimiento y tiempo para poder desarrollar este trabajo.

A mis amigos Paula, Nicole, Andrés y David por brindarme su incondicional amistad y ser partícipes de muchos de mis mejores recuerdos.

Finalmente, a mis amigos universitarios; Ronnie, por ser mi colega y haberme brindado su apoyo desde primer semestre; María José, que ha estado en momentos muy bellos como también difíciles para mí y siempre ha sabido sacarme una sonrisa.

Pablo Reina

Índice

Reporte Análisis Copyleaks	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria.....	5
Agradecimiento	7
Resumen.....	15
Abstract	16
Capítulo I	17
Generalidades.....	17
Introducción	17
Justificación e Importancia.....	18
Antecedentes	18
Alcance	22
Objetivos	22
<i>Objetivo General</i>	22
<i>Objetivos Específicos</i>	22
Capítulo II.....	23
Marco Teórico.....	23
Características de las Materias Primas.....	23
<i>Cemento</i>	23
<i>Hormigón</i>	29
<i>Carbonos Agregados</i>	30
<i>Pastas de Cemento</i>	34
<i>Morteros</i>	35
<i>Mortero Equivalente</i>	36
<i>Proporción Agua-Cemento</i>	36
Reología de Materiales Cementosos	37
Generalidades de los Medios Porosos	39
Tortuosidad	40
<i>Aspectos que Afectan a la Tortuosidad</i>	42

<i>Relación Entre la Tortuosidad, Porosidad y Dirección del Flujo</i>	42
Teoría de Percolación	44
<i>Percolación y Conductividad</i>	47
Capítulo III	48
Metodología	48
Materiales	48
<i>Cemento</i>	48
<i>Carbonos</i>	49
<i>Moldes</i>	49
Equipos.....	50
<i>Balanza Electrónica</i>	50
<i>Horno de Convección</i>	51
<i>Mezcladora Morteros</i>	51
<i>Máquina de Compresión Simple</i>	52
<i>Reómetro</i>	52
Método de Investigación	54
<i>Fase Experimental</i>	56
<i>Fase Eléctrica</i>	62
<i>Fase Mecánica</i>	65
<i>Fase Reológica</i>	70
Capítulo IV.....	73
Análisis de Resultados.....	73
Resultados Eléctricos.....	73
<i>Comportamiento de la Caída de Voltaje</i>	73
<i>Comparación Resultados Ensayo Eléctrico Mejores Tipos de Carbonos</i>	83
<i>Comportamiento de la Resistencia Eléctrica</i>	84
<i>Comportamiento de la Conductividad Eléctrica</i>	86
Resultados Mecánicos	88
<i>Resultados Ensayo de Compresión Pasta de Cemento</i>	89
<i>Resultados Ensayo de Compresión Carbón Activado a una Dosificación del 10 %</i>	90

Resultados Ensayo de Compresión Grafito + Cu 50% a una Dosificación del 10 %	91
Resultados Ensayo de Compresión Grafito + Cu 50% a una Dosificación del 15 %	92
Resultados Reológicos	95
Análisis de Costos	101
Capítulo V	107
Conclusiones y Recomendaciones	107
Conclusiones	107
Recomendaciones	108
Referencias Bibliográficas	110
Anexos	112

Índice de Tablas

Tabla 1 Tipos de cemento según su uso	23
Tabla 2 Compuestos principales del cemento	24
Tabla 3 Resistividad de varios materiales	33
Tabla 4 Resistencia de morteros de cemento	35
Tabla 5 Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia del cemento.....	37
Tabla 6 Tipos de carbono utilizados	49
Tabla 7 Características técnicas de reómetro Discovery Hybrid DHR – 2	52
Tabla 8 Porcentaje de H ₂ O del ambiente absorbido por el carbono	58
Tabla 9 Porcentaje de H ₂ O absorbido por el carbono hasta la saturación	59
Tabla 10 Cantidades empleadas en la mezcla para ensayos eléctricos	60
Tabla 11 Tolerancia admisible para la edad de ensayo de cubos	68
Tabla 12 Resumen coeficientes ecuación de ajuste para ensayos eléctricos	84
Tabla 13 Resumen coeficientes ecuación de ajuste para ensayos mecánicos.....	93
Tabla 14 Promedios resultados ensayos de compresión para mejores tipos de carbonos	94
Tabla 15 Resumen propiedades reológicas fluidos ensayados	97
Tabla 16 Remuneración a profesionales y estudiantes a cargo del proyecto	101
Tabla 17 Costo de materiales y equipos.....	102
Tabla 18 Costos indirectos proyecto.....	103
Tabla 19 Costo uso de laboratorios	104
Tabla 20 Total costos directos	105
Tabla 21 Total costos indirectos	105
Tabla 22 Total costos proyecto	106

Índice de Figuras

Figura 1 Conductividad eléctrica vs proporción de carbono agregado	19
Figura 2 Tortuosidad eléctrica vs contenido de carbono agregado.....	20
Figura 3 Imágenes microscópicas del compuesto carbón-cemento en diferentes ordenes	21
Figura 4 Resistencia vs Tiempo de fraguado de distintas clases de cemento.....	26
Figura 5 Resistencia a la compresión en distintos tiempos de fraguado	27
Figura 6 Cono de Abrahams.....	28
Figura 7 Efecto de la resistencia a la compresión y del tipo de agregado sobre la resistencia a la abrasión del hormigón.....	30
Figura 8 Diagrama de fases del carbono	31
Figura 9 Representación de la estructura de varios alótropos del carbono	32
Figura 10 Curvas de flujo y viscosidad para el modelo reológico de Bingham	39
Figura 11 Ejemplos de materiales porosos naturales vistos con un microscopio electrónico.....	40
Figura 12 Parámetros de la tortuosidad	41
Figura 13 Relación entre la porosidad y la tortuosidad para distintos tipos de medios porosos	43
Figura 14 Red bidimensional con ciertos espacios ocupados	45
Figura 15 Clusters formados en la red bidimensional.....	45
Figura 16 Cluster infinito.....	46
Figura 17 Requisitos mecánicos para cementos hidráulicos según norma INEN 2380 y campeón	48
Figura 18 Moldes empleado para ensayos mecánicos.....	50
Figura 19 Balanza electrónica Shimadzu modelo TX3202L.....	50
Figura 20 Horno de convección Fisher Isotemp serie 300, modelo 338 F	51
Figura 21 Mezcladora de morteros Matest S.p.A. modelo E094Y.....	51
Figura 22 Máquina de compresión simple Controls modelo C43G4	52
Figura 23 Reómetro Discovery Hybrid DHR-2	53
Figura 24 Vano y copa empleados en ensayo reológico	54
Figura 25 Flujograma metodología aplicada.....	55
Figura 26 Metodología de obtención de las partículas de carbono	57
Figura 27 Metodología de mezclado para ensayos eléctricos.....	61
Figura 28 Moldes y probetas para ensayos eléctricos.....	62
Figura 29 Esquema de conexión del circuito eléctrico.....	63
Figura 30 Sistema de adquisición y recolección de datos	65
Figura 31 Apisonado manual especímenes de ensayo	66
Figura 32 Molde y probetas para ensayos mecánicos	67
Figura 33 Probetas en reposo bajo agua mineral	68
Figura 34 Ensayo a compresión.....	69
Figura 35 Variables primera etapa modelado experimento en software Trios.....	70
Figura 36 Parámetros para la obtención de curva de flujo estacionario en software Trios	71
Figura 37 Ensayo reológico	72
Figura 38 Caída de voltaje vs Edad muestra para 14 días.....	74

Figura 39 Promedio de la caída de voltaje vs Edad para diferentes tipos de carbonos y pasta base.....	75
Figura 40 Caída de voltaje vs Edad muestra para 60 días.....	77
Figura 41 Promedio de la caída de voltaje vs Edad muestra para diferentes tipos de carbonos	78
Figura 42 Caída de voltaje vs Edad muestra carbón activado al 10%	80
Figura 43 Caída de voltaje vs Edad muestra grafito + CU 50% al 10%.....	81
Figura 44 Caída de voltaje vs Edad muestra grafito + CU 50% al 15%.....	82
Figura 45 Caída de voltaje vs Edad muestra grafito + CU 90% al 15%.....	83
Figura 46 Promedio de la Resistencia eléctrica vs Edad muestra para difentes tipos de carbonos	85
Figura 47 Promedio de la conductividad eléctrica vs Edad muestra para diferentes tipos de carbonos	86
Figura 48 Promedio de la conductividad eléctrica vs Porcentaje de carbono agregado	87
Figura 49 Resistencia promedio vs Edad muestra pasta base	89
Figura 50 Resistencia promedio vs Edad muestra carbón activado al 10%	90
Figura 51 Resistencia promedio vs Edad muestra grafito + CU 50% al 10%	91
Figura 52 Resistencia promedio vs Edad muestra grafito + CU 50% al 15%	92
Figura 53 Resistencia promedio vs Edad muestra para mejores tipos de carbonos	94
Figura 54 Ejemplo comportamiento no biyectivo a velocidades bajas de cizalla para un tipo de carbono ensayado	96
Figura 55 Esfuerzo cortante promedio vs Velocidad de cizalla mejores tipos de carbonos	98
Figura 56 Viscosidad promedio vs Velocidad de cizalla mejores tipos de carbonos	99

Resumen

En el presente trabajo se describen los resultados obtenidos del estudio de las propiedades eléctricas, mecánicas y reológicas de materiales a base de cemento con adición de partículas de varios tipos de carbono en el orden micro y así analizar el efecto que tuvieron los agregados en estas propiedades, con la finalidad de observar si se pueden aportar nuevas funcionalidades a este tipo de materiales y así desarrollar tecnologías eco amigables y emergentes.

Se realizaron ensayos eléctricos, para lo cual se estableció una metodología de medición que permita cuantificar la caída de voltaje en las muestras estudiadas y, adicionalmente, se seleccionó qué especímenes presentaron el mejor comportamiento en esta fase para continuar con ellos los siguientes ensayos. Así mismo, se efectuaron ensayos mecánicos en base a la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 488 para determinar la resistencia a la compresión. Por último, se llevaron a cabo ensayos reológicos para hallar las curvas de flujo estacionario y observar el comportamiento que presentaron estos materiales cuando se encuentran en la fase líquida.

Finalmente, se ejecutó un análisis comparativo de los resultados obtenidos y así establecer conclusiones en base a los objetivos planteados de tal manera que se pueda validar o no la consecución de los mismos.

PALABRAS CLAVE:

- **MATERIALES A BASE DE CEMENTO**
- **AGREGADOS DE CARBONO**
- **PROPIEDADES ELÉCTRICAS**
- **PROPIEDADES MECÁNICAS**
- **PROPIEDADES REOLÓGICAS**

Abstract

In the present work the results obtained from the study of the electrical, mechanical and rheological properties of cement-based materials with the addition of particles of various types of carbon in the micro order are described and thus analyze the effect that the aggregates had on these properties with the purpose of observing if new functionalities can be provided to this type of material and thus develop eco-friendly and emerging technologies.

Electrical tests were carried out, for which a measurement methodology was established that allows quantifying the voltage drop in the studied samples and, additionally, the specimens that presented the best behavior in this phase were selected to continue with them the following tests. Likewise, mechanical tests were carried out based on the Ecuadorian technical standard NTE INEN 488 to determine the compressive strength. Finally, rheological tests were carried out to find the steady flow curves and observe the behavior of these materials when they are in the liquid phase.

Finally, a comparative analysis of the results obtained was carried out in order to establish conclusions based on the objectives set in such a way that their achievement can be validated or not.

KEY WORDS:

- **CEMENT - BASED MATERIALS**
- **CARBON AGGREGATE**
- **ELECTRICAL PROPERTIES**
- **MECHANICAL PROPERTIES**
- **RHEOLOGICAL PROPERTIES**

Capítulo I

Generalidades

Introducción

A través del tiempo, los materiales cementosos han sido simplemente empleados para tener aplicaciones estructurales dentro de la industria de la construcción, donde estos han sido mayormente utilizados. En la actualidad surge la necesidad de cambiar estos paradigmas y desarrollar nuevas tecnologías que potencien a este tipo de materiales y les otorguen nuevas funcionalidades.

La modificación de los materiales a base de cemento con nanomateriales puede brindar nuevas propiedades, como altas resistencias de compresión, mejores propiedades eléctricas, capacidad de generar calor o almacenar energía, y otras características que se le pueden brindar a estos materiales. (Navarro & Forero Horacio, 2017).

Bajo esta premisa, se observa una mejora en las características eléctricas de estos materiales al agregar compuestos conductores de electricidad (carbonos de diferente naturaleza en el orden micro) y lograr que pasen de ser aislantes a conductores eléctricos; lo cual se puede aprovechar en múltiples aplicaciones como: calentamiento resistivo debido al denominado efecto "JOULE", almacenamiento de energía eléctrica debido a un comportamiento como capacitor; entre otras que aún no han sido estudiadas.

Tal como dicta Soliman et al. (2020), la conductividad eléctrica está definida por la tortuosidad eléctrica dada por un cableado volumétrico impregnado por una matriz completamente heterogénea desde la percolación¹ hasta la saturación.

Justificación e Importancia

La presente investigación tiene como finalidad describir el comportamiento de la conductividad eléctrica en materiales a base de cemento con la adición de partículas de carbono de diferente naturaleza y en distintas proporciones en el orden micro, con el objeto de analizar la creación de nuevos materiales con nuevas funcionalidades para la industria de la construcción y así lograr un desarrollo más sostenible de los materiales cementosos para aplicaciones de tecnologías eco amigables y emergentes.

En esta investigación se aborda el comportamiento de la conductividad eléctrica y de las propiedades mecánicas y reológicas de materiales cementosos en adición de partículas de varios tipos de carbonos, por lo que amplía el conocimiento del efecto del agregado en materiales a base de cemento.

Antecedentes

Es muy conocido que la capacidad de conducción de electrones de los compuestos conductor-aislante está fundamentada en la creación de una red conductora de electrones percolada a través de un aislante. Soliman et al. (2020)

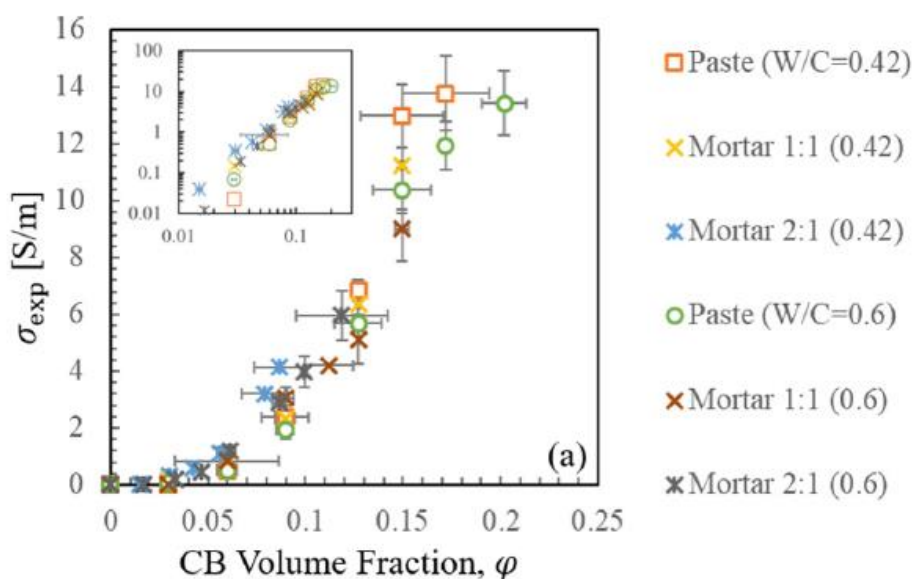
Alrededor de este fenómeno ya se han realizado algunas investigaciones, una de ellas fue llevada por Soliman et al. (2020). En esta investigación se ensayaron 43 compuestos a base de cemento a los cuales se les agregó carbono negro en el orden nano. Los resultados obtenidos con respecto a la conductividad eléctrica demostraron

¹ Proceso en el cual un elemento se desplaza a través de un medio poroso

que las pastas y morteros de cemento a las cuales se las agregó carbón negro se convirtieron en conductores de electrones muy debajo del límite de percolación. Así mismo, se dedujo que, superior a este umbral de percolación, la conductividad iba escalando con la fracción volumétrica del agregado de carbono. Lo anteriormente descrito se puede observar en la figura 1.

Figura 1

Conductividad eléctrica vs proporción de carbono agregado



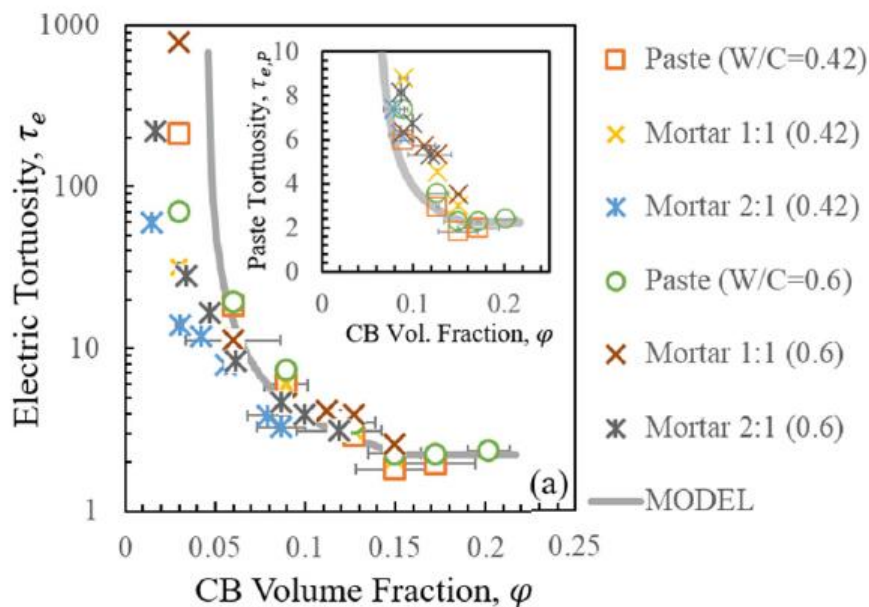
Nota. Recuperado de “*Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials.*” por Soliman et al.,(2020).

Por otra parte, hay que destacar de esta investigación la propiedad de la tortuosidad eléctrica; la cual hace referencia al camino que toman los electrones para atravesar un cuerpo poroso. Para el caso de pastas y morteros a las que se le añadió diferentes proporciones de carbón negro, se encontró que la tortuosidad colapsa sobre una curva patrón. Tal como se puede observar en la Figura 2, esta propiedad decrece al incrementar el contenido general de carbono desde el umbral de percolación. Así

mismo, se llega a un punto en el cual se genera una asíntota horizontal donde las muestras tienen una tortuosidad eléctrica mínima.

Figura 2

Tortuosidad eléctrica vs contenido de carbono agregado



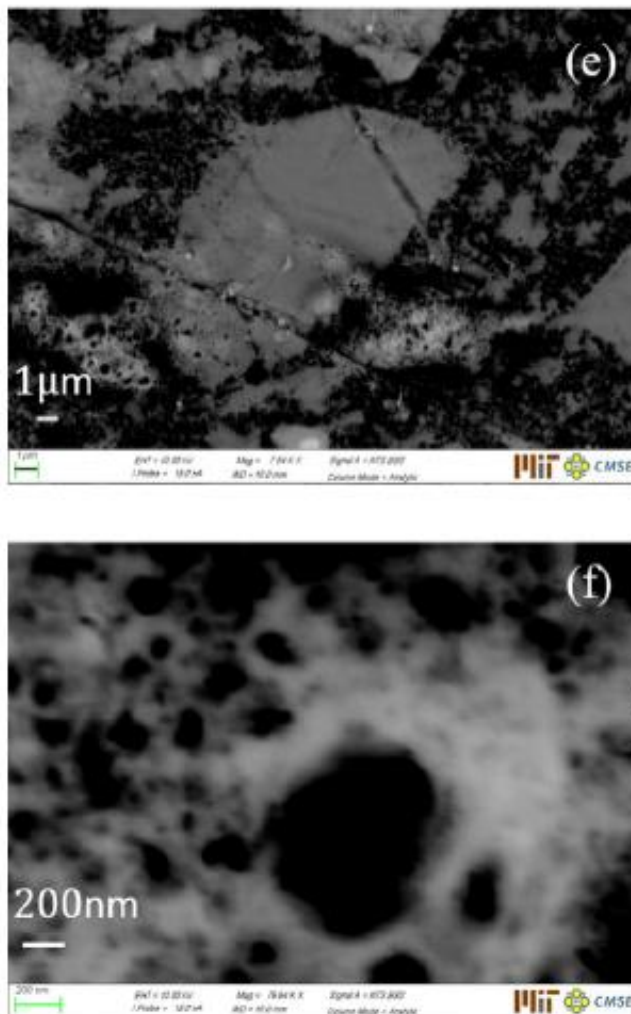
Nota. Recuperado de “*Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials.*” por Soliman et al., (2020).

Cabe resaltar una observación importante referente al comportamiento asíntótico de la tortuosidad eléctrica alrededor del umbral de percolación: Soliman et al. (2020) menciona que este comportamiento es independiente de los parámetros de diseño de mezcla específicos de las muestras y más bien, se relaciona con la naturaleza del proceso de gelificación del carbono negro. En las primeras etapas de la gelificación es muy probable que se genera el cableado volumétrico, por un proceso de separación de fases carbono-cemento. Con esto se puede decir que el cableado volumétrico no es una

fase homogénea, si no un compuesto de partículas de carbón y productos de hidratación del cemento como se puede observar en la figura 3.

Figura 3

Imágenes Microscópicas del compuesto carbón-cemento en diferentes ordenes



Nota. Recuperado de “*Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials.*” por Soliman et al., 2020.

Alcance

En esta investigación se determinará la proporción más adecuada de la mezcla agua-cemento y carbono. Además, se definirá cual es el mejor tipo de carbono de los adquiridos en el mercado local con las propiedades mecánicas y eléctricas de mejor desempeño conforme a las condiciones de partida. Finalmente, se estudiará el efecto de la adición de carbono sobre las propiedades mecánicas y reológicas. Además, se va a desarrollar una adecuada metodología de medición para obtener la resistencia eléctrica de las muestras ensayadas.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas en materiales a base de cemento con la adición de partículas de carbono.

Objetivos Específicos

- Hallar la mejor proporción de Carbono que dé como resultado la mejor conductividad eléctrica en las probetas de materiales a base de cemento.
- Determinar los mejores tipos de Carbono que contribuyan a obtener una mejor conducción eléctrica en las probetas.
- Obtener las propiedades mecánicas y reológicas de las probetas que presenten la mejor conductividad eléctrica al vigésimo octavo día de fraguado.

Capítulo II

Marco Teórico

El presente capítulo describe brevemente las propiedades de interés del cemento y materiales micro y nano carbonados. Finalmente, se aborda el fenómeno de tortuosidad y la teoría de percolación en materiales porosos.

Características de las Materias Primas

Cemento

El cemento se define como un material inorgánico que tiene la capacidad de endurecerse después de ser mezclado. Existen dos tipos: Hidráulicos, los cuales se endurecen en presencia del agua durante el fraguado y no Hidráulicos, que adicionalmente necesitan la existencia de aire para que ocurra dicho fenómeno. (Askeland et al., 2012).

Además de los mencionados, existen otros tipos que se detallan en la tabla 1.

Tabla 1

Tipos de cemento según su uso

Tipo	Uso
I	General
II	Estructuras Normales y miembros y expuesto a suelos y aguas subterráneas de composición moderada de sulfatos
III	Ofrece alta resistencia a edades tempranas. Por lo que se utiliza en estructuras que serán puestas en servicio rápidamente

Tipo	Uso
IV	Usado donde se deba minimizar la tasa y cantidad de calor generado por la hidratación
V	Aplicado en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos.

Nota. Recuperado de “Generalidades del Cemento y del Concreto”, por Gonzales Zúñiga, M., 2021

Al mezclarse con agua, el cemento forma la denominada “pasta”; que es extremadamente útil para producir estructuras sólidas y rígidas de casi todas las formas que se desee. Cabe recalcar que al producirse la hidratación la dureza adquirida es una función de las reacciones de enlace químico que se producen con el H_2O . (Callister, 2009)

La composición del cemento está dada por dos ingredientes básicos: un material calcáreo como óxido de calcio, piedra caliza o yeso. Y por otro arcilloso, que es una combinación de silicio y aluminio. (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

En la tabla 2 se muestran los compuestos principales que forman el cemento.

Tabla 2

Compuestos principales del cemento

Compuesto	Fórmula Química	Fórmula Común	Rango usual en peso (%)
Silicato Tricálcico	$3 CaO \cdot SiO_2$	C_3S	45-60
Silicato Dicálcico	$2 CaO \cdot SiO_2$	C_2S	15-30

Compuesto	Fórmula Química	Fórmula Común	Rango usual en peso (%)
Aluminato Tricálcico	$3 CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	6-12
Aluminoferrita Tetracálcica	$4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	6-8

Nota. Recuperado de “*Materiales para ingeniería civil*”, por Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P., 2009

Los componentes del cemento determinan la rapidez del fraguado y las propiedades finales que tendrá el concreto. Normalmente, el proceso de fraguado del cemento es de 28 días, pero pasado este tiempo se sigue produciendo endurecimiento el cual puede durar años; pero es mínimo. (Askeland et al., 2012).

Una peculiaridad destacable del cemento es la capacidad de alterar su resistencia debido a las materias primas que se hayan empleado en su fabricación, logrando incluso que adquiera resistencia a efectos corrosivos de los sulfatos. (Gonzales Zúñiga, 2021)

Fraguado

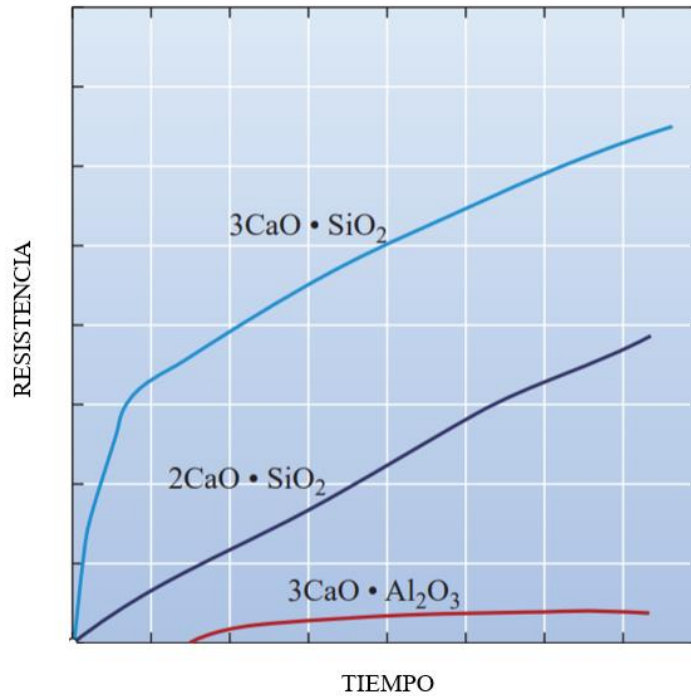
La velocidad de fraguado está determinada por la relación entre aluminatos y sulfatos. Dependiendo de las concentraciones de estos compuestos, se observan tres tipos de fraguados que se muestran en la figura 4.

- Fraguado normal: requiere composiciones bajas de aluminatos y sulfatos, tarda en endurecerse entre dos y cuatro horas.
- Fraguado Rápido: disponibilidad de aluminatos alta y sulfatos baja, se solidifica entre 10 a 45 minutos.

- Fraguado instantáneo: tasas bajas de aluminatos y altas de sulfatos, fragua en menos de 10 minutos. (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Figura 4

Resistencia vs Tiempo de Fraguado de distintas clases de Cemento

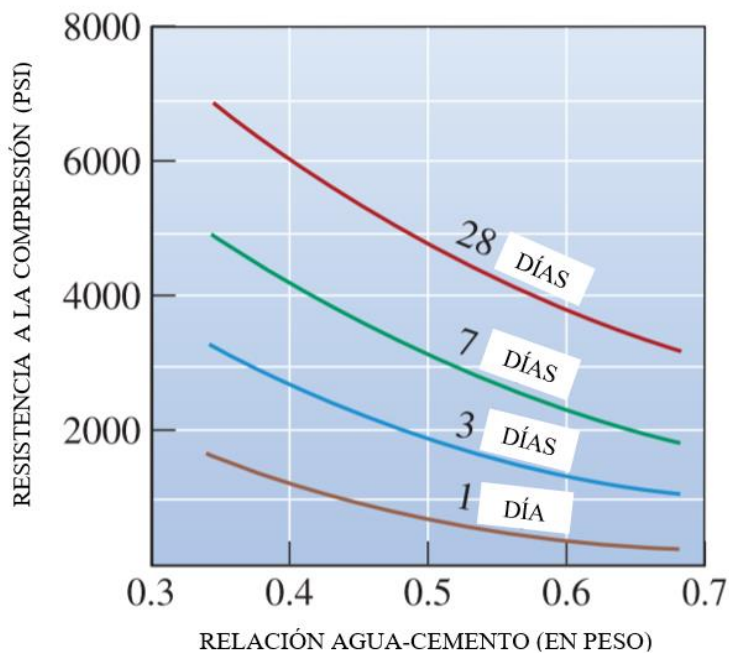


Nota. Recuperado de “*Ciencia e Ingeniería de Materiales Sexta Edición*” por Askeland et al., 2012

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión en distintos tiempos de fraguado y para diferentes relaciones de agua – cemento.

Figura 5

Resistencia a la compresión en distintos tiempos de fraguado



Nota. Recuperado de “*Ciencia e Ingeniería de Materiales Sexta Edición*” por Askeland et al., 2012

Consistencia

Hace referencia a la capacidad de mantener un volumen una vez que ha fraguado el cemento. Si el mismo no es consistente podría provocar una expansión posterior al fraguado, la cual puede estar ligada a una hidratación retardada o lenta. (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

La ASTM C143, dicta el ensayo para monitorear la consistencia del concreto fresco mediante el “Cono de Abrahms”, mostrado en la figura 6. En condiciones de laboratorio se ha observado que el asentamiento del concreto aumenta

proporcionalmente con el contenido de agua de la mezcla, pero a su vez es inversamente proporcional a la resistencia del mismo. (NTG-41017, 2017)

Figura 6

Cono de Abrahams



Nota. Adaptado de *SCC - Kit de Conos de Abrams [Fotografía]*, por Matest, 2021, (<https://www.matest.com/es/concreto/scc-aparatos-de-ensayo/scc-kit-de-conos-de-abrams/>)

Resistencia a la Compresión

La medida en que la reacción de hidratación se complete determinará la resistencia y durabilidad del concreto. Esta reacción es relativamente rápida en los primeros días del mezclado. La relación agua cemento es otra variable que influye en esta propiedad: una alta relación dará menor resistencia, pero una menor razón resultará en una moldeabilidad inferior. Es fundamental que el agua se mantenga en el concreto en el lapso inicial de fraguado y que se logre evitar o reducir la evaporación. (William F. Smith et al., 2006)

La norma que dicta el ensayo para medir esta propiedad es la ASTM C109, en la cual se dicta la preparación de las probetas, así como las dimensiones y las cargas de compresión que deben ser aplicadas a la misma.

Hormigón

El hormigón es, generalmente, el material más utilizado en obras de construcción. Está constituido por rocas de tamaño máximo limitado, que cumplen ciertas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas por un conglomerante (cemento) y agua. Se pueden agregar aditivos para mejorar ciertas características de la mezcla. (Polanco & Setián, 2013)

El hormigón presenta varias ventajas como bajo costo, resistencia al calor y al fuego, es fácil de dar forma y presenta una buena durabilidad; además de que se lo puede fabricar en la misma obra. Sus desventajas son una pobre resistencia a la tensión, presenta contracción una vez solidificado y es poco dúctil. (W. Smith & Hasemi, 2006)

Densidad

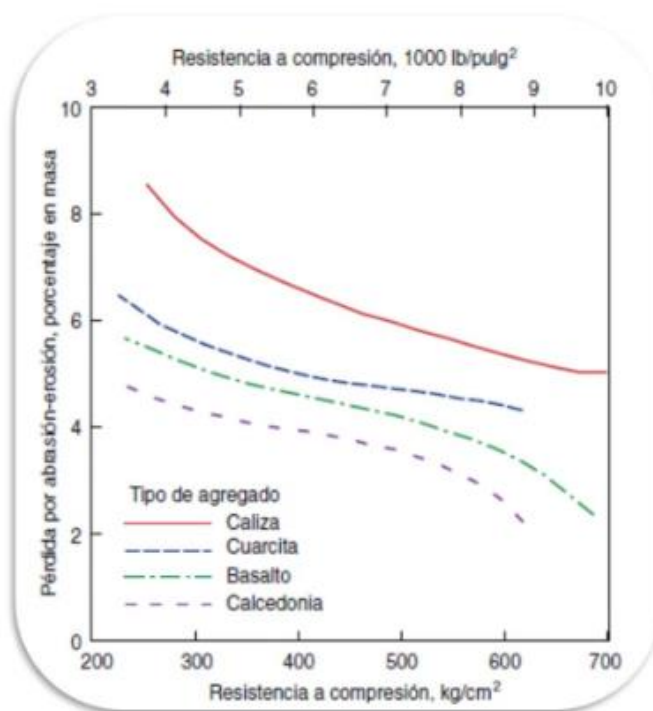
La mayoría de hormigones usados tienen una densidad entre 2,2 a 2,4 g/ml. Esta propiedad depende de la cantidad de cemento, agua y agregado que hay en la mezcla; además de la cantidad de aire presente. (Mosquera, 2015).

Resistencia al Desgaste

Esta propiedad tiene mucho que ver con la resistencia a la compresión del material, pues ambas se relacionan de forma directa como se detalla en la norma ASTM C 1138. En la figura 7 se muestra este comportamiento.

Figura 7

Efecto de la resistencia a la compresión y del tipo de agregado sobre la resistencia a la abrasión del hormigón



Nota. Recuperado de “Hormigón de alto desempeño con módulo de rotura 4,5 MPa a las 24 horas” por Mosquera, J., 2012.

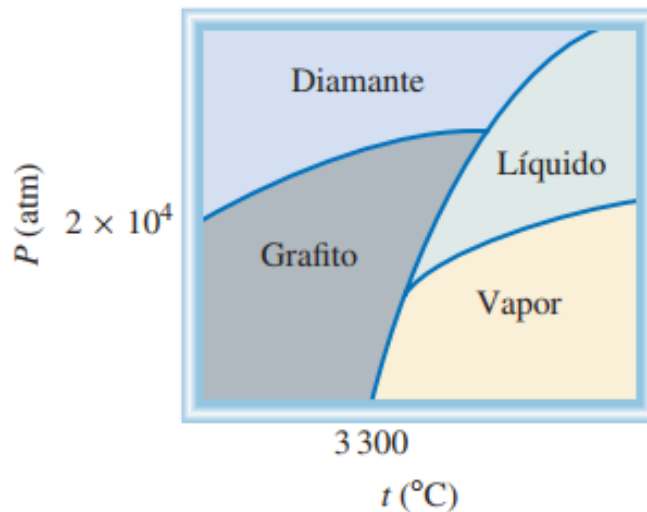
Carbonos Agregados

El carbono es un mineral que, en forma natural, es un semiconductor. Puede tener varias estructuras internas dependiendo de las condiciones ambientales a las que esté sometido. Es uno de los materiales más usados en el mundo, por lo que tiene una significativa importancia para la sociedad. (McMurry, 2008).

El carbono se encuentra libre en sus formas alotrópicas de diamante y de grafito (Véase Figura 8). El grafito es la forma natural del carbono a 1 atm y 25°C. (Chang, 2010)

Figura 8

Diagrama de fases del carbono en (atm).



Nota. Recuperado de "Química 10th ed", por Chang, R, 2010, McGraw Hill.

El carbono tiene seis alótropos (Máxima, 2021):

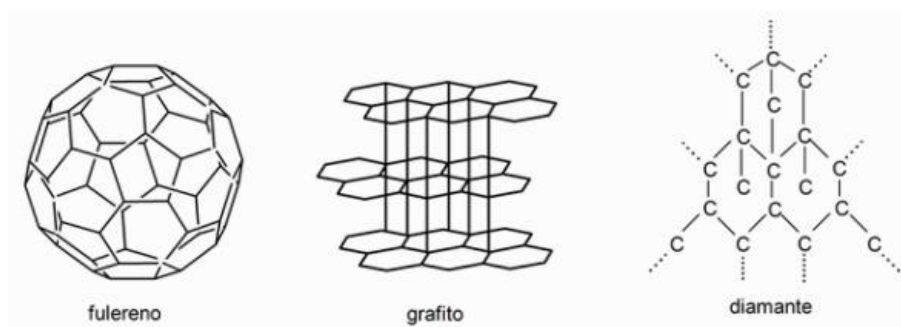
- Carbono amorfo: Son la mayor parte de los carbones puros en la naturaleza. Su estructura interna no presenta una forma definida.
- Grafito: Su estructura interna tiene forma hexagonal, que le otorgan bondades como una buena conductividad eléctrica.
- Grafeno: Es un nano material dispuesto en capas, sus átomos forman hexágonos que le otorgan propiedades como una gran resistencia a tracción, gran conductividad eléctrica y térmica y una alta dureza.
- Diamante: su estructura interna es cúbica y sus principales características es que presenta una extremada dureza y alta refracción y dispersión de la luz.

- **Fulerenos:** Formado por 60 átomos de carbono cuya estructura interna es heptagonal o pentagonal, por lo que simulan una apariencia esférica. La organización de sus átomos hace que tenga una alta resistencia a la tracción.
- **Nanotubos:** Es un nanomaterial que se conforma por láminas de grafito enrolladas para formar cilindros. Entre sus propiedades se sabe que su alta dureza puede superar a la del diamante, es muy resistente a la tracción y su capacidad de conducir calor y electricidad es alta.

En la figura 9 se muestran las estructuras de varios alótropos del carbono.

Figura 9

Representación de la estructura de varios alótropos del carbono



Nota. Adaptado de *Carbono – definición y características [Fotografía]*, por Máxima, J. 2021. Características (<https://www.caracteristicas.co/carbono/>)

Generalidades de las Micro y Nanopartículas de Carbono

Es conocido que los materiales, en una macro escala, presentan un comportamiento y características determinadas. Pero cuando se los estudia en una nano escala, estas propiedades pueden ser diferentes porque se ven afectadas por la forma y el tamaño de su nueva estructura interna. (Cornejo, 2015).

Los materiales de nano carbono son un ejemplo claro de este comportamiento, pues presentan grandes propiedades que no se pueden lograr en una escala macro. Por esto, son muy estudiados para aprovechar sus nuevas cualidades y una de ellas es la conductividad eléctrica.

En la tabla 3 se compara la resistividad de varios materiales en el orden macro.

Tabla 3

Resistividad de varios materiales

Material	Resistividad, $\rho(\Omega\cdot m)$	Coefficiente térmico de la resistividad, $\alpha(C^\circ)^{-1}$
<i>Conductores</i>		
Plata	1.59×10^{-8}	0,0061
Cobre	1.68×10^{-8}	0,0068
Oro	2.44×10^{-8}	0,0034
Aluminio	2.65×10^{-8}	0,00429
Tungsteno	5.6×10^{-8}	0,0045
Hierro	9.71×10^{-8}	0,00651
Platino	10.6×10^{-8}	0,003927
Mercurio	98×10^{-8}	0,0009
Nicromio (aleación de Ni, Fe y Cr)	100×10^{-8}	0,0004
<i>semiconductores</i>		
Carbón (grafito)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$	-0,0005
Germanio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$	-0,05
Silicio	0.1 – 60	-0,07
<i>Aislantes</i>		
Vidrio	$10^9 - 10^{12}$	
Hule duro	$10^{13} - 10^{15}$	

Nota. Recuperado de “Física para ciencias e ingeniería con física moderna” 4th ed. Vol. 2”, por Giancoli, D, 2009, Pearson Education.

Los micro y nano carbonos son componentes altamente conductores de electricidad. Algunos de ellos son el negro de humo, polvo de grafito, fibras y nanotubos de carbono, entre otros. (Soliman et al., 2020)

Las propiedades mecánicas de los nano materiales cambian con el tamaño; a escala nanométrica se modifica su estructura atómica, haciéndose más resistentes y adquiriendo características superiores a las de los macro materiales. Es decir, se incrementan su dureza y su resistencia. Un caso emblemático de esto son los nanotubos de carbono. (Cornejo, 2015)

Pastas de Cemento

La norma ecuatoriana NTE INEN 151:2010 define a la pasta de cemento como la mezcla, plástica o endurecida, de material cementante y agua.

Se conoce como la hidratación de la pasta a las reacciones que ocurren entre los componentes del cemento y el agua cuando se mezclan.

El fraguado es el proceso en el que los constituyentes del cemento reaccionan con la fase líquida de la pasta hasta disolverse durante las primeras horas después del mezclado. El fraguado termina una vez que la pasta adquiere una fase sólida y rígida.

El endurecimiento es el proceso que ocurre seguidamente. Aquí la hidratación y solidificación siguen ocurriendo, pero de forma más lenta. El endurecimiento puede tener lugar durante años. Sin embargo, las propiedades del material deben alcanzarse a los 28 días del mezclado. (Antón, 2016)

Fluidez de la Pasta

La fluidez de la pasta influye en la manejabilidad de la mezcla de concreto. Si se agrega una mayor cantidad de cemento y poca agua, la mezcla será muy rígida y no se podrá manejar. En su defecto, si se agrega una mayor cantidad de agua y poco

cemento, la mezcla será muy fluida y no contendrá a los agregados, si no que los segregará (Sanchez, 2001).

Morteros

De forma general, el mortero es una mezcla compuesta por agua, conglomerante y agregado de arenas finas y cal. Como conglomerante, se emplea el cemento, el yeso y la cal. (Polanco & Setién, 2013)

Al endurecerse, el mortero presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos. (Sanchez, 2001)

En la tabla 4 se presenta la resistencia de morteros de varias dosificaciones de cemento y arena.

Tabla 4

Resistencia de morteros de cemento

Dosificación	Cemento (kg/m³)	Resistencia (MPa)
1:10	161	3
1:08	197	5
1:06	255	7,5
1:04	361	13
1:03	455	16

Nota. Recuperado de “Cementos, Morteros y Hormigones”, por Polanco, J., & Setién, J. 2013, In Open course ware. Universidad de Cantabria.

Mortero Equivalente

Un mortero equivalente se basa en crear un mortero partiendo de una mezcla de hormigón conocida, y lograr que las propiedades reológicas obtenidas se correlacionen con las de la mezcla de hormigón de partida. Esto con la finalidad de eliminar los agregados gruesos de la mezcla y así ahorrar tiempo y recursos. (Parrón et al., 2010)

En lo que se refiere al estudio de las propiedades reológicas, la ventaja primordial que brinda el método del mortero equivalente es que, al no tener agregado grueso, los reómetros comunes pueden emplearse para realizar todo tipo de ensayos reológicos. Pues caso contrario, se requiere de equipos especializados y más costosos. (Velázquez Navarro, 2009).

Para diseñar un mortero equivalente se debe conservar las siguientes relaciones con respecto a la composición del hormigón base (Parrón et al., 2010):

- Naturaleza y dosis del cemento
- Aditivos minerales deben ser los mismos
- La relación agua/cemento debe ser igual
- Misma proporción de aditivo y manera de mezclarlo
- Emplear la cantidad de árido fino suficiente para conseguir la

misma superficie total que la superficie de los áridos gruesos que fueron reemplazados de la mezcla de hormigón de partida.

Proporción Agua-Cemento

La importancia de esta razón radica en que se encuentra fuertemente ligada a una gran cantidad de propiedades del material final, una alta relación aumentará la fluidez, pero disminuirá la resistencia. (Guevarra Fallas et al., 2011)

Tabla 5

Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia del cemento

A/C	Resistencia MPa
0.36	420
0.40	370
0.45	340
0.50	295
0.55	275
0.60	230
0.65	220
0.70	185
0.75	165
0.80	140

Nota. Recuperado de “Efecto de la variación agua/cemento en el concreto” por Guevarra Fallas et al., 2011. Conversión de unidades por parte de los autores.

Cantidad de agua: Debe ser la suficiente para que el cemento experimente la reacción de hidratación. Un contenido alto presenta algunas desventajas como reducción de la resistencia a la compresión del concreto e incremento de la contracción del concreto durante el fraguado lo cual genera un riesgo de agrietamiento del mismo.

Por lo anterior expuesto, es necesario tener un equilibrio entre las propiedades de resistencia, facilidad de trabajo y contracción. La proporción más común en peso que asegurará estas propiedades es de 0.45 a 0.55. (Callister, 2009).

Reología de Materiales Cementosos

Las pastas cementosas, en su fase de mezcla, inicialmente se comportan como un fluido. Con el paso del tiempo, se solidifican hasta ser un sólido por completo; por lo que resulta útil conocer las propiedades reológicas del cemento para poder controlar su

trabajabilidad y consistencia dado que el concreto es emplazado en su estado fluido. (Portugal, 2003).

Mediante ensayos reológicos es posible medir la trabajabilidad de las pastas y materiales cementosos, pues se obtiene la curva reológica de flujo que relaciona el esfuerzo cortante con la tasa de deformación que experimenta una mezcla. (Lizarazo, 2019).

Con los reómetros se puede determinar algunos parámetros importantes de estudio como el esfuerzo umbral de cizalla y la viscosidad. Los viscosímetros y reómetros tienen medidas más precisas que los métodos empíricos ya que se basan en un análisis multipunto (Tattersall & Banfill P, 1983).

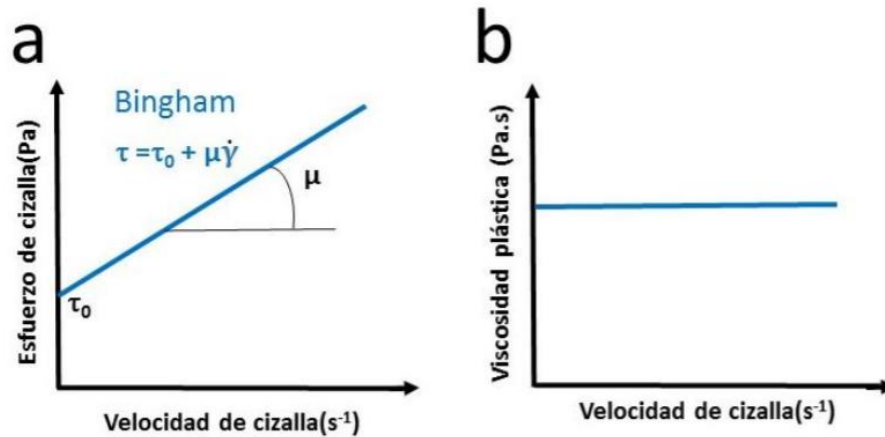
De los modelos de comportamiento reológico que existen, las mezclas de cementos se ajustan mejor al modelo de Bingham. Es decir, que existe cierto esfuerzo al inicio del movimiento que hay que romper para que la mezcla fluya. A este esfuerzo se conoce como esfuerzo umbral de cizalla τ_o (punto de corte con el eje de ordenadas, figura 10), μ es la viscosidad plástica y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla que experimenta la mezcla. (Gismera, 2019).

La ecuación 1 describe matemáticamente el comportamiento de Bingham.

$$\tau = \tau_o + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

Figura 10

Curvas de flujo y viscosidad para el modelo reológico de Bingham.



Nota. Recuperado de “*Comportamiento reológico de cementos y morteros activados alcalinamente: influencia de las variables del proceso*” por Gismera, S. 2019.

Generalidades de los Medios Porosos

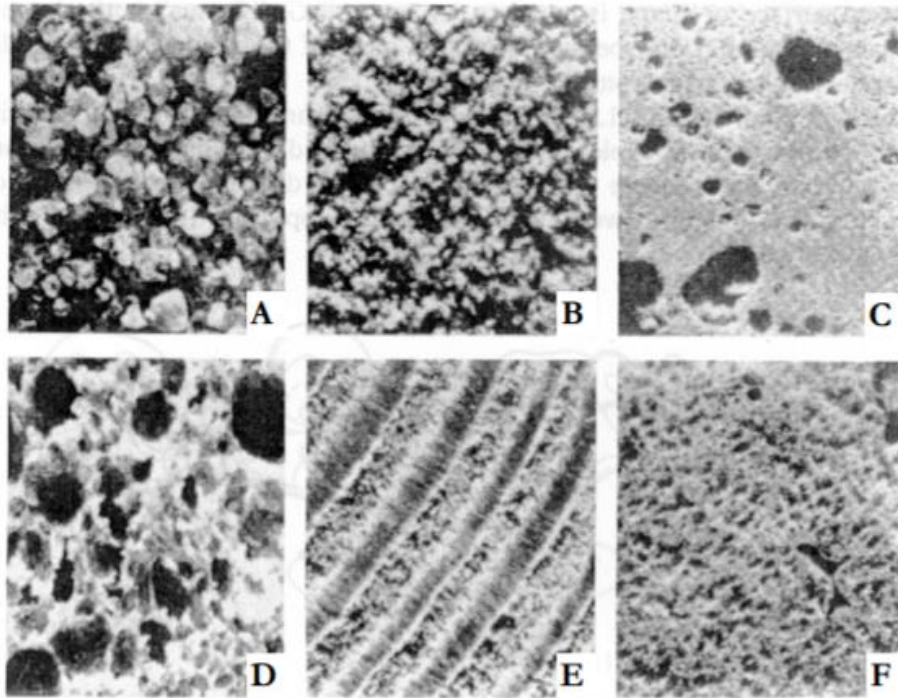
Un material poroso es un cuerpo sólido que alberga un conjunto de poros al interior de su volumen. Los poros, debido a su naturaleza y distribución, permanecen o no unidos unos con otros.

La porosidad ϕ es la propiedad esencial que presentan este tipo de materiales, y representa la fracción volumétrica del cuerpo que es abarcada por los poros.

Los poros son pequeños espacios vacíos en el interior del cuerpo. Se pueden evidenciar observando las secciones del sólido con microscopios, como lo ilustra la figura 11. (López, 2004).

Figura 11

Ejemplos de materiales porosos naturales vistos con un microscopio electrónico (X10), (A) arena fina, (B) piedra arenisca, (C) piedra caliza, (D) pan de centeno, (E) madera, (F) sección de pulmón humano.



Nota. Recuperado de “*Flow of Fluids through Porous Material*” por Collins R. E. 1961.

Tortuosidad

En los compuestos conductor – aislante, la conductividad eléctrica se basa en la propiedad de la tortuosidad a través del aislante.

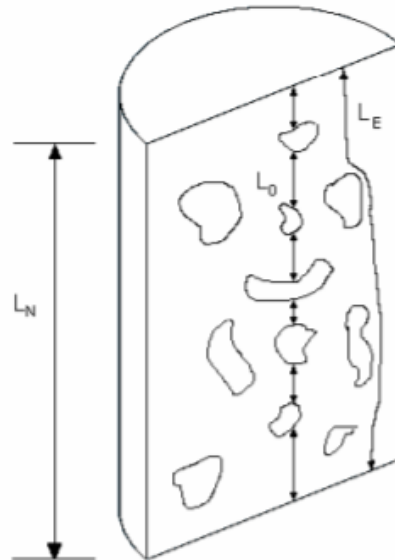
La tortuosidad es un parámetro físico de los flujos de fluidos y de las corrientes eléctricas que viajan por el interior de un cuerpo poroso. Matemáticamente, se define por la relación entre el espacio real que viaja una corriente eléctrica entre dos puntos y el espacio en línea recta entre esos puntos: $\xi = L_E / L_N$, donde L_E es la longitud

efectiva que debe recorrer la corriente eléctrica y L_N es la distancia rectilínea entre ambos puntos. (Lozano & Montes, 2005).

Es importante considerar que lo que define la longitud real son las porosidades, mas no el propio material, como se representa en la figura 12.

Figura 12

Parámetros de la tortuosidad



Nota. Recuperado de “Estudio del recorrido eléctrico efectivo a través de una muestra porosa”, por Lozano, L., & Montes, J. 2005.

Donde L_o es el valor del segmento sólido, L_E es la longitud real entre dos puntos y L_N es la longitud en línea recta de la muestra porosa.

La tortuosidad de un elemento poroso se mide de forma experimental, considerando que una corriente eléctrica atraviesa y viaja por el material, pues los poros en su interior pueden conectarse unos con otros, como a la vez no pueden estarlo; ya

que su naturaleza y distribución es variable y dependen del tipo de material y del cómo se han formado. (Lozano & Montes, 2005).

Aspectos que Afectan a la Tortuosidad

La tortuosidad se ve afectada por la estructura interna del material poroso y por su composición. Así, la forma en que se organizan los granos, sus tamaños variables, superficie de los poros y la naturaleza en general del medio afectan a la tortuosidad y a la dirección que toma el flujo de corriente que atraviesa el cuerpo. (Lozano & Montes, 2005).

Otro aspecto a considerar es que la tortuosidad se incrementa cuando los poros son muy irregulares y disminuye cuando son regulares o tienen formas esféricas. Por lo que, para obtener una tortuosidad óptima se debe equilibrar la cantidad y la dispersión del elemento poroso. (Towle, 1962).

En la investigación de (Soliman et al., 2020b) se llegó a concluir que, si el carbón está muy disperso, el cableado volumétrico es insuficiente y provocará una gran tortuosidad. En cambio, si no se adiciona suficiente cantidad de carbono a la muestra, la tortuosidad se incrementará hasta no poder formar un cableado directo y eficiente con alta conductividad.

Relación Entre la Tortuosidad, Porosidad y Dirección del Flujo

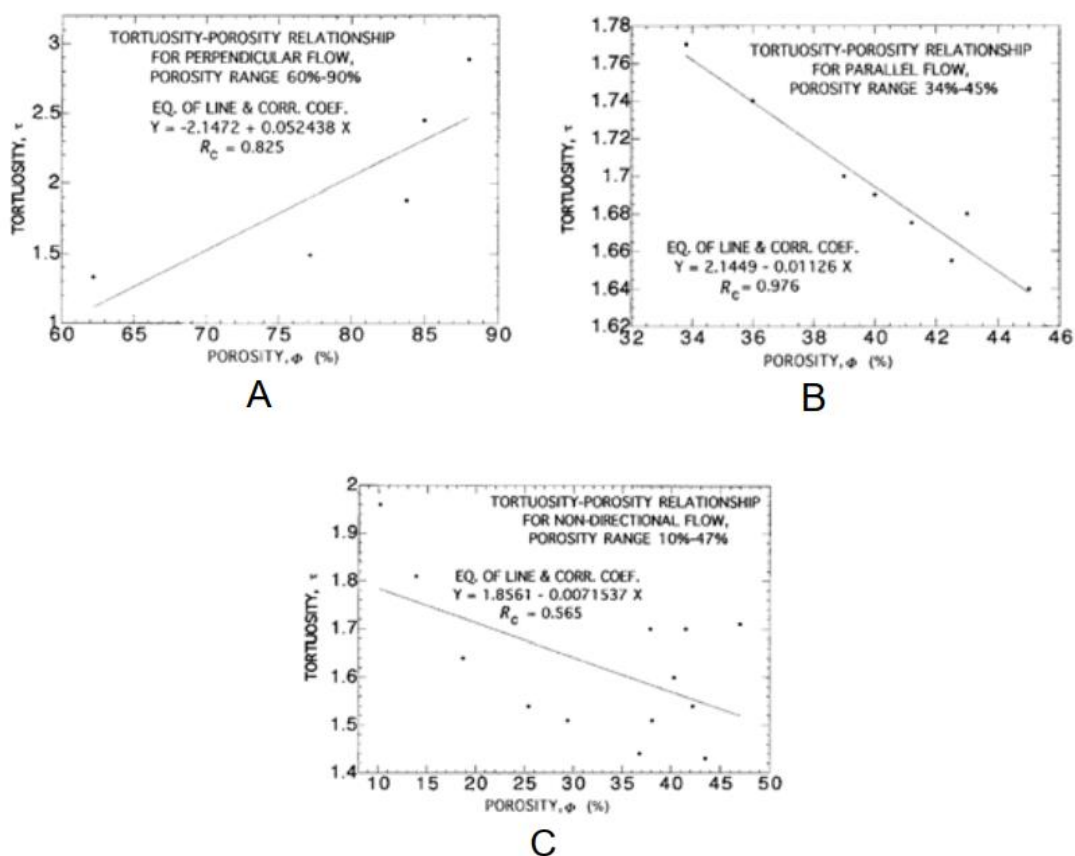
La relación entre la tortuosidad y la porosidad se ha estudiado en varias investigaciones y se ha logrado medir experimentalmente, concluyendo lo siguiente: (Lozano & Montes, 2005).

- A. Un alto rango de porosidad porcentual (60% - 90%) afecta enormemente a la tortuosidad y se correlacionan positivamente cuando el flujo es perpendicular a los planos o fibras.

- B. Un rango medio de porosidad (33.8% - 45%) afecta medianamente a la tortuosidad y se correlacionan negativamente cuando el flujo es paralelo a los planos.
- C. Los materiales con tamaños de grano dispar entre 0.02 a 8 mm y una porosidad baja (10% - 47%) afectan en menor medida a la tortuosidad y se correlacionan negativamente si se tiene un flujo no direccional.

Figura 13

Relación entre la porosidad y la tortuosidad para distintos tipos de medios porosos



Nota. Recuperado de “Estudio del recorrido eléctrico efectivo a través de una muestra porosa”, por Lozano, L., & Montes, J. 2005.

Teoría de Percolación

Estudia la probabilidad de que un elemento ocupe un lugar en un conjunto, con el objetivo de analizar nuevas propiedades que han aparecido u otras que empiezan a magnificarse u ocultarse; e inclusive, permite pronosticar cómo actuará el sistema. (Cifuentes Barrios, 2007).

Si se imagina una red como una gran hoja de papel cuadriculado, como se muestra en la figura 14 y figura 15, en la cual ciertas celdas pueden o no estar disponibles, la ocupación de estas celdas es aleatoria e independiente del estado ocupacional del cluster. La probabilidad de que un determinado lugar se encuentre ocupado se designa por p . Como consecuencia, si la red dispone de N lugares, la probabilidad que estos sean ocupados será $p \cdot N$ y la probabilidad de que se encuentren vacíos será $(1 - p) \cdot N$. (Dietrich & Ammon, 2003).

Si el plano bidimensional es extenso y también la probabilidad de ocupación no es significativa, la dimensión del cluster será pequeña. Para una probabilidad de ocupación de uno, la superficie se encontrará completamente conectada, presentando únicamente agujeros ocasionales. Adicional a esto, existe un valor de p en el que la estructura pasa de un estado desconectado a conectado, conocido como “umbral de percolación enlazada p_{cb} ”. (Pérez Rea, 2005).

Figura 14

Red Bidimensional con ciertos espacios ocupados

	X	X		X		X	X		
	X		X						X
X						X			X
				X				X	X
		X	X	X			X		
X		X							
X						X		X	
	X			X	X	X			
			X	X			X		X
	X			X					X

Nota. Recuperado de “*Estudio por medio de la Teoría de la Percolación de los puntos críticos del excipiente Hidroxipropilmetilcelulosa, utilizado en comprimidos de liberación modificada.*”, por Cifuentes Barrios, 2007.

Figura 15

Clusters formados en la red bidimensional

	X	X		X		X	X		
	X		X						X
X						X			X
				X				X	X
		X	X	X			X		
X		X							
X						X		X	
	X			X	X	X			
			X	X			X		X
	X			X					X

Nota. Recuperado de “*Estudio por medio de la Teoría de la Percolación de los puntos críticos del excipiente Hidroxipropilmetilcelulosa, utilizado en comprimidos de liberación modificada.*”, por Cifuentes Barrios, 2007.

Cuando se presenta el denominado umbral de percolación significa que se ha formado una red que conecta los cuatro lados del plano como se observa en la figura 16. A esta red se le conoce como Cluster Infinito o Percolante y a la probabilidad de obtener el mismo se la llama Probabilidad Crítica o Umbral de Percolación. (Sahimi, 1993)

Figura 16

Cluster infinito

	X	X		X		X	X		
	X		X			X			X
X		X				X			X
				X	X	X	X	X	X
		X	X	X		X	X		
X	X	X				X			X
X			X			X		X	
	X			X	X	X			
			X	X			X		X
	X			X					X

Nota. Recuperado de “Estudio por medio de la Teoría de la Percolación de los puntos críticos del excipiente Hidroxipropilmetilcelulosa, utilizado en comprimidos de liberación modificada.” por Cifuentes Barrios, 2007.

La ecuación 2, conocida como ecuación fundamental de la percolación, describe la conducta del conjunto cuando se ha formado un cluster infinito. Cabe recalcar que esta ecuación es válida cerca del umbral de percolación. (Cifuentes Barrios, 2007).

$$X = S(p - p_c)^q \quad (2)$$

Donde, X representa cualquier propiedad del sistema; S es un factor de proporcionalidad; p es la probabilidad de ocupación del sistema; p_c es la probabilidad crítica o umbral de percolación y q es el exponente crítico los cuales son los mismos para todos los sistemas con el mismo número de dimensiones (bi o tridimensional).

Percolación y Conductividad

Si recordamos la red mostrada en la figura 11, en la cual ciertas celdas se encuentran ocupadas o no; si se imagina cada espacio lleno como una pieza de cobre y cada lugar vacío como un aislante. La corriente solo puede fluir entre las celdas de cobre que tienen un lado en común (vecinos cercanos), pero no en aquellas que solo topan en una esquina o están separadas una mayor distancia. Por ende, para $p < p_c$, se obtendrá una conductividad nula, a medida que esto se vaya invirtiendo la conductividad irá aumentando hasta llegar a un $p = 1$, donde el material tendrá la conductividad de cobre puro. (Dietrich & Ammon, 2003).

Capítulo III

Metodología

El presente capítulo describe los métodos y ensayos aplicados durante el desarrollo de este trabajo. Se detallan los materiales, equipos y procedimientos empleados en la fase experimental, así como las normativas técnicas que sirvieron de referencia.

Materiales

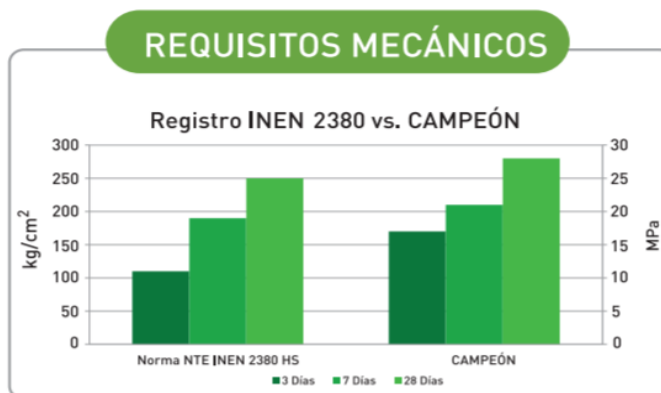
Cemento

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó cemento hidráulico de alta resistencia a los sulfatos tipo HS denominado CAMPEÓN y producido nacionalmente por la empresa GRUPO UNACEM.

Sirve para todo tipo de aplicaciones, pues su tamaño fino se traduce en hormigones más compactos y con mejores resistencias a los sulfatos de aguas servidas u otro tipo de agua. En la figura 17 se muestran sus requisitos mecánicos.

Figura 17

Requisitos mecánicos para cementos hidráulicos según norma INEN 2380 y CAMPEÓN



Nota. Recuperado de "Ficha técnica Campeón." por (UNACEM Ecuador, n.d.).

En el Anexo A se muestra la ficha técnica completa del cemento CAMPEÓN.

Carbonos

En este proyecto se optó por utilizar cuatro tipos de carbono diferentes, los cuales fueron seleccionados por su asequibilidad en el mercado ecuatoriano y por su precio económico. Estos se enlistan en la tabla 6.

Tabla 6

Tipos de carbono utilizados

Tipo de Carbono
Grafito + Cu 50%
Grafito + Cu 70%
Grafito + Cu 90%
Carbón activado

El grafito con cobre a varios porcentajes fue adquirido en la empresa Inducarbones Cia. Ltda., la cual es fabricante e importadora de material eléctrico. Específicamente comercializan barras sólidas de grafito con cobre como repuesto para escobillas en la transmisión de electricidad en las máquinas eléctricas.

Por otro lado, el carbón activado se caracteriza por ser extremadamente poroso (Filippin, 2019) y se puede conseguir en establecimientos dedicados a la elaboración de productos químicos.

Moldes

Los moldes empleados para los ensayos mecánicos fueron hechos en láminas de acrílico de 5 mm de espesor, formando compartimientos cúbicos de 50 mm y cumpliendo con los parámetros y tolerancias especificadas en NTE INEN 488. En la figura 18 se muestran estos moldes.

Figura 18

Moldes empleados para ensayos mecánicos

**Equipos**

Se describe a continuación los equipos empleados, tanto en la preparación de las muestras, como en la ejecución de los diferentes ensayos.

Balanza Electrónica

Equipo marca Shimadzu, modelo TX3202L, con capacidad máxima de 3200 g y apreciación de 0,01 g. (Véase Figura 19).

Figura 19

Balanza electrónica Shimadzu, modelo TX3202L



Horno de Convección

Horno de convección marca Fisher Isotemp serie 300, modelo 338F. Trabaja a 115V, 12,5 A y 60hz. (Véase Figura 20).

Figura 20

Horno de convección Fisher Isotemp serie 300, modelo 338F



Mezcladora Morteros

Equipo marca Matest S.p.A, modelo E094Y, de dos velocidades. Procedencia italiana. Capacidad de 20L. Su motor eléctrico tiene una potencia de 800 W y trabaja a 110V con 60Hz. Cumple con los requisitos especificados en la norma NTE INEN 155. (Véase Figura 21).

Figura 21

Mezcladora de morteros Matest S.p.A, modelo E094Y



Máquina de Compresión Simple

Equipo marca Controls, modelo C43G4. Procedencia italiana. Capacidad de 2000 kN. Trabaja con 110V. (Véase Figura 22).

Figura 22

Máquina de compresión simple Controls, modelo C43G4



Reómetro

Equipo marca Discovery, modelo Hybrid DHR – 2. Las características técnicas se detallan en la tabla 7 y el equipo se muestra en la figura 23.

Tabla 7

Características técnicas de reómetro Discovery Hybrid DHR – 2.

Parámetro	Especificación
Velocidad angular mínima - máxima	0 - 300 rad/s
Frecuencia oscilatoria mínima - máxima	1.0E-07 - 100 Hz
Torque mínimo en cizalla constante	10 nN.m
Torque mínimo en oscilación	2 nN.m
Torque máximo	200 mN.m
Fuerza normal máxima	50 N

Parámetro	Especificación
Resolución de torque	0,1 nN.m
Resolución de desplazamiento	10 nrad
Resolución de fuerza normal	0,5 mN
Tiempo de paso, tasa	5 ms
Tiempo de paso, deformación	15 ms
Sensibilidad de fuerza normal	0,005 N

Figura 23

Reómetro Discovery Hybrid DHR – 2



Vano y Copa

La geometría utilizada fue un vano de cilindros concéntricos de 28 mm de diámetro y 42 mm de longitud, mientras que la copa inferior fue de 30,37 mm de diámetro. Ambas partes se ilustran en la figura 24.

Figura 24

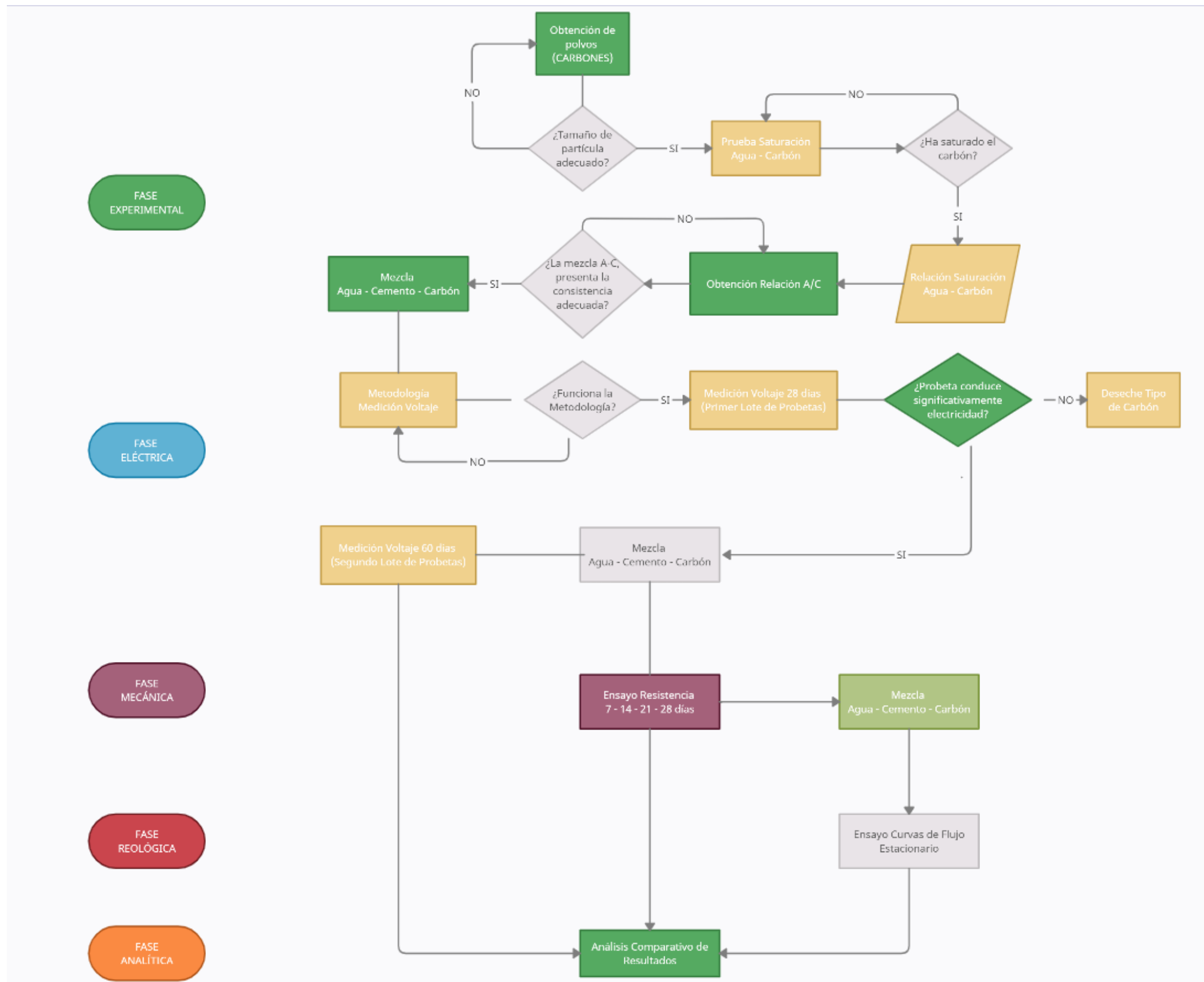
Vano y copa empleados en ensayo reológico

**Método de Investigación**

La investigación consta de 5 fases como se observa en el flujograma de la Figura 25.

Figura 25

Flujograma metodología aplicada



La fase experimental corresponde a la obtención de polvo de carbono con el tamaño de partícula deseado ($75 \mu m$ / Tamiz 200) y a encontrar la dosificación correcta para la mezcla Agua-Cemento-Agregado. Considerando el porcentaje de absorción de agua por parte del carbono.

La fase eléctrica define el método adecuado para medir la caída de voltaje en las probetas. Con esta medición se calcula la conductividad eléctrica de las muestras y se descartan aquellas con las peores características.

La fase mecánica hace referencia a los ensayos de resistencia (compresión) llevados a cabo con los mejores testigos obtenidos en la fase anterior.

La fase reológica realiza un estudio acerca de las curvas de flujo estacionario de las mezclas ensayadas en la fase mecánica.

Finalmente, en la fase analítica, se realiza el análisis comparativo de los resultados obtenidos para emitir conclusiones y decidir qué tipo de muestras presentan las mejores características eléctricas, mecánicas y reológicas.

Fase Experimental

Obtención de las Partículas de Carbono

Las partículas fueron obtenidas mediante el uso de una lijadora orbital de $\frac{1}{4}$, motor de 2.3 Amperios, 14000 rpm marca DeWalt. El proceso consistió en lijar los carbonos sólidos para obtener polvo fino, posteriormente pasarlo por el tamiz No.200 (abertura de $75 \mu m$) y el material residual pasarlo por el tamiz No.100 (abertura de $150 \mu m$).

Las partículas que no pasaron por ninguno de los dos tamices fueron trituradas a mano mediante un mortero para reducir al mínimo el desperdicio de material; y

nuevamente fueron tamizadas. La figura 26 ilustra la metodología aplicada para obtener las partículas de carbono.

Figura 26

Metodología de obtención de las partículas de carbono



Prueba de Saturación Agua – Carbono

Se realizaron pruebas de saturación de agua a cada tipo de carbono empleado. Esto con el fin de cuantificar la cantidad de agua que es capaz de absorber el carbón y considerarlo en la cantidad de agua que se empleará en la mezcla total de agua – cemento – carbón.

La prueba consistió primero en cuantificar la cantidad de agua en el ambiente que absorbe cada tipo de carbono. Para esto, mediante la balanza electrónica, se registró el peso de un envase vacío. Se agregó una pequeña cantidad de carbono y se dejó secar esto en el horno de convección a 80 °C durante 24 horas. Se volvió a registrar el peso seco y de esta forma se llegó a determinar la cantidad de agua

evaporada. La tabla 8 muestra los datos obtenidos y el porcentaje de agua que cada tipo de carbono toma del ambiente.

Tabla 8

Porcentaje de H₂O del ambiente absorbido por el carbono

Tipo de C	Masa inicial envase (g)	Envase + C (g)	Masa C (g)	Masa envase seco + C (g)	H ₂ O absorbida (g)	% H ₂ O absorbido
Grafito + Cu 50%	244,58	247,08	2,5	247,06	0,02	0,80
Grafito + Cu 70%	242,85	245,36	2,51	245,35	0,01	0,40
Grafito + Cu 90%	242,73	256,09	13,36	255,97	0,12	0,90
Carbón activado	242,50	248,22	5,72	248,16	0,06	1,05

Al ser los porcentajes absorbidos no mayores al 1,05% en peso de carbono, se consideró insignificante considerar este valor.

Como segunda parte se determinó la cantidad de agua que absorben los carbonos hasta la saturación. Del mismo modo, mediante la balanza electrónica, se registró el peso de un envase vacío. Se agregó una pequeña cantidad de carbono y se adicionó pequeños volúmenes de agua con una jeringa hasta observar una condición de saturación. La tabla 9 muestra los datos obtenidos y el porcentaje de agua absorbido hasta la saturación.

Tabla 9

Porcentaje de H₂O absorbido por el carbono hasta la saturación

Tipo de C	Masa inicial envase (g)	Envase + C (g)	Masa C (g)	Vol. H₂O (ml)	Masa H₂O (g)	% H₂O absorbido
Grafito + Cu 50%	3,49	5,7	2,21	1,66	1,66	79,07
Grafito + Cu 70%	2,18	4,66	2,48	1,23	1,23	52,21
Grafito + Cu 90%	2,07	6,25	4,18	1,46	1,46	36,77
Carbón activado	2,9	4,02	1,12	1,06	1,06	94,64

Mezcla Agua – Cemento -Carbón Para Ensayos Eléctricos

Una vez cuantificada la cantidad de agua que absorbe cada tipo de carbón, esta se sumará a la cantidad de agua que se utilizará para la mezcla total de agua – cemento – carbón.

Se conoce que, para lograr una hidratación completa en una mezcla, la relación agua/cemento mínima es de 0,42. (Solas & Giani, 2010). Por lo cual, para realizar las mezclas se trabajó con este valor y porcentajes de carbono, en peso de cemento, del 5%, 10% y 15%. Las cantidades de cada componente de la mezcla fueron cuantificadas mediante la balanza electrónica.

Se realizaron dos muestras para cada tipo de carbono seleccionado; como molde se empleó una cubeta de hielo de 3 mL por cada cubo. Se estimó que para llenar dos cubos de mezcla se requiere unos 100 gramos de cemento; por lo que las cantidades de los demás componentes están en función de esa variable como se indica en la tabla 10.

Tabla 10*Cantidades empleadas en la mezcla para ensayos eléctricos*

Tipo de C	Cantidad de cemento (g)	Cantidad de agua (g)	%C	Cantidad de C (g)
Grafito + Cu 50%	100	45,95	5	5
	95	47,41	10	9,5
	90	48,47	15	13,5
Grafito + Cu 70%	100	44,61	5	5
	95	44,86	10	9,5
	90	44,85	15	13,5
Grafito + Cu 90%	100	43,84	5	5
	95	43,39	10	9,5
	90	42,76	15	13,5
Carbón Activado	100	46,73	5	5
	95	48,89	10	9,5
	90	50,58	15	13,5

Para el mezclado se usó una batidora de cocina marca Holstein de 150W, 7 velocidades y se siguió el procedimiento detallado en la norma NTE INEN 155:2009. La cual describe el método para el mezclado mecánico de pastas y morteros. La figura 27 muestra cómo se realizó la mezcla.

Figura 27

Metodología de mezclado para ensayos eléctricos



Una vez vertida la mezcla en el molde, se embebieron dos pequeñas láminas de latón obtenidas de patas de enchufe y se dejó solidificar por 24 horas. Esto con la finalidad de insertar un elemento conductor de electricidad en el cuerpo de la muestra para realizar los ensayos eléctricos. La figura 28 presenta el molde empleado y algunas probetas obtenidas una vez solidificada la mezcla.

Figura 28

Molde y probetas para ensayos eléctricos



Fase Eléctrica

Metodología de Medición de Voltaje

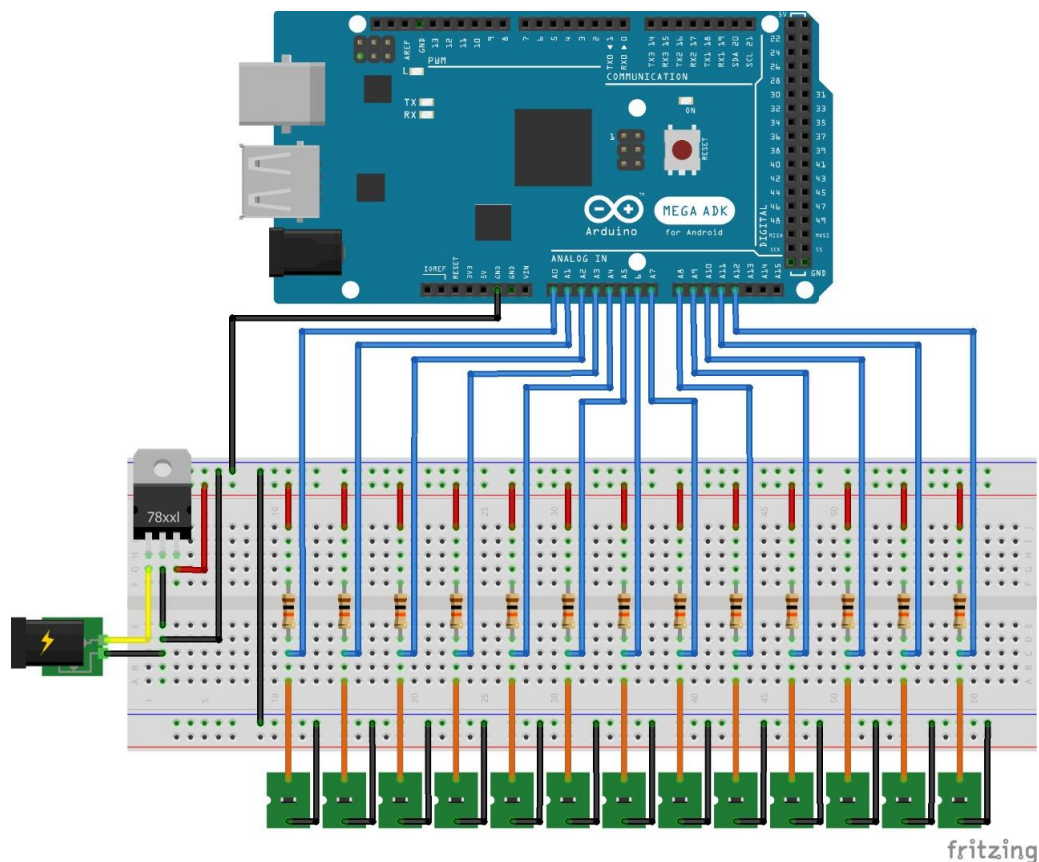
La metodología empleada fue dividir el número de muestras solidificadas entre ambos autores del presente trabajo. Teniendo así, cada estudiante, uno de los testigos de las dos muestras realizadas. Se hicieron mediciones diarias durante 12 horas continuas de la caída de voltaje en cada una de las probetas. La forma en que esta

medida se obtuvo fue mediante una programación de adquisición de datos en Arduino, la cual consistió en tomar una medición cada 10 minutos y registrarla en un archivo Excel. El detalle de la programación se encuentra en el Anexo B.

La construcción del circuito se realizó con un protoboard, Arduino Mega 2560, cables jumper macho – macho, cables lagarto, resistencias de 10k ohmios y un regulador 7805. El esquema de la conexión del circuito se presenta en la figura 29 y el sistema real de recolección y adquisición de datos de muestra en la figura 30.

Figura 29

Esquema de conexión del circuito eléctrico



Las láminas de latón embebidas en las probetas sirvieron como puntos de medición para la caída de voltaje. Aquí se conectaron los cables lagartos.

Arduino arroja resultados en bits, por lo que fue necesario aplicar una conversión para obtener los datos en unidades de voltios. La placa Arduino Mega 2560 consta de 16 entradas analógicas, y cada una otorga una resolución de 10 bits, lo que equivale a 1024 valores distintos. El voltaje medido desde tierra es siempre 5 V, por lo que basta aplicar una regla de tres simple para la conversión.

$$1024 \text{ bits} \rightarrow 5V$$

$$\text{bits medidos} \rightarrow X V$$

Esta misma metodología se replicó a lo largo de 60 días de mediciones.

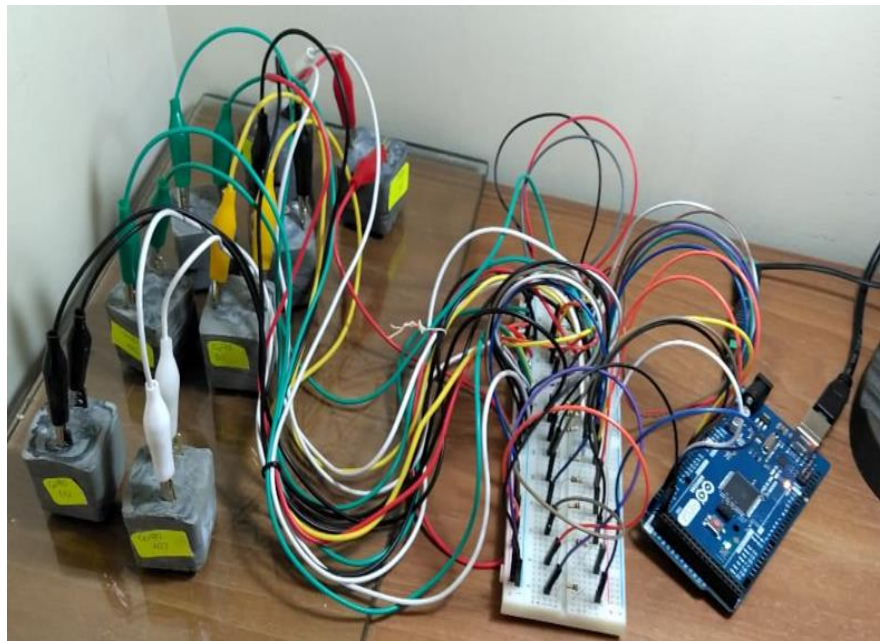
Con los valores medidos de la caída de voltaje se calculó la resistencia que presenta cada muestra al paso de una corriente eléctrica. Esto se consigue al aplicar la ecuación de un divisor de voltaje: $V_o = \frac{R_H}{R_1 + R_H} \cdot V_i$, donde V_o es la caída de voltaje medida, V_i es el voltaje de la fuente (5V), R_1 es el valor de la resistencia de 10 k Ω y R_H es el valor de la resistencia que presenta la muestra.

Seguidamente se calculó la conductividad eléctrica de las muestras aplicando la ecuación de la Ley de Pouillet: $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$, donde ρ es la resistividad que presentan las muestras, L es su longitud y A es su área transversal. Para este caso, las muestras son cubos de 30 mm de arista. La conductividad eléctrica es el inverso de la resistividad:

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho}$$

Figura 30

Sistema de adquisición y recolección de datos



Fase Mecánica

Para esta etapa se ocupó la norma NTE INEN 488:2009. La cual establece el método de ensayo de resistencia a la compresión para cubos de 50 mm de arista de cemento hidráulico.

Preparación de las Muestras

La NTE INEN 488 dicta que primero se preparan los moldes para los especímenes. En este paso se cubre las caras interiores del molde con una capa delgada de un agente desmoldante (como aceites o grasas), utilizando un paño impregnado u otro elemento adecuado.

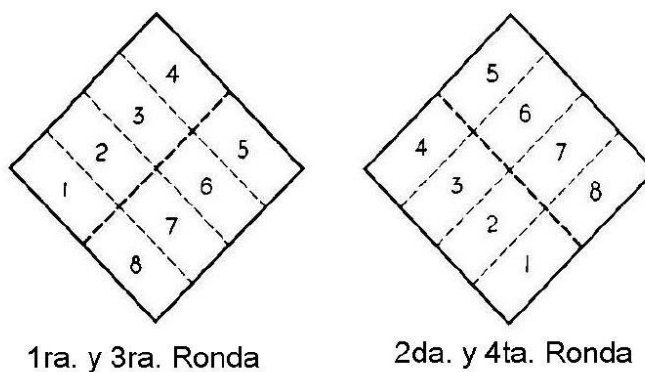
Para el mezclado se usó la norma NTE INEN 155:2009. La cual describe el método para el mezclado mecánico de pastas y morteros. Según la cual, el mezclado se hace de la siguiente manera:

1. Colocar el agua en el tazón de mezclado.
2. Añadir el cemento y dejarlo reposar 30 segundos.
3. Arrancar la mezcladora a velocidad baja por 30 segundos.
4. Detener la mezcladora por 15 segundos, tiempo en el cual se empuja hacia abajo toda la pasta que se haya adherido a las paredes del tazón.
5. Arrancar la mezcladora a velocidad media y mezclar por 60 segundos.

El llenado de los moldes debe realizarse dentro de un rango de tiempo no mayor a 2 minutos 30 segundos después de completarse el proceso de mezclado. Se vierte la mezcla en 2 capas: la primera cubrirá la mitad del molde y la siguiente la otra mitad. Tras verter cada capa se realiza un apisonado manual dictado por la norma.

Figura 31

Apisonado manual especímenes de ensayo



Nota. Recuperado de "NTE INEN 488:2009."

Figura 32

Molde y probetas para ensayos mecánicos



Tratamiento y Curado

Se dejó reposar a los especímenes 24 horas en los moldes, posterior a esto se embebieron en agua mineral por 7, 14, 21 y 28 días como se presenta en la figura 33.

En la tabla 11 se muestra la edad, tiempos permisibles y tolerancias para los ensayos.

Figura 33

Probetas en reposo bajo agua mineral

**Tabla 11**

Tolerancia admisible para la edad de ensayo de cubos

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	± 0.5 hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

Nota. Recuperado de “NTE INEN 488:2009” por NTE INEN, 2009

Determinación Resistencia a la Compresión

Se verifica que la muestra presente una condición de superficie seca y que no posea algún tipo de impureza en las caras que estarán en contacto con los bloques de apoyo. Se posiciona a la probeta en la máquina de ensayo, de manera que la carga se aplique a las dos caras de manera uniforme. (NTE INEN, 2009).

En la figura 34 se muestra una fotografía de los ensayos a compresión realizados.

Figura 34

Ensayo a compresión



La resistencia a la compresión se determina mediante la ecuación 3:

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Donde:

P : Carga total máxima de la falla en kN

A : Área de la sección transversal del cubo a la que se aplica la carga, en m^2

Fase Reológica

En esta fase se realizó un estudio de las curvas de flujo estacionario en las mezclas ensayadas en la fase mecánica mediante el reómetro Discovery Hybrid DHR-2 y el software TRIOS. Para los ensayos se reprodujo cuatro veces el mismo experimento en cada una de las mezclas ensayadas para verificar si se obtiene repetibilidad.

El modelado del experimento se desarrolló en dos etapas. La primera, subdividida en dos pasos: destrucción y construcción del fluido, consistió en mantener la velocidad de cizalla constante a $100 [s^{-1}]$ y $1 [s^{-1}]$ cada una durante $120 [s]$; esto con el fin de observar si con estas variables se obtiene un valor de viscosidad estacionario y establecer los parámetros de la siguiente etapa. En la figura 35 se presentan los valores de las variables empleadas en la primera etapa de modelado.

Figura 35

Variables primera etapa modelado experimento en software Trios

1: Flow Peak Hold

Environmental Control
 Temperature °C Inherit Set Point
 Soak Time s Wait For Temperature

Test Parameters
 Duration s
 Shear Rate 1/s
 Inherit initial value
 Sampling interval s/pt

2: Flow Peak Hold

Environmental Control
 Temperature °C Inherit Set Point
 Soak Time s Wait For Temperature

Test Parameters
 Duration s
 Shear Rate 1/s
 Inherit initial value
 Sampling interval s/pt

La segunda etapa fue la obtención de la curva de flujo estacionario. Esta fue subdividida en dos pasos: el primero consistió en realizar una precizalla al fluido a una velocidad constante de $100 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ durante 360 [s] para romper la microestructura y vencer la inercia inicial del mismo. Seguidamente se varió la velocidad de cizalla desde $100 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ hasta $1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ y se tomó tríos de datos con una tolerancia de desviación máxima entre ellos del 10% cada 30 segundos 10 veces. Para la obtención de la gráfica de la curva de flujo estacionario se promedió cada uno de los tríos de datos y se dibujó la curva. En la figura 36 se presentan los parámetros empleados.

Figura 36

Parámetros para la obtención de curva de flujo estacionario en software Trios

1: Flow Peak Hold

Environmental Control

Temperature °C Inherit Set Point

Soak Time s Wait For Temperature

Test Parameters

Duration s

Shear Rate 1/s

Inherit initial value

Sampling interval s/pt

2: Flow Sweep

Environmental Control

Temperature °C Inherit Set Point

Soak Time s Wait For Temperature

Test Parameters

Logarithmic sweep

Shear rate 1/s to 1/s

Points per decade

Steady state sensing

Max. equilibration time s

Sample period s

% tolerance

Consecutive within

Scaled time average

En la figura 37 se muestra una fotografía del ensayo reológico realizado.

Figura 37

Ensayo reológico



Capítulo IV

Análisis de Resultados

En el capítulo siguiente se describirán los resultados obtenidos una vez realizados los ensayos eléctricos, mecánicos y reológicos. Además, se analizará y discutirá el comportamiento que presentaron las muestras de cemento con la adición de partículas de carbono en base a los datos cuantitativos recolectados de la experimentación.

Resultados Eléctricos

Con estos ensayos, lo que se busca es estudiar el comportamiento de la conductividad eléctrica que presentan las muestras a base de cemento cuando se les agrega micro partículas de varios tipos de carbono. Para lo cual, mediante un divisor de voltaje, se cuantificó el voltaje que cae en cada una de las muestras cuando forman parte de un circuito eléctrico cerrado de corriente continua. (Véase figura 29).

Comportamiento de la Caída de Voltaje

Se hicieron mediciones durante los primeros 14 días después de solidificadas las muestras; con el objetivo de observar una tendencia en la caída de voltaje y, al mismo tiempo, verificar si las partículas de carbono agregadas tienen algún efecto sobre el material cementoso. Para esto, adicionalmente se ha ensayado una muestra que contiene únicamente pasta de cemento, que servirá para comparar los comportamientos.

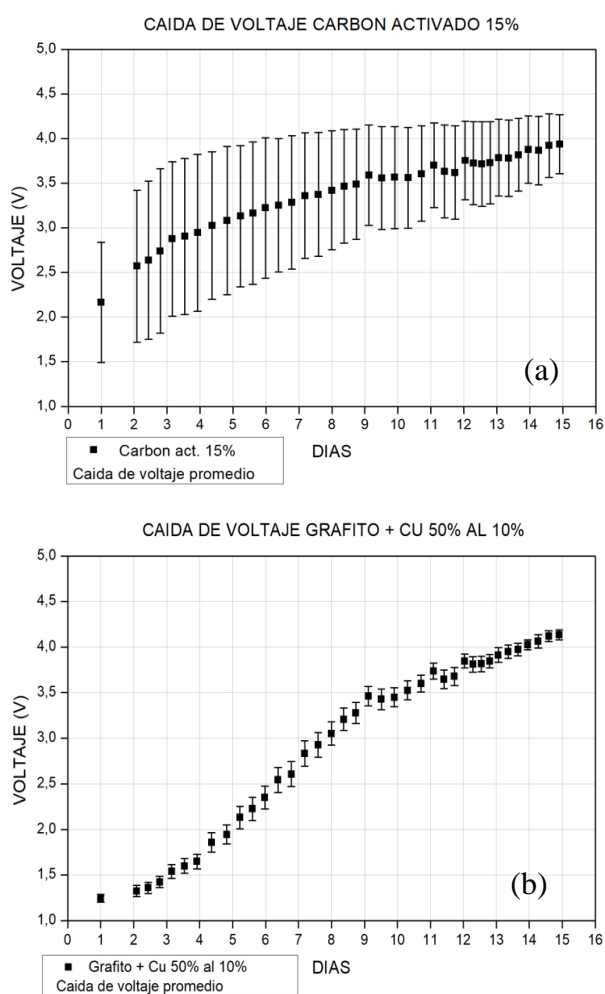
Las primeras impresiones al realizar estos ensayos fueron que las mediciones de la caída de voltaje registradas muestran un comportamiento creciente con la edad de la muestra (en días) y tienden a converger a un valor entre 3,5 y 4,5 V. Sin embargo, en algunos casos, no todos los testigos de una misma muestra presentaron una correlación

exacta. Por lo que se trabajó con el promedio de ambas mediciones. En la figura 38 se muestra este comportamiento.

En el anexo C se presentan las gráficas de Caída de voltaje vs Edad para más muestras ensayadas.

Figura 38

Caída de voltaje vs Edad muestra para 14 días

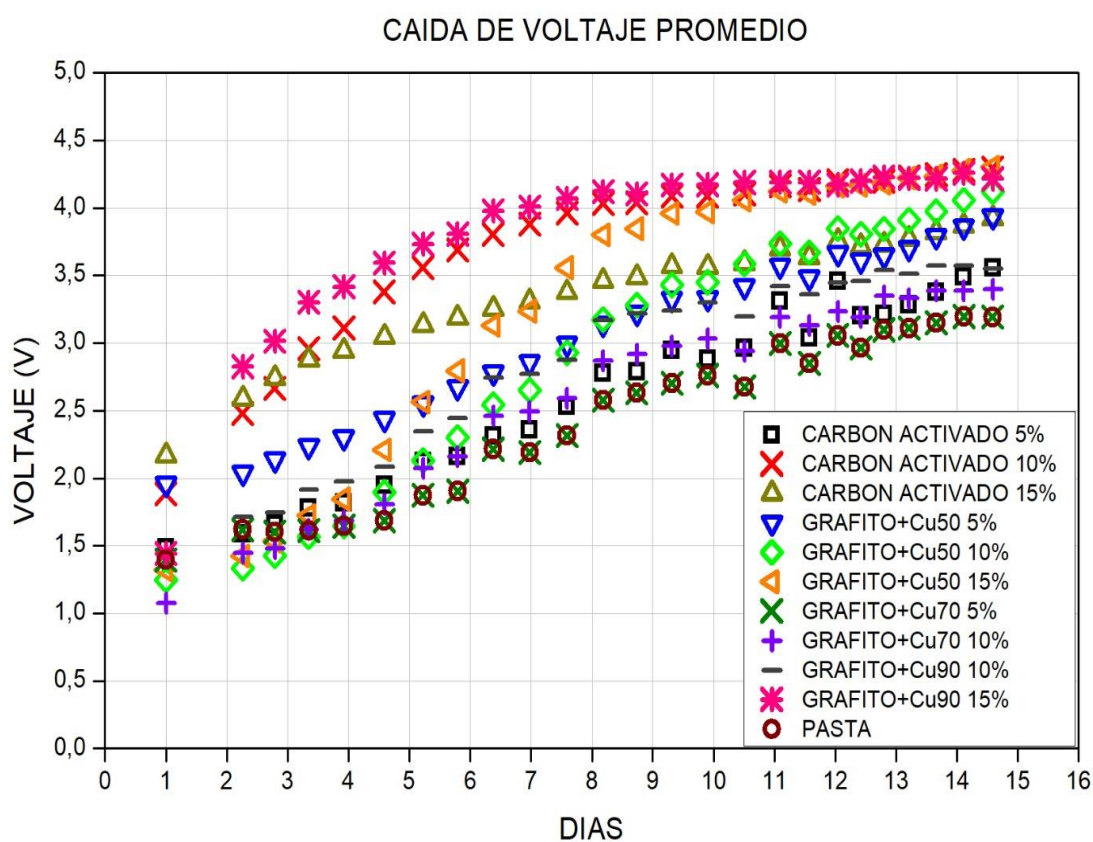


Nota. (a) Ambos testigos de la muestra de carbón activado al 15% no se correlacionan directamente. (b) Los testigos de la muestra de grafito + Cu 50% al 10% presentan una buena correlación.

Al comparar el comportamiento de las muestras con partículas de carbono agregadas con la muestra de pasta de cemento, se observa que varias de las muestras, con carbonos agregados, presentan una mayor caída de voltaje y tienden a estabilizarse en un valor máximo más rápidamente. La figura 39 exhibe este comportamiento.

Figura 39

Promedio de la caída de voltaje vs Edad para diferentes tipos de carbonos y pasta base



A partir de estos primeros resultados observamos que los carbonos agregados influyen en la caída de voltaje. Además, se tiene muestras que tienen más o menos correlación entre sí. Por lo que se tomó, para la siguiente serie de ensayos, las

muestras con la mejor correlación; una muestra intermedia y la muestra con la mayor desviación con respecto a su promedio. Estas muestras escogidas fueron:

1. Carbón activado al 5%
2. Carbón activado al 10%
3. Grafito + Cu50 al 10%
4. Grafito + Cu50 al 15%
5. Grafito + Cu70 al 5%
6. Grafito + Cu70 al 10%
7. Grafito + Cu90 al 10%
8. Grafito + Cu90 al 15%

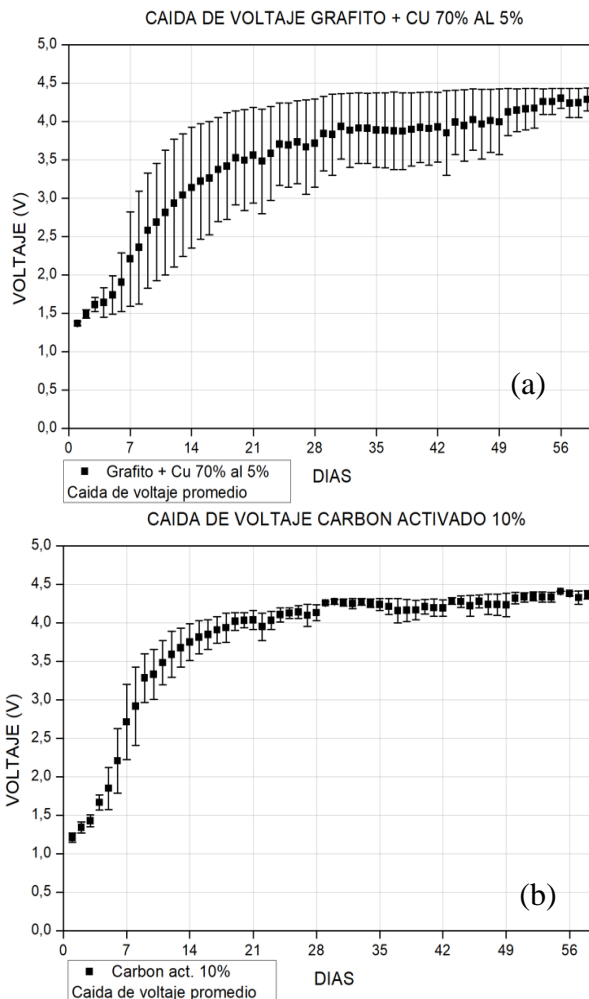
Se realizó una segunda serie de ensayos eléctricos con las 8 muestras enumeradas anteriormente. Para esto, se repitió el procedimiento de mezclado y se hicieron mediciones de la caída de voltaje, esta vez, durante 60 días. Esto con el fin de estudiar en qué valor se llegan a estabilizar las mediciones y cuánto tiempo se tarda en ello.

Se distingue nuevamente que ciertos testigos de una misma muestra no se correlacionan directamente. En la figura 40 se exhibe el comportamiento de dos muestras para esta segunda serie de ensayos.

En el anexo D se presentan las gráficas de Caída de voltaje vs Edad las demás muestras ensayadas.

Figura 40

Caída de voltaje vs Edad muestra para 60 días



Nota. (a) Ambos testigos de la muestra de grafito + Cu 70% al 5% no se correlacionan directamente. (b) Los testigos de la muestra de carbón activado al 10% presentan una buena correlación.

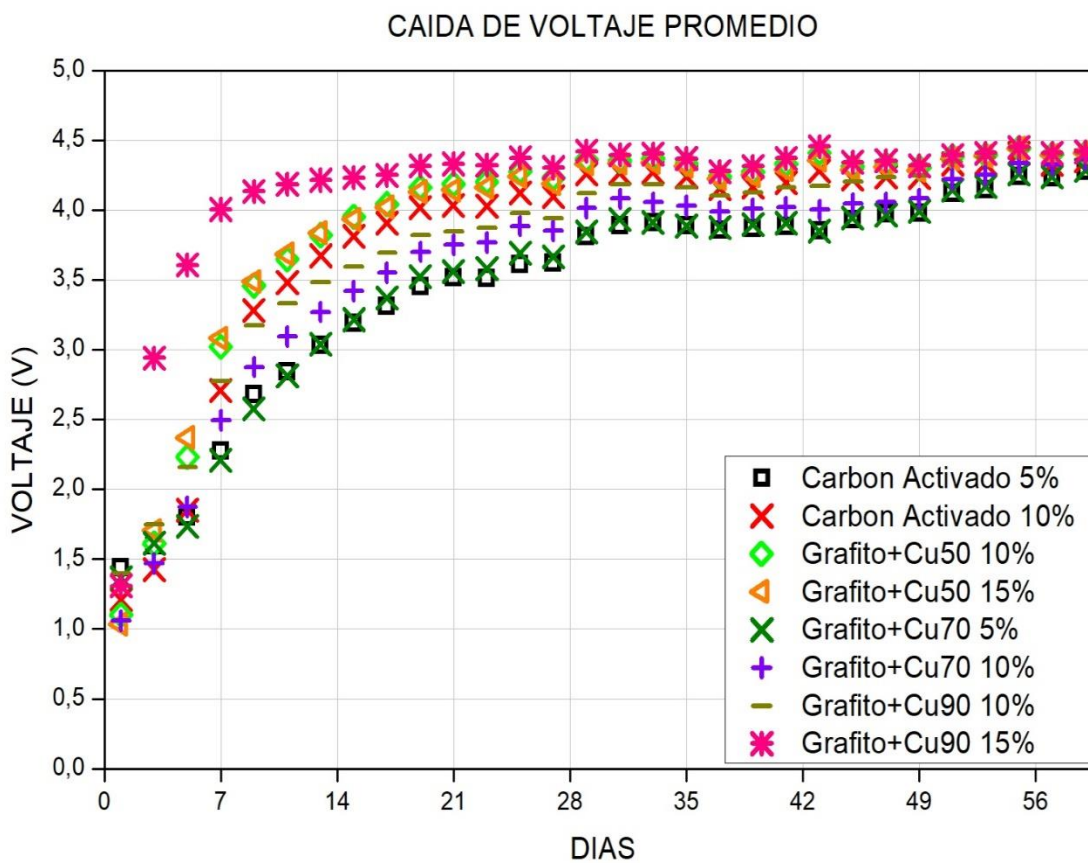
Ahora, con un rango de medición mucho más amplio, se puede apreciar la evolución del comportamiento de la caída de voltaje. Se mantiene una tendencia creciente conforme el paso del tiempo y se llegan a estabilizar las mediciones en un

rango entre 4 y 4,5 V. A partir de este rango, las mediciones permanecen aproximadamente constantes.

En la figura 41 se presentan los promedios de mediciones de la caída de voltaje para las muestras ensayadas. En esta gráfica se observa que aproximadamente a partir del vigésimo octavo día el comportamiento de la caída de voltaje comienza a ser constante en el tiempo para todas las muestras. Además, la curva de la muestra de Grafito + Cu 90% al 15% es la que más rápido llega a estabilizarse.

Figura 41

Promedio de la caída de voltaje vs Edad muestra para diferentes tipos de carbonos



El comportamiento que exhiben las muestras tiene una gran similitud a una curva de carga de un capacitor: cuando se le aplica voltaje a un capacitor, este se carga en función del tiempo y acumula energía (voltaje) a medida que fluye la corriente en un circuito eléctrico. La velocidad de carga, más rápida o más lenta, depende de la constante de carga que a la vez depende de la capacitancia que tiene el capacitor. Si la capacitancia es baja, se demora en cargar y vice versa.

Se observa que estas muestras son un material capacitivo de baja constante, por eso tienden a cargarse muy lentamente (toma días), pero una vez que se llega al máximo se quedan cargadas y eso sucede a partir del vigésimo octavo día de fraguado. Por esto, una vez cargado, la medición de voltaje comienza a ser constante.

Las muestras que mejor se ajustaron respecto a su promedio y, con las que se realizarán posteriormente los ensayos mecánicos y reológicos, fueron:

1. Carbón activado al 10%
2. Grafito + Cu50 al 10%
3. Grafito + Cu50 al 15%
4. Grafito + Cu90 al 15%

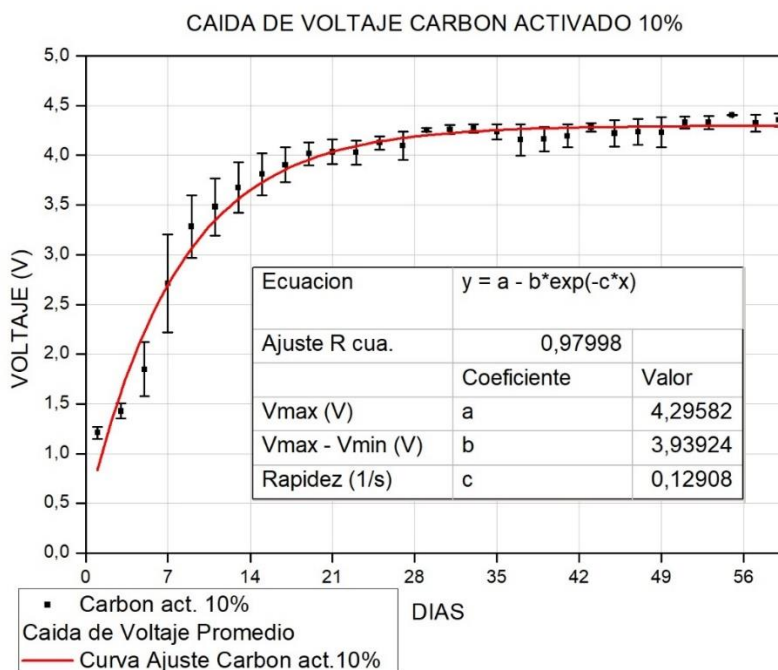
Mediante un modelo de crecimiento exponencial se obtuvieron las curvas de ajuste de la caída de voltaje promedio en función de la edad de la muestra. Esto con el fin de cuantificar en qué valor máximo de voltaje se estabilizan las mediciones y con qué rapidez se alcanza.

El modelo fue del tipo: $V(t) = A - Be^{-Ct}$, donde el coeficiente A es el valor del voltaje máximo alcanzado, B es la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo, C es la rapidez o tasa de crecimiento y t es el tiempo en días. El coeficiente de

determinación (R^2) obtenido en la mayoría de casos fue superior a 0.97, lo cual indica que el modelo de regresión utilizado es el adecuado para describir el fenómeno.

Figura 42

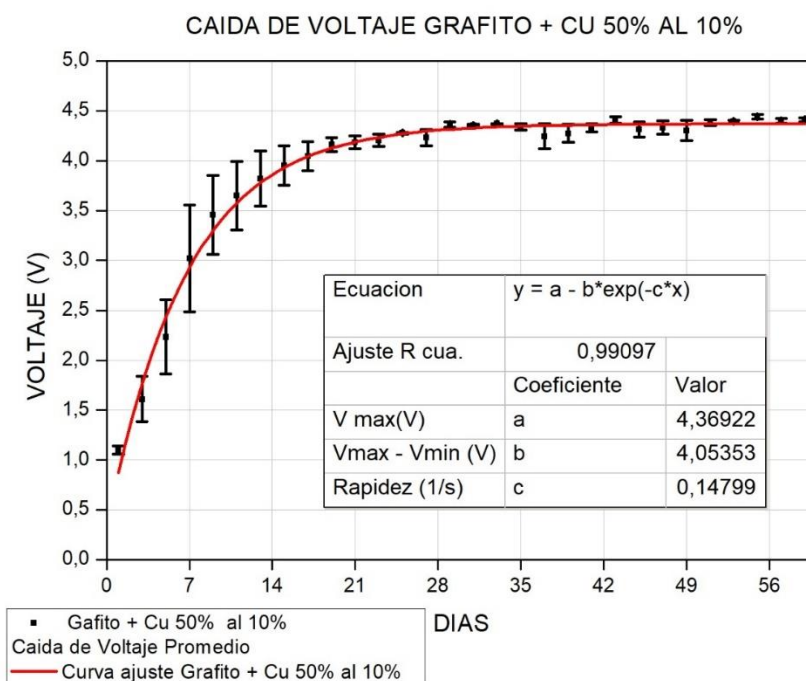
Caída de voltaje vs Edad muestra carbón activado al 10%



La mezcla con adición de carbón activado al 10%, presenta un incremento de la caída de voltaje con respecto al tiempo de fraguado. Para el séptimo día se observa una barra de error mayor a la de los otros días de ensayo, teniendo una desviación estándar de $\pm 0.49[V]$. El máximo valor de voltaje medido al sexagésimo día fue de $4.40 [V]$. Además, este espécimen presentó una tasa de crecimiento de $0.13 [1/s]$ y un rango de crecimiento de $3.94 [V]$.

Figura 43

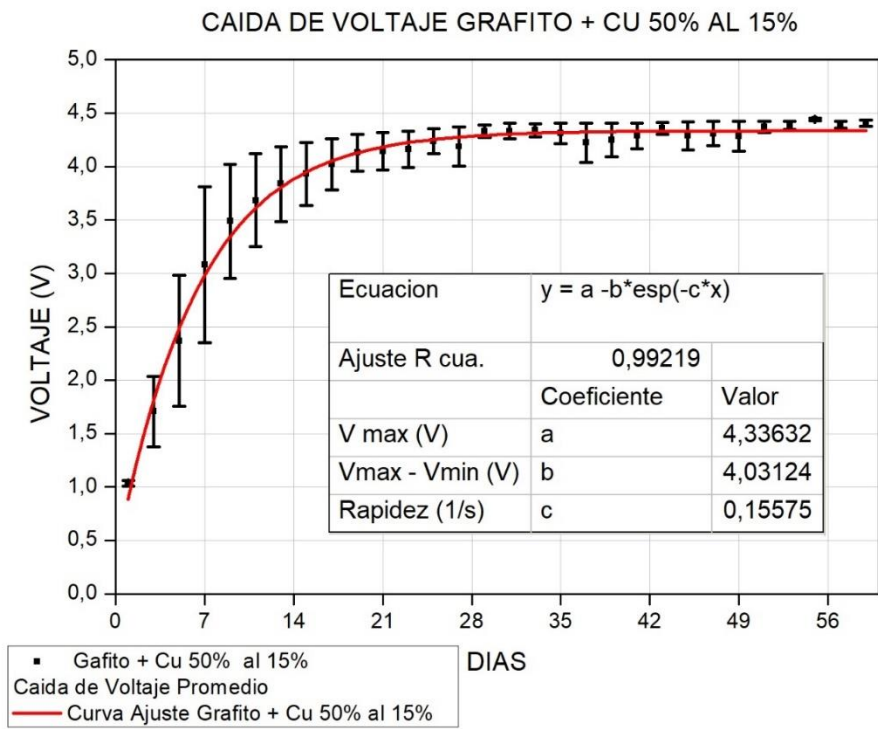
Caída de voltaje vs Edad muestra grafito + Cu 50% al 10%



La mezcla con adición de grafito + Cu 50% al 10% presenta un incremento de la caída de voltaje con respecto al tiempo de fraguado. Para el octavo día se tiene una barra de error mayor a la de los otros días de ensayo, teniendo una desviación estándar de $\pm 0.54[V]$. El máximo valor de voltaje medido al sexagésimo día fue de $4.46 [V]$. Además, este espécimen presentó una tasa de crecimiento de $0.148 [1/s]$ y un rango de crecimiento de $4.05 [V]$.

Figura 44

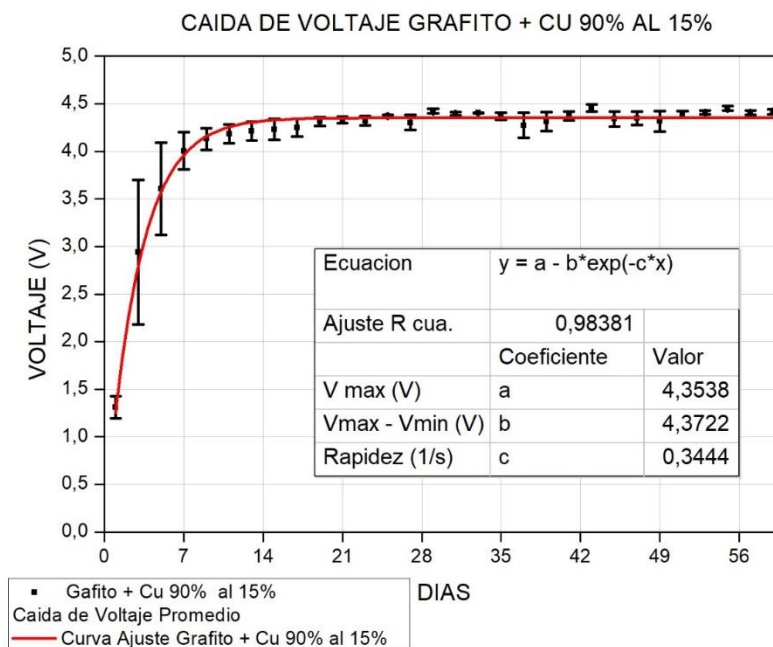
Caída de voltaje vs Edad muestra grafito + Cu 50% al 15%



La mezcla con adición de grafito + Cu 50% al 15% presenta un incremento de la caída de voltaje con respecto al tiempo de fraguado. Para el sexto día se tiene una barra de error mayor a la de los otros días de ensayo, teniendo una desviación estándar de $\pm 0.73[V]$. El máximo valor de voltaje medido al sexagésimo día fue de $4.46 [V]$. Además, este espécimen presentó una tasa de crecimiento de $0.15 [1/s]$ y un rango de crecimiento de $4.03 [V]$.

Figura 45

Caída de voltaje vs Edad muestra grafito + Cu 90% al 15%



La mezcla con adición de grafito + Cu 90% al 15% presenta un incremento de la caída de voltaje con respecto al tiempo de fraguado. Para el tercer día se tiene una barra de error mayor a la de los otros días de ensayo, teniendo una desviación estándar de $\pm 0.76[V]$. El máximo valor de voltaje medido al sexagésimo día fue de $4.47 [V]$. Además, este espécimen presentó una tasa de crecimiento de $0.34 [1/s]$ y un rango de crecimiento de $4.37 [V]$.

Comparación Resultados Ensayo Eléctrico Mejores Tipos de Carbonos

En la tabla 12 se presentan un resumen de los coeficientes obtenidos del modelo de ajuste, de donde destacamos que las mezclas con adición de grafito + Cu 90% al 15% y grafito + Cu 50% al 10% presentaron los mayores valores de caída de voltaje máxima alcanzada, siendo de $4.3538 [V]$ y $4.3692 [V]$ respectivamente. Sin embargo, el primero presentó la mayor tasa de crecimiento; con $0.34 [1/s]$ y el mayor

rango de crecimiento; con 4.3722 [V]. Esto nos indica que esta muestra es la que más rápido se carga eléctricamente.

Por otro lado, la mezcla con adición de carbón activado al 10% presentó el menor valor de caída de voltaje máxima alcanzada, siendo de 4.2958 [V]. Además, este espécimen presentó la menor tasa de crecimiento; con 0.1290 [1/s] y el menor rango de crecimiento; con 3.9392 [V]. Por lo que esta muestra se carga eléctricamente menos en un 1.67% y lo hace con una rapidez menor en un 60%.

Tabla 12

Resumen coeficientes ecuación de ajuste para ensayos eléctricos

Agregado	Caída de Voltaje			
	Coef. Determinación R2	Voltaje Máximo A (V)	Rango crecimiento B (V)	Rapidez C (1/s)
Carbón Activado al 10%	0.9799	4.2958	3.9392	0.1290
Grafito + CU 50% al 10%	0.9909	4.3692	4.0535	0.1479
Grafito + CU 50% al 15%	0.9921	4.0312	4.0312	0.1557
Grafito + CU 90% al 15%	0.9838	4.3538	4.3722	0.3444

En el Anexo E se presenta la tabla de resultados de los ensayos eléctricos para los mejores tipos de carbonos durante los 60 días de medición.

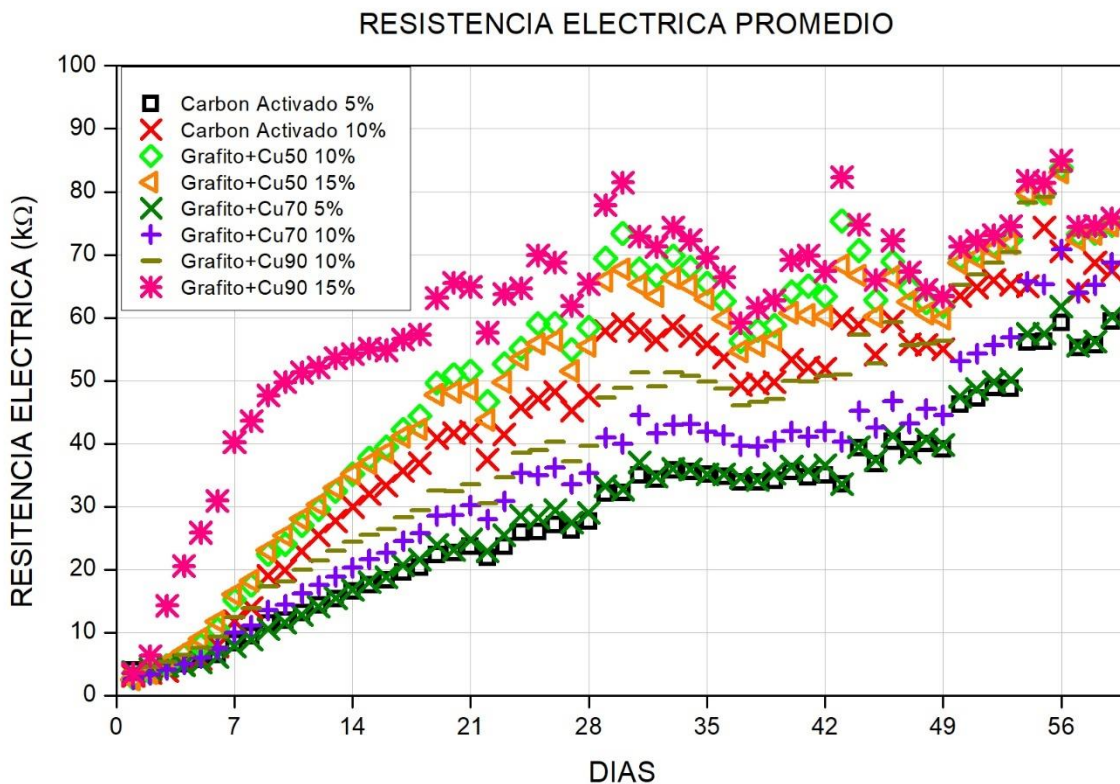
Comportamiento de la Resistencia Eléctrica

Un estudio de la evolución de la resistencia eléctrica que presentan las muestras se puede realizar aplicando los conceptos de divisor de voltaje en circuitos eléctricos de corriente continua. La figura 46 muestra que la resistencia promedio que presentan las muestras manifiestan un comportamiento creciente con la edad de la muestra. Por lo que se infiere que a medida que pasa el tiempo de fraguado, el material se vuelve más resistivo. Esto es lógico ya que en los primeros días el material a base de cemento tiene

aún cierto porcentaje de agua de la mezcla que promueve algo de conductividad eléctrica y, al irse secando conforme el paso de los días, pierde esta propiedad.

Figura 46

Promedio de la resistencia eléctrica vs Edad muestra para diferentes tipos de carbonos

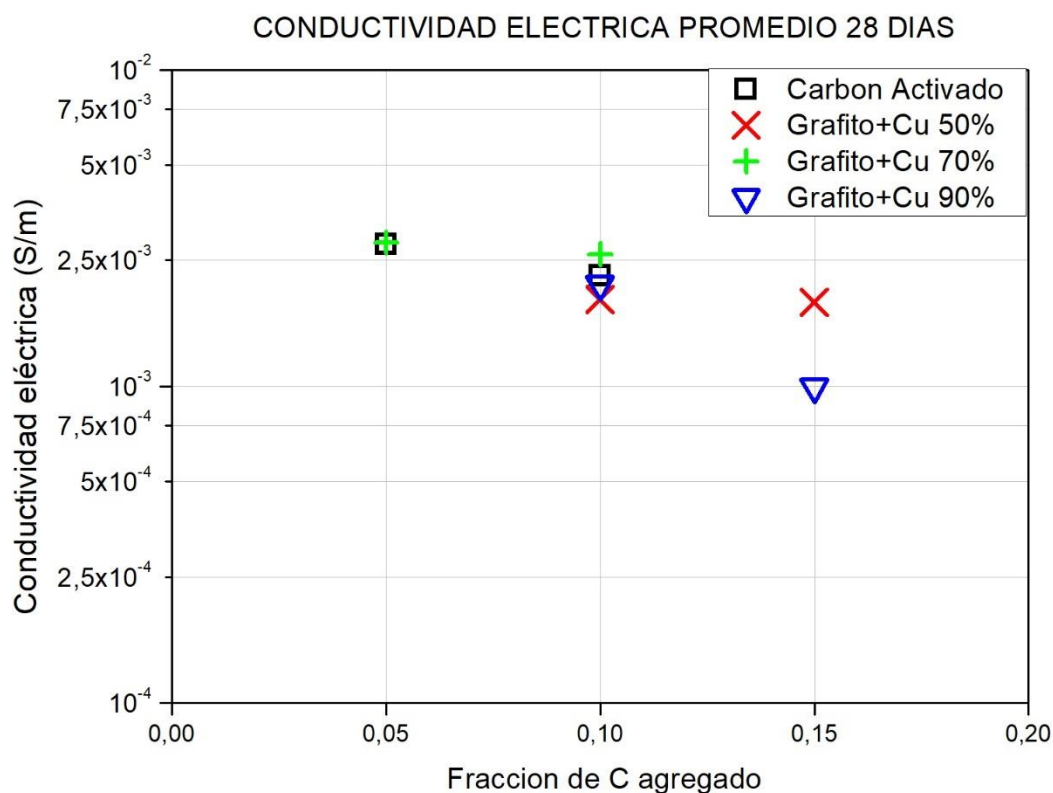


Sin embargo, una resistencia pura se comporta en forma lineal. Esto significa que la resistencia es una constante de proporcionalidad entre voltaje y corriente. No puede variar y no es dependiente del tiempo. En este estudio sí tenemos una variación de resistencia en el tiempo, como lo evidencia la figura 45; esta es otra razón para pensar que hemos obtenido un material que no es enteramente resistivo, porque no se comporta como tal. Si no que, además, tenemos el comportamiento de un capacitor.

Una relación de interés en este estudio es la influencia de la proporción de carbonos agregados a las muestras en la conductividad. Con los datos medidos se determina que esta relación es inversa. La figura 48 ilustra que la conductividad eléctrica promedio de 28 días decrece con el aumento del porcentaje de carbono agregado. Teniendo una mejor conductividad con la menor proporción, que fue del 5% en peso de cemento.

Figura 48

Promedio de la conductividad eléctrica vs Porcentaje de carbono agregado



Se observa que, incluso la muestra con Grafito +Cu 90%, presenta una menor conductividad eléctrica cuando se aumenta su fracción de agregado. Lo esperado sería que, a mayor cobre, mayor conductividad y a menor cobre, menor conductividad. Sin

embargo, el comportamiento de la figura 48 evidencia lo contrario y se debe a la heterogeneidad de la mezcla que obtuvimos.

En un conductor, las partículas de cobre están perfectamente estructuradas, por lo que la corriente atraviesa sin encontrar ningún obstáculo. Pero en nuestro caso el cobre, en lugar de hacer más conductora a la muestra, la está haciendo más aislante porque resulta que el cobre está totalmente disperso y la corriente eléctrica no sigue el camino recto de una estructura homogénea. La corriente comienza a buscar las partículas de cobre y, debido a la tortuosidad y a que no se ha alcanzado un umbral de percolación, se demora más en atravesar el material y presenta una mayor resistencia eléctrica.

La lógica de la naturaleza es que los electrones siempre buscan un medio por donde conducirse y ese medio es un metal o un semiconductor. Cuando encuentra una partícula de cobre dispersa se dirige hacia allá y comienza a describir un camino totalmente irregular, y esto lo que hace es aumentar el nivel de resistividad.

Resultados Mecánicos

Para los ensayos mecánicos se experimentó con los tipos de carbono que presentaron un mejor comportamiento en la fase eléctrica; adicionalmente se ensayó pasta de cemento para observar cómo ha variado la resistencia mecánica de las mezclas más el agregado. Se elaboraron tres especímenes de prueba para cada período de ensayo, según lo dicta la norma NTE INEN 488:2009. La relación A/C fue de 0.42 en todas las mezclas, tal como se detalló en el literal 3.3.1.3. Para el análisis de resultados se utilizó el valor de resistencia promedio de las tres probetas ensayadas.

Finalmente, se ajustó los puntos a un modelo del tipo: $\sigma(t) = A(1 - e^{-Bt})$, siendo A el valor de resistencia máxima alcanzada B la rapidez a la que se llega al

coeficiente A y t el tiempo en días al que se desea la resistencia. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido en la mayoría de casos fue superior a 0.97, lo cual indica que el modelo de regresión utilizado es el adecuado para describir el fenómeno.

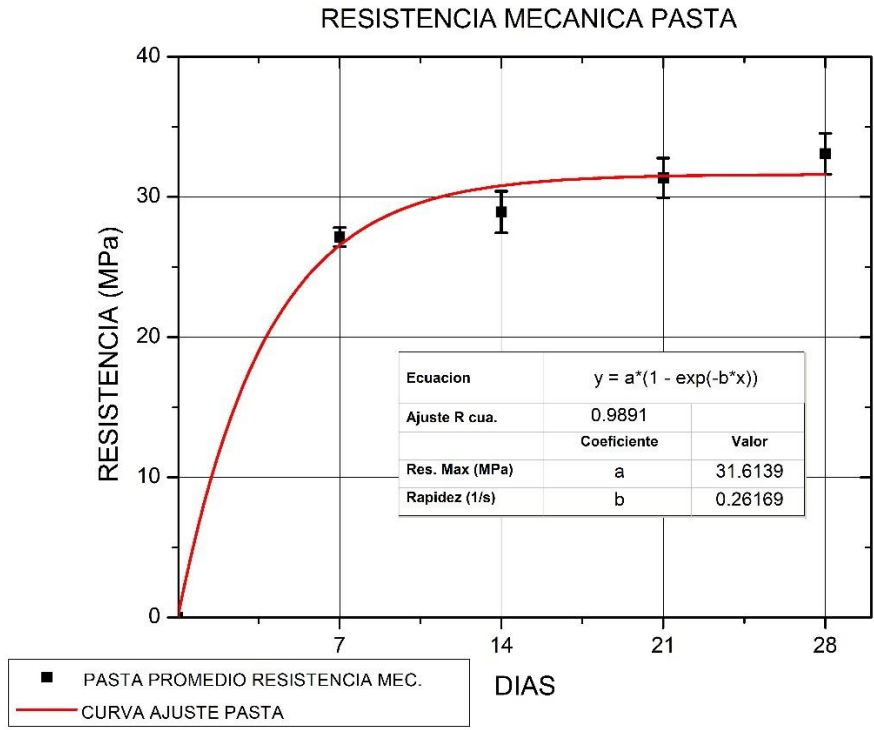
A continuación, se presentan los resultados gráficos obtenidos. Mientras que en el Anexo F se encuentran la tabulación de los datos registrados.

Resultados Ensayo de Compresión Pasta de Cemento

En la figura 49 se ilustra el comportamiento de la resistencia mecánica de la muestra en adición de carbón activado al 10%, obtenida a partir de los ensayos a compresión.

Figura 49

Resistencia Promedio vs Edad muestra pasta base



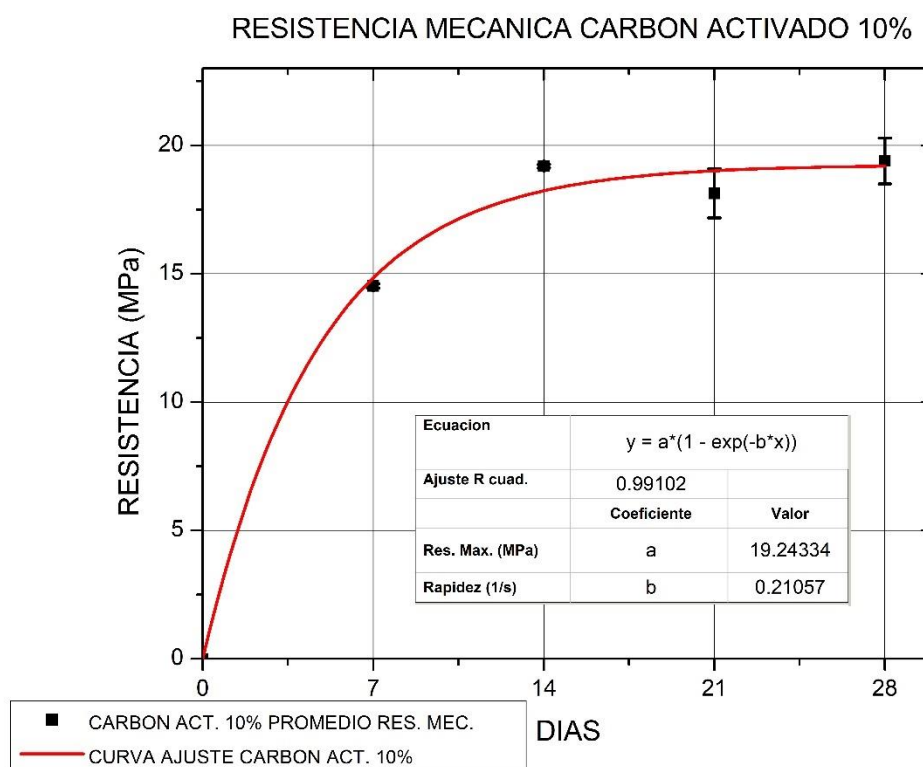
Para la pasta base, se observa un incremento de la resistencia mecánica con respecto al tiempo de fraguado, obteniéndose un valor máximo de la misma al vigésimo octavo día de 33.07 [MPa].

Resultados Ensayo de Compresión Carbón Activado a una Dosificación del 10 %

En la figura 50 se ilustra el comportamiento de la resistencia mecánica de la muestra en adición de carbón activado al 10%, obtenida a partir de los ensayos a compresión.

Figura 50

Resistencia promedio vs Edad muestra carbón activado al 10%



La mezcla con adición de carbón activado al 10% presenta un incremento de la resistencia mecánica con respecto al tiempo de fraguado. Para el vigésimo primer día

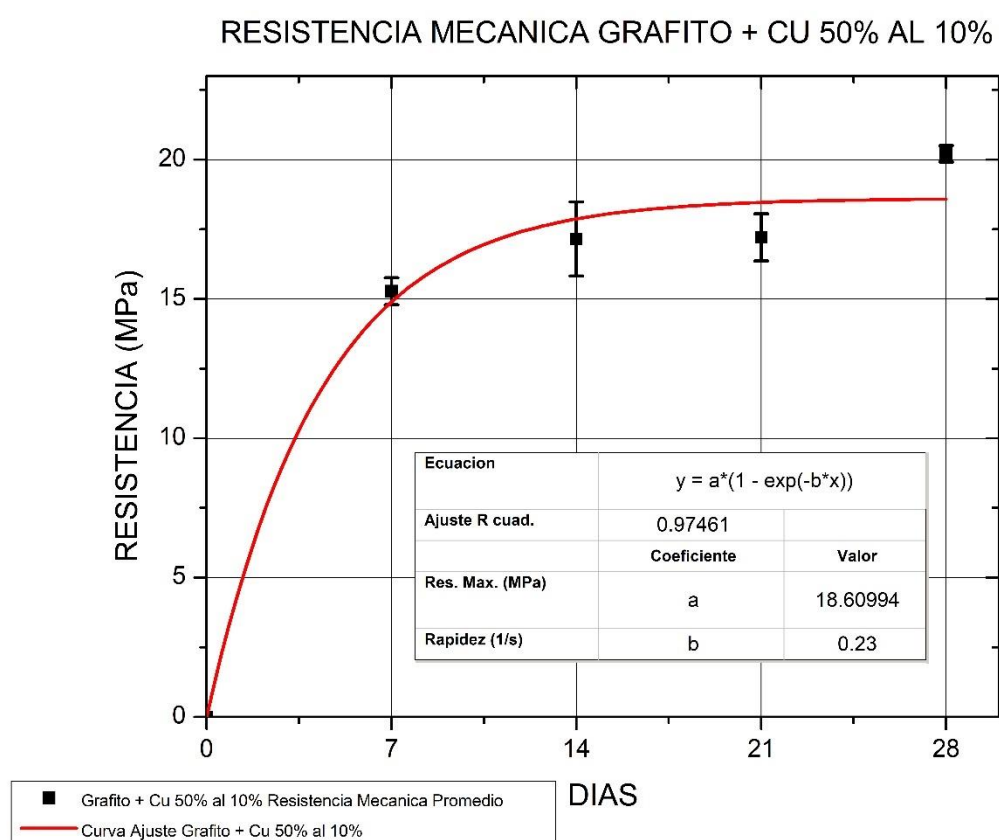
se observa una disminución de la resistencia comparada a la del décimo cuarto día lo cual es un comportamiento inesperado para este tipo de materiales. Así mismo a partir de este día las barras de error crecen. El máximo valor de resistencia se exhibe al vigésimo octavo día siendo de 19.39 [MPa].

Resultados Ensayo de Compresión Grafito + Cu 50% a una Dosificación del 10 %

En la figura 51 se ilustra el comportamiento de la resistencia mecánica de la muestra en adición de grafito + Cu 50% al 10%, obtenida a partir de los ensayos a compresión.

Figura 51

Resistencia promedio vs Edad muestra grafito + Cu 50% al 10%



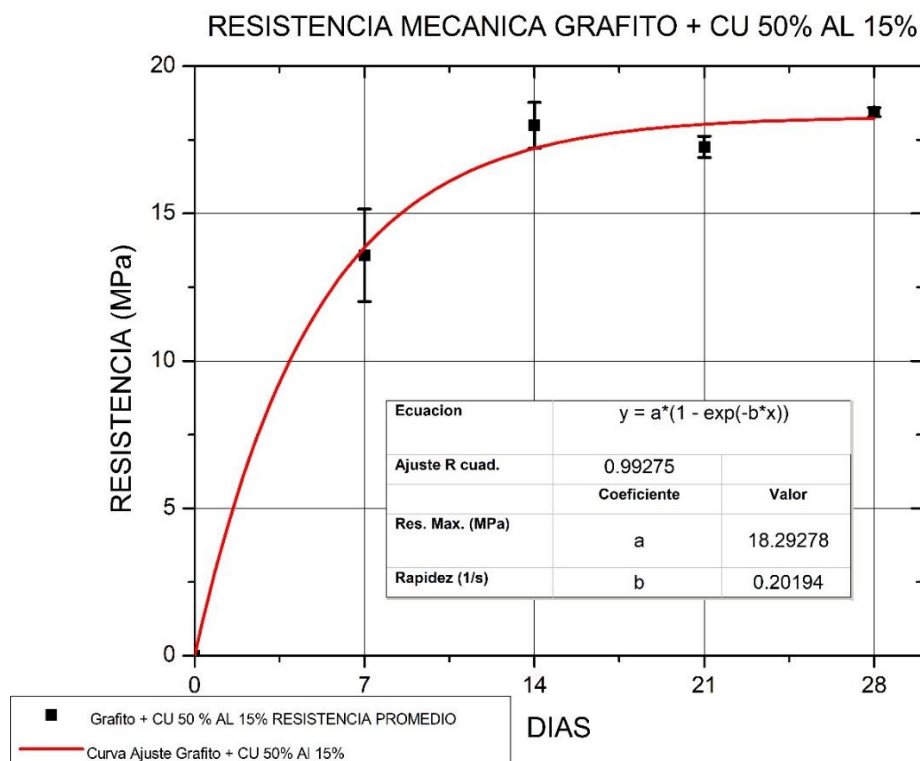
La mezcla con el agregado grafito + CU 50% al 10% presenta un incremento de la resistencia mecánica con respecto al tiempo de fraguado. Para el décimo cuarto día se observa una barra de error mayor a la de los otros días de ensayo, teniendo una desviación estándar de ± 2.30 [MPa]. El máximo valor de resistencia se exhibe al vigésimo octavo día siendo de 20.21 [MPa]

Resultados Ensayo de Compresión Grafito + Cu 50% a una Dosificación del 15 %

En la figura 52 se ilustra el comportamiento de la resistencia mecánica de la muestra en adición de grafito + Cu 50% al 15%, obtenida a partir de los ensayos a compresión.

Figura 52

Resistencia promedio vs Edad muestra grafito + Cu 50% al 15%



La mezcla con el agregado grafito + CU 50% al 15% presenta un incremento de la resistencia mecánica con respecto al tiempo de fraguado. Para el séptimo día se observa una barra de error mayor a la de los otros días de ensayo, teniendo una desviación estándar de $\pm 2.71 [MPa]$. Por otra parte, para el vigésimo primer día se observa una disminución de la resistencia comparada a la del décimo cuarto día lo cual es un comportamiento inesperado para este tipo de materiales. El máximo valor de resistencia se exhibe al vigésimo octavo día siendo de $18.44 [MPa]$

Comparación Resultados Ensayo de Compresión Mejores Tipos de Carbonos

En la tabla 13 se presentan un resumen de los coeficientes obtenidos del modelo de ajuste, en la tabla 14 el promedio de resistencia mecánica para los mejores tipos de carbono y en la figura 53 se ilustra el comportamiento de la resistencia en una gráfica.

Tabla 13

Resumen coeficientes ecuación de ajuste para ensayos mecánicos

Propiedades Mecánicas					
Agregado	Coef. Determinación R2	Resistencia Máxima A (MPa)	% Disminución Resistencia	Rapidez B (1/s)	% Disminución Rapidez
Ninguno	0.9891	33.07	0.00%	0.2617	0.00%
Carbón Activado al 10%	0.9910	19.39	41.37%	0.2106	19.53%
Grafito + CU 50% al 10%	0.9746	20.21	38.89%	0.2300	12.11%
Grafito + CU 50% al 15%	0.9927	18.44	44.24%	0.2019	22.85%

Tabla 14

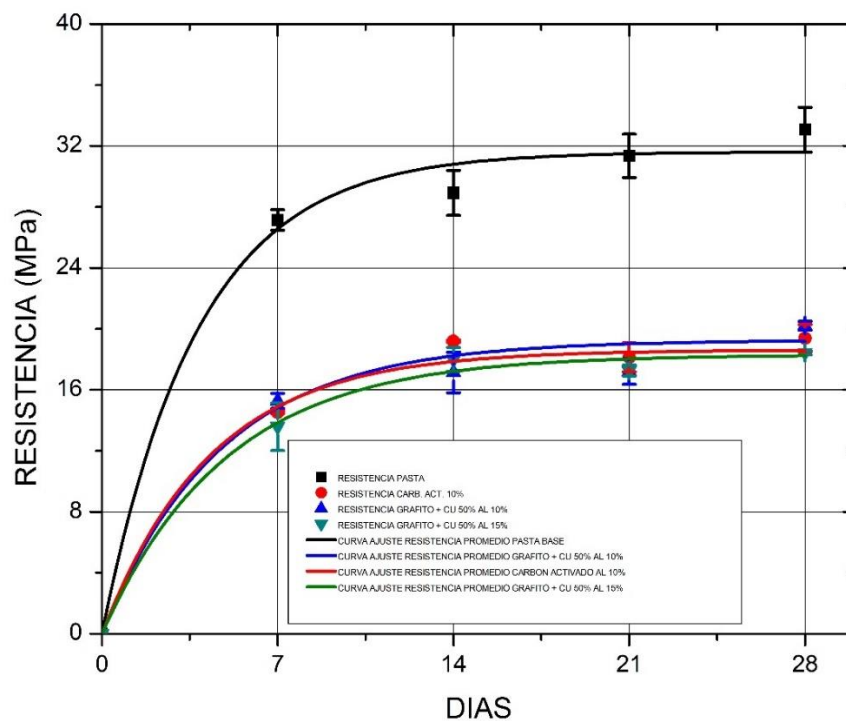
Promedios resultados ensayos de compresión para mejores tipos de carbonos

TIPO C DIAS	Resistencia Mecánica Carbón Activado Al 10% (MPa)	Resistencia Mecánica Grafito + Cu 50 % Al 10 % (MPa)	Resistencia Mecánica Grafito + Cu 50 % Al 15 % (MPa)	Resistencia Mecánica Pasta Base (MPa)
0 D	0	0	0	0
7 D	14.529	15.276	13.586	27.142
14 D	19.185	17.148	17.993	28.917
21 D	18.134	17.208	17.264	31.351
28 D	19.394	20.207	18.442	33.069

Figura 53

Resistencia promedio vs Edad muestra para mejores tipos de carbonos

PROMEDIOS RESISTENCIA MECANICA DIFERENTES TIPOS DE CARBONO



Al observar la figura 53, se determina lo siguiente:

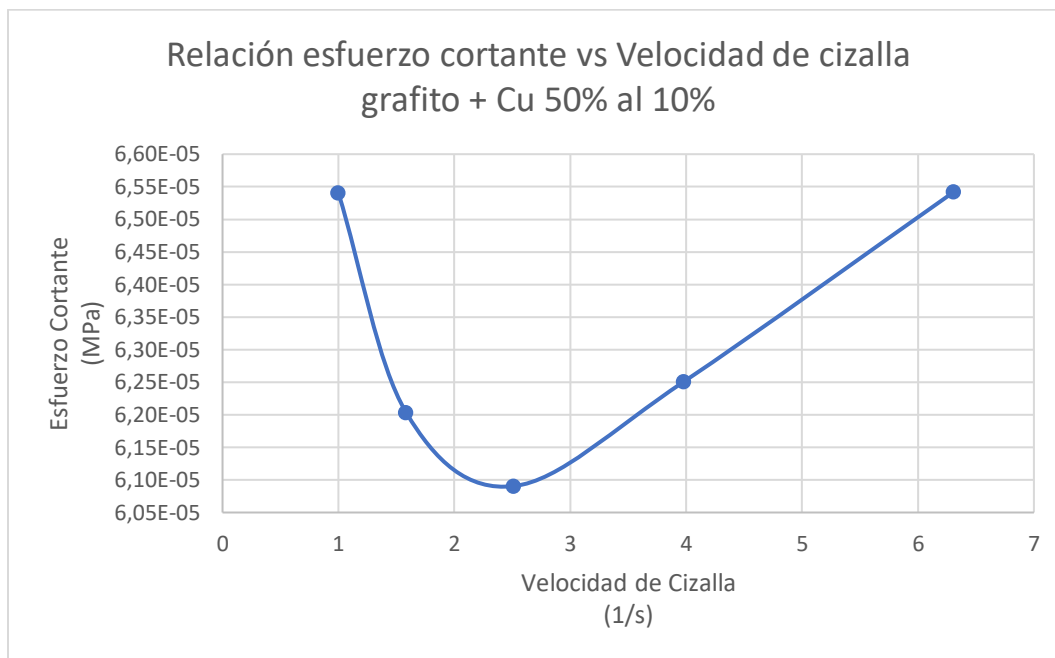
- Los agregados ensayados merman la resistencia mecánica de la pasta base. Los motivos para que esto ocurra se deben a que el carbón es un material poroso retiene partículas de oxígeno que pueden afectar a las reacciones químicas producidas en el cemento en el período del curado. Adicionalmente, el grafito posee una estructura laminar superpuesta; lo cual genera un aumento de los huecos intersticiales, provocando una disminución de la compacidad de la matriz cementosa.
- El agregado grafito + CU 50% a una dosificación del 10%, para el vigésimo octavo día, presenta la mejor resistencia obtenida comparada a la de los otros agregados ensayados. Por el contrario, el agregado grafito + CU 50% a una dosificación del 15%, exhibe la peor resistencia obtenida.
- Las curvas resistencia vs tiempo de fraguado de los agregados ensayados presentan un comportamiento muy similar una con otra. Por ende, el tipo de carbón no es un factor que influye en la resistencia mecánica.

Resultados Reológicos

En la fase reológica se experimentó con los tipos de carbonos ensayados mecánicamente. Por otra parte, para las gráficas Esfuerzo cortante vs Velocidad de Cizalla, a velocidades bajas, la gráfica se comporta como una relación. Es decir, no cumple con la condición de biyectividad para una función; esto ocurre debido a deslizamientos internos en el fluido. Generando así una pendiente negativa y luego una pendiente positiva como se observa en la figura 54. Para este tipo de gráficas se obvió los puntos que actuaban como una relación ya que el análisis se centrará más en el comportamiento general del fluido y no profundizará en este tipo de fenómenos que requieren un estudio más exhaustivo.

Figura 54

Ejemplo comportamiento no biyectivo a velocidades bajas de cizalla para un tipo de carbono ensayado



Para todas las mezclas se observa, según las curvas Esfuerzo Cortante vs Velocidad de cizalla, que estas muestran un comportamiento reológico no newtoniano correspondiente al modelo de “Bingham pseudoplástico”, debido a que es necesario un esfuerzo inicial (punto de cedencia) para que estos fluidos empiecen a moverse. Las ecuaciones obtenidas en estas gráficas muestran un signo negativo en el factor que acompaña al término cuadrático lo que indica que es un fluido del tipo “shear thinning o pseudoplástico”. Así mismo, en la gráfica Viscosidad vs Velocidad de Cizalla, se asegura un comportamiento pseudoplástico en vista de que la viscosidad disminuye conforme se aumenta la velocidad de corte.

A continuación, se presenta en la tabla 15 un resumen de las propiedades reológicas obtenidas y en las figuras 55 y 56 se ilustra su comportamiento. Mientras que

en el Anexo G se encuentran la tabulación de los datos registrados y gráficos individuales para cada tipo de carbono.

Tabla 15

Resumen propiedades reológicas fluidos ensayados

Propiedades Reológicas				
Agregado	Viscosidad Plástica (Pa.s)	% Aumento/Disminución Viscosidad Plástica	Esfuerzo o fluencia (MPa)	% Aumento/Disminución Esfuerzo Fluencia
Ninguno	2.00E-06	0.00%	8.00E-05	0.00%
Carbón Activado al 10%	3.00E-06	50.00%	9.00E-05	12.50%
Grafito + CU 50% al 10%	1.00E-06	-50.00%	6.00E-05	-25.00%
Grafito + CU 50% al 15%	1.00E-06	-50.00%	5.00E-05	-37.50%

Figura 55

Esfuerzo cortante promedio vs Velocidad de cizalla mejores tipos de carbonos

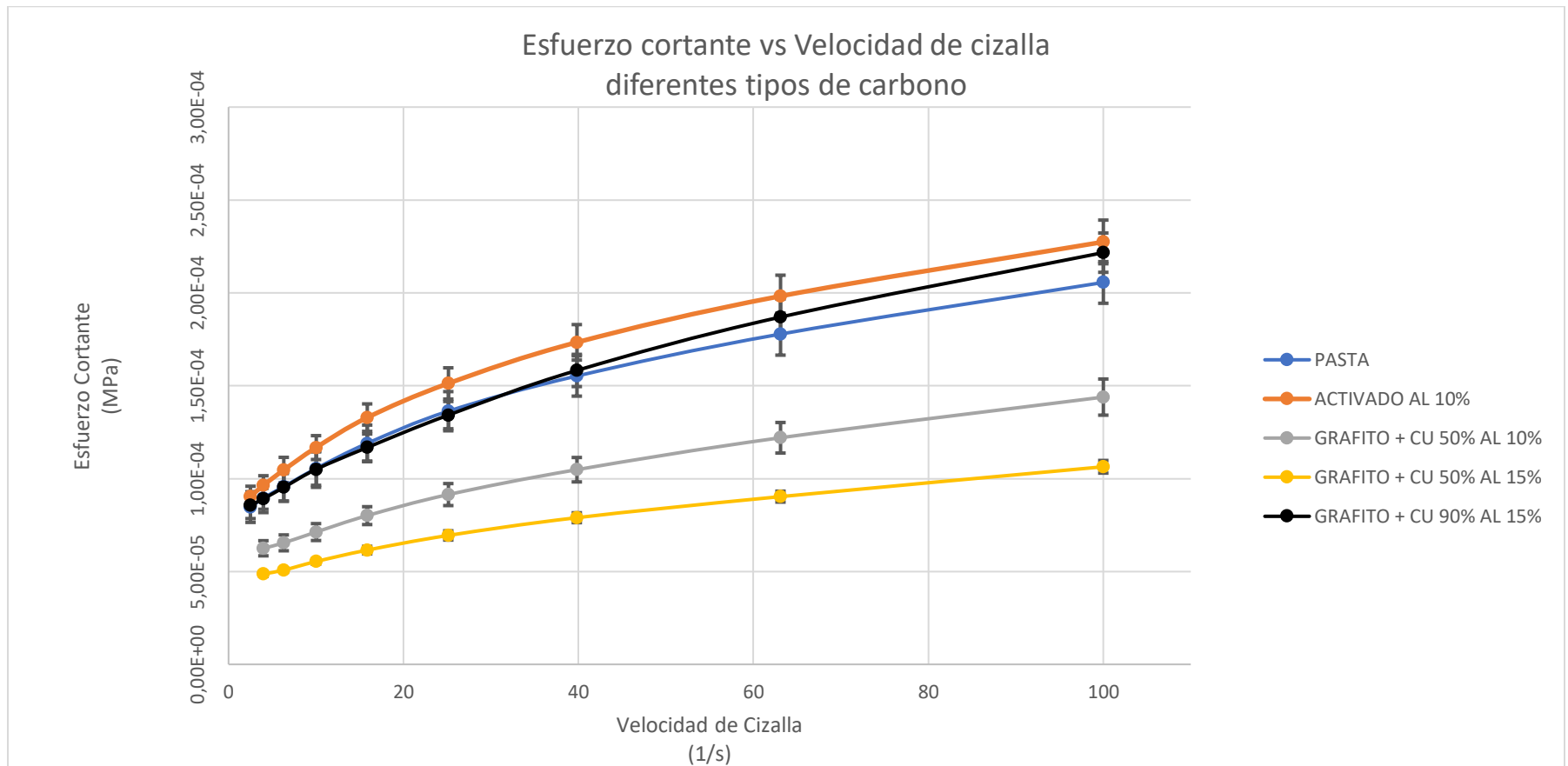
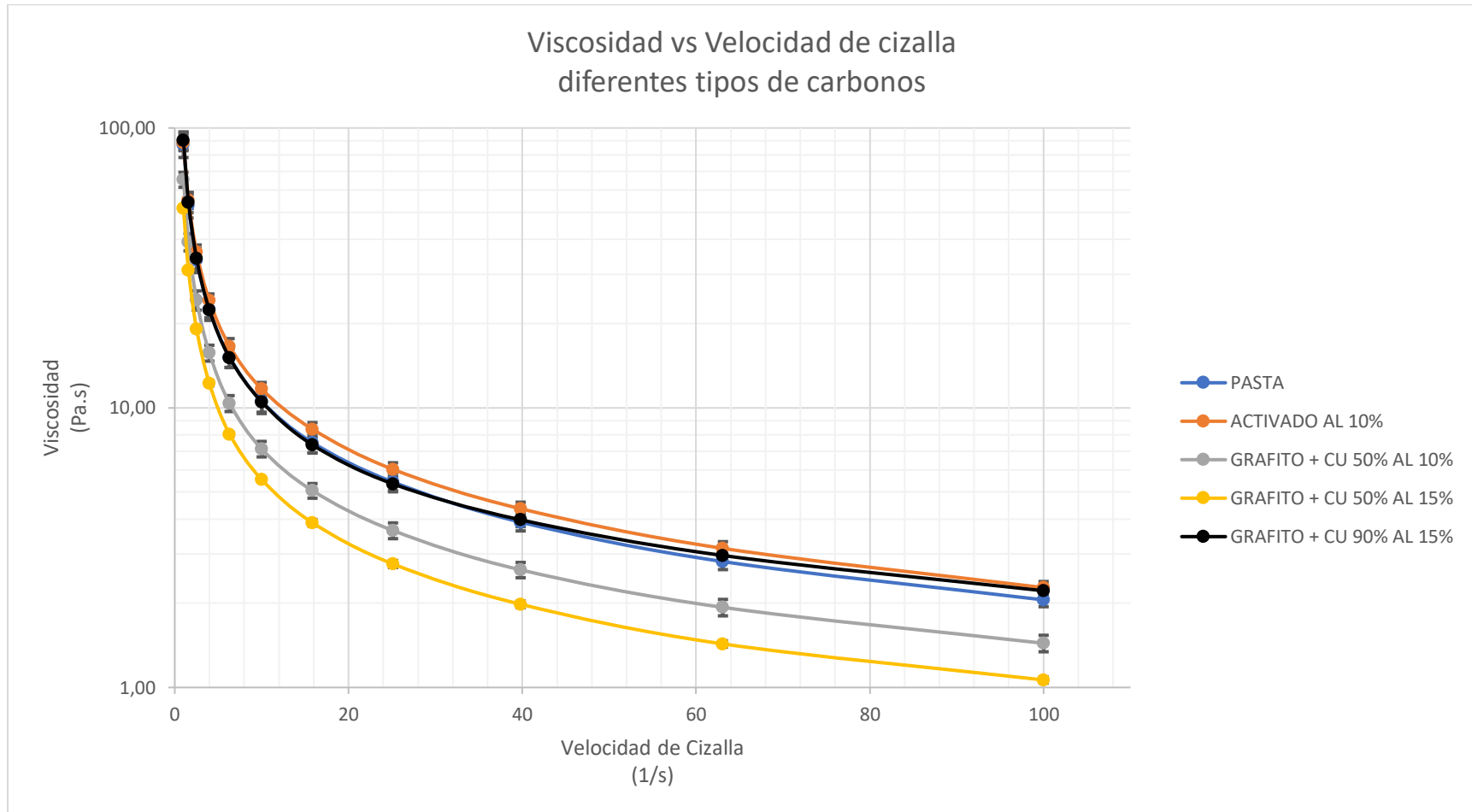


Figura 56

Viscosidad promedio vs Velocidad de cizalla mejores tipos de carbonos



Al observar las figuras 55 y 56, se establece lo siguiente:

- El agregado carbón activado a una dosificación en peso del 10 % aumenta el esfuerzo cortante y la viscosidad a una misma velocidad de cizalla comparada con la pasta base. Los motivos para que esto ocurra se deben a que el agregado, al poseer una densidad más baja comparada a la de los otros agregados, se tuvo que adicionar más partículas a la mezcla para cumplir con la dosificación deseada; lo que directamente influye en la distorsión de las líneas de flujo. Adicional a esto, el carbón activado es una partícula amorfa altamente porosa; lo que genera que estas se comporten como obstáculos irregulares que deforman a las líneas de flujo generando este fenómeno.
- El agregado Grafito + Cu 50% en las dos dosificaciones ensayadas disminuye la viscosidad y el esfuerzo cortante a una misma velocidad de cizalla comparada con la pasta base. Las razones se deben a que el grafito es una partícula cristalina regular, ésta, en el fluido se comporta como una especie de rodamiento para las líneas de flujo lo que ocasiona el efecto mencionado. Por otra parte, el grafito es aplicado en lubricantes ya que este se adhiere en las superficies metálicas y rellena poros lo que también puede explicar este comportamiento.
- El agregado Grafito + Cu 90%, hasta cierto punto, no afecta la viscosidad ni el esfuerzo cortante comparada con la pasta base. Por otra parte, se observa que a partir de una velocidad de cizalla de aproximadamente $40 [s^{-1}]$, las curvas de estas mezclas se separan y hay un ligero aumento de la

viscosidad y el esfuerzo cortante. El cobre puede empezar a comportarse como un obstáculo para las líneas de flujo a partir de dicha velocidad.

Análisis de Costos

A continuación, se presenta un análisis financiero en el cual se involucran los costos directos e indirectos del proyecto.

Costos Directos

Este rubro conlleva los honorarios a profesionales, estudiantes participantes, costos de materiales y equipos

Honorarios a Profesionales y Estudiantes

El costo para los profesionales involucrados es asumido por la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE". Referente a los estudiantes se reconoce un valor hora por el tiempo dedicado al proyecto. Esta información se detalla en la tabla 16

Tabla 16

Remuneración a profesionales y estudiantes a cargo del proyecto

Nombre	Cargo	Tiempo (horas)	Valor hora (USD)	Costo Total (USD)
Ing. Xavier Sanchez	Jefe de Laboratorio de Ciencias de Materiales	32	\$ 16.00	\$ 512.00
Ing. Nicolás Páez	Jefe de Laboratorio de Reología	16	\$ 16.00	\$ 256.00
Ing. Luis Jiménez	Laboratorista Encargado Laboratorio de Reología	16	\$ 10.00	\$ 160.00

Nombre	Cargo	Tiempo (horas)	Valor hora (USD)	Costo Total (USD)
Ing. Juan Haro	Docente Encargado Laboratorio de Mecánica de Suelos	10	\$ 16.00	\$ 160.00
Sr. Mateo Llerena	Estudiante	320	\$ 3.33	\$ 1,066.67
Sr. Pablo Reina	Estudiante	320	\$ 3.33	\$ 1,066.67
TOTAL (USD)				\$ 3,221.33

Costo de Materiales y Equipos

Seguidamente en la tabla 17 se desglosa el costo de materiales y equipos empleados en el proyecto.

Tabla 17

Costo de materiales y equipos

Producto	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (USD)	TOTAL (USD)
Cemento	10	kg	\$ 0.70	\$ 7.00
Agua	18	L	\$ 0.27	\$ 4.86
Grafito + Cobre	1	kg	\$ 150.00	\$ 150.00
Carbón activado	650	gr	\$ 0.01	\$ 6.50
Arduino Mega 2560	1	unidad	\$ 25.00	\$ 25.00
Cables lagarto - lagarto	30	unidades	\$ 0.60	\$ 18.00

Producto	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (USD)	TOTAL (USD)
Cables Jumper macho – macho	60	unidades	\$ 0.10	\$ 6.00
Protoboard 60 x 170	1	unidad	\$ 3.00	\$ 3.00
Resistencia 10K Ω	20	unidades	\$ 0.05	\$ 1.00
Regulador 7805	1	unidad	\$ 0.65	\$ 0.65
Enchufes	42	unidades	\$ 0.29	\$ 12.18
Moldes cubo de hielo	1	unidad	\$ 3.57	\$ 3.57
Lijas N°80	5	unidades	\$ 0.50	\$ 2.50
Batidora	1	unidad	\$ 20.00	\$ 20.00
Total (USD)				\$ 260.26

Costos Indirectos

En la tabla 18 se detallan, los costos indirectos del proyecto referentes a transporte, servicios básicos, etc. Para los costos relacionados al uso de los laboratorios (tabla 19) se utilizó la investigación realizada por (Acosta & Llerena, 2021), en la cual se elaboró el costo de las carreras del DECEM para el período comprendido entre Noviembre 2020 Abril 2021.

Tabla 18

Costos indirectos Proyecto

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (USD)	TOTAL (USD)
Transporte	19.6	Gal	\$ 2.55	\$ 49.98
Servicios Básicos	1	N/A	\$ 40.00	\$ 40.00
Alimentación	2	N/A	\$ 60.00	\$ 120.00
Varios	1	N/A	\$ 40.00	\$ 40.00
Total (USD)				\$ 249.98

Tabla 19*Costo uso de laboratorios*

Descripción	Horas Utilizadas	Depreciación (USD/Hora)	TOTAL (USD)
Ciencia de los Materiales	40	\$15.84	\$633.60
Equipos, Sistemas y Paquetes Informáticos	40	\$3.82	\$152.80
Maquinaria y Equipos	40	\$8.62	\$344.80
Infraestructura	40	\$3.19	\$127.60
Mobiliario	40	\$0.21	\$8.40
Mecánica de Suelos	15	\$15.84	\$237.60
Equipos, Sistemas y Paquetes Informáticos	15	\$3.82	\$57.30
Maquinaria y Equipos	15	\$8.62	\$129.30
Infraestructura	15	\$3.19	\$47.85
Mobiliario	15	\$0.21	\$3.15
Reología	13	\$22.99	\$298.87
Equipos, Sistemas y Paquetes Informáticos	13	\$1.86	\$24.18
Herramientas	13	\$0.63	\$8.19
Maquinaria y Equipos	13	\$18.17	\$236.21
Infraestructura	13	\$2.10	\$27.30
Mobiliario	13	\$0.23	\$2.99
Total (USD)			\$1,170.07

Costo Total del Proyecto

A continuación, se presenta un resumen de los costos presentados, la tabla 20 y 21 refleja el total de los costos directos e indirectos respectivamente.

Tabla 20

Total costos directos

Descripción	Costo Total (USD)
Honorarios a Profesionales y Estudiantes	\$3,221.33
Costo de Materiales y Equipos	\$260.26
Total (USD)	\$3,481.59

Tabla 21

Total costos indirectos

Descripción	Costo Total (USD)
Costo Indirecto proyecto	\$249.98
Costo Uso de Laboratorios	\$1,170.07
Total (USD)	\$1,420.05

Tabla 22*Total costos proyecto*

Descripción	Costo Total (USD)
Costos Directos	\$3,481.59
Costos Indirectos	\$1,420.05
Total	\$4,901.64

La tabla 22 muestra un total del costo del proyecto de 4901.64 USD, de los cuales la Universidad de las Fuerzas Armadas ha auspiciado la mayor parte del mismo. Siendo patrocinado por la entidad educativa un total de 4391.4 USD, y por parte de los estudiantes participantes un total de 510.24 USD.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Las partículas de carbono agregadas a un material a base de cemento tienen un efecto en el comportamiento eléctrico. Este material se comportó como una carga resistiva – capacitiva (R – C). Por lo que no es conductor ni resistencia, es un almacenador de energía. Tenemos como resultado un material constituido por una mezcla heterogénea cuyo comportamiento en ciertas ocasiones presenta características eléctricas variables totalmente y en otras presenta características eléctricas más uniformes. Esto se debe, esencialmente, a que el tamaño de partícula del agregado genera una alta tortuosidad y no se logró llegar a un umbral de percolación de la mezcla heterogénea. Se determinó que, en general, las partículas agregadas provocan un aumento en la caída de voltaje que experimenta una muestra cuando se deja pasar una corriente eléctrica directa de hasta un 53,7% y este efecto se traduce en una mayor pérdida de conductividad del material conforme la edad de la muestra.
- Se determinó que la proporción de las micro partículas de carbono agregadas tiene una influencia directa en la conductividad eléctrica. La mejor conductividad se logra con la menor proporción de agregado, que fue del 5% en peso de cemento. Mientras que a mayores proporciones la conductividad decae hasta en un 52,6%. Se concluye entonces que el tamaño de partícula de los carbonos agregados (orden micro) y una mayor proporción agregada no contribuyen a mejorar significativamente la conductividad en materiales a base de cemento porque las partículas dispersas en la mezcla forman placas internas y en medio

de estas se tiene un material aislante (cemento), obteniéndose un efecto capacitivo además del resistivo.

- Los agregados ensayados disminuyen la resistencia mecánica de la pasta base, según la tabla 16 en un promedio del 40%. Por lo cual este tipo de mezclas no es apta para aplicaciones estructurales, al contrario, podrían ser aplicadas como revestimientos sobre superficies para poder aprovechar sus características eléctricas.
- El porcentaje de adición del agregado a la mezcla es un factor que influye en el valor de la resistencia mecánica, siendo para concentraciones más altas más bajas las resistencias obtenidas.
- El grafito disminuye la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia de la pasta base, al observar la tabla 16 estas merman en promedio un 50% y 30% respectivamente. Al contrario, el agregado carbón activado aumenta estas dos propiedades en un 50% y 12.5% respectivamente.

Recomendaciones

- Se podría emplear la técnica de medición de la caída de voltaje en un material a base de cemento como un método no destructivo en probetas y así obtener una medida indirecta de la edad y la resistencia mecánica que ha alcanzado.
- Si se requiere un material cementoso para aplicaciones estructurales, es recomendable trabajar en porcentajes de agregados bajos, ya que se ha observado en esta investigación que este factor juega un papel importante en esta propiedad
- El agregado Grafito + Cu 90% al 15%, no permitió que la mezcla se endurezca por completo en las primeras 72 horas, al embeber este tipo de muestras en

agua al terminar este período las mismas se desvanecieron. Por lo que no es aconsejable este tipo de agregado para aplicaciones estructurales.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, E., & Llerena, K. (2021). Elaboración de costos de las carreras del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Antón, R. (2016). Estudio microestructural de pastas de cemento expuestas a medios simulados de agresividad moderada frecuentes en ambientes rurales.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2012). Ciencia e Ingeniería de Materiales Sexta Edición.
- Callister, W. D. (2009). Ciencia e Ingeniería de Los Materiales. www.FreeLibros.org
- Chang, R. (2010). Química (10th ed.). McGraw Hill.
- Cifuentes Barrios, C. C. (2007). Estudio por medio de la Teoría de la Percolación de los puntos críticos del excipiente Hidroxipropilmetilcelulosa, utilizado en comprimidos de liberación modificada.
- Cornejo, L. (2015, August 18). Propiedades de las nano partículas - Nuevas Tecnologías y Materiales. <https://nuevatecnologiasymateriales.com/propiedades-de-las-nano-particulas/>
- Dietrich, S., & Ammon, A. (2003). Introduction to PERCOLATION THEORY (2nd ed.).
- Filippin, A. (2019). Conversión de material lignocelulósico de residuos provenientes de la producción olivícola para la obtención de carbón activado.
- Gismera, S. (2019). Comportamiento reológico de cementos y morteros activados alcalinamente: influencia de las variables del proceso .
- Gonzales Zúñiga, M. (2021). Generalidades del Cemento y del Concreto.
- Guevarra Fallas, G., Hidalgo Madrigal, C., Rodríguez Valenciano, I., Rojas Vega, L. D., & Segura Guzmán, G. (2011). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto.
- Lizarazo, J. (2019). Resistencia a la compresión y reología de cementantes ambientalmente amigables . REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN , 29(2).
- López, R. (2004). Caracterización de Medios Porosos y Procesos Percolativos y de Transporte.
- Lozano, L., & Montes, J. (2005). Estudio del recorrido eléctrico efectivo a través de una muestra porosa.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). Materiales Para Ingeniería Civil. www.FreeLibros.orgwww.elsolucionario.org
- Máxima, J. (2021, September 30). Carbono. <https://www.caracteristicas.co/carbono/>

- McMurry, J. (2008). *Química orgánica / Organic Chemistry (Spanish Edition)*.
- Mosquera, J. (2015). *HORMIGÓN DE ALTO DESEMPEÑO CON MÓDULO DE ROTURA 4,5 MPa.A LAS 24 HORAS*.
<https://studylib.es/doc/8089436/dosificaciones-de-mortero-equivalente>
- Navarro, E., & Forero Horacio. (2017). *Mejoramiento de la resistencia a compresión del concreto con Nanotubos de Carbono*.
- NTG-41017. (2017). *Norma Técnica NTG-41017 h4 Guatemalteca. Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico*. www.astm.org
- Parrón, M., Rubio, F., Rubio, M., & Velasquez, J. (2010). *Análisis del efecto de polvo de humo ferrítico en la respuesta reológica de pastas y morteros*.
- Pérez Rea, M. de la L. (2005). *PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y REOLÓGICAS DE SUELOS USANDO TEORÍA DE PERCOLACIÓN*.
- Polanco, J., & Setián, J. (2013). *Cementos, Morteros y Hormigones*. In Open course ware. Universidad de Cantabria.
- Portugal, P. (2003). *Reología del concreto*. In XIV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA CIVIL .
- Sahimi, M. (1993). *Applications Of Percolation Theory*.
- Sanchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero (Bhandar editores LTDA, Ed.; 5th ed.)*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Smith, W. F. (William F., Hashemi, Javad., Nagore Cázares, Gabriel., & González-Caver, P. Alejandro. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*.
- Smith, W., & Hasemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw Hill Interamericana.
- Solas, A., & Giani, R. (2010). *Tecnología del Hormigón Avanzada (1st ed.)*. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Soliman, N. A., Chanut, N., Deman, V., Lallas, Z., & Ulm, F. J. (2020a). *Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials*. *Physical Review Materials*, 4(12).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.125401>
- Soliman, N. A., Chanut, N., Deman, V., Lallas, Z., & Ulm, F. J. (2020b). *Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials*. *Physical Review Materials*, 4(12).
<https://doi.org/10.1103/PHYSREVMATERIALS.4.125401>
- UNACEM Ecuador. (n.d.). *Ficha técnica Campeón*.

Anexos