



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos

UPC BARCELONA TECH

Diseño conceptual de materiales cementicios multifuncionales

Trabajo realizado por:

Byron Fabián Londa Cañar

Dirigido Por:

PhD. Ignacio Segura

MSc. Ninel Santillán

Máster en

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, 8 de Mayo del 2023

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de esta tesis. En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor PhD. Ignacio Segura por su guía, apoyo y paciencia durante todo el proceso de investigación y escritura de esta tesis.

También quisiera agradecer al Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales "Lluís Agulló"(LATEM) por proporcionarme las instalaciones y herramientas necesarias para llevar a cabo los experimentos. Su equipo de investigación ha sido una fuente de inspiración y motivación constante.

No puedo dejar de mencionar a mis compañeros del Máster en Ingeniería Estructural y de la Construcción, quienes me han brindado su amistad, ayuda y apoyo incondicional durante todo el programa. Gracias por compartir conmigo esta experiencia inolvidable.

También agradezco de una manera muy especial, a mi familia y pareja, quienes siempre han estado a mi lado apoyándome y dándome fuerzas para seguir adelante en momentos de dificultad.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que han participado de alguna manera en este proyecto y que han contribuido a su éxito. Sin su ayuda, este trabajo no habría sido posible.

A todos ellos, gracias de todo corazón.

Resumen

La investigación y diseño de hormigón ha estado históricamente centrada en sus propiedades mecánicas. Sin embargo, la demanda de materiales de construcción multifuncionales ha aumentado. En este contexto, el hormigón conductor es un material al que se puede agregar funciones no estructurales, como la función de sensor, función de calefacción, resistencia a la corrosión y protección contra interferencias electromagnéticas. A pesar de su importancia, no se cuenta con una metodología de diseño estandarizada.

El presente trabajo aborda el estudio y diseño conceptual de materiales cementicios multifuncionales. Para ello, se pretende diseñar un criterio de dosificación que permita dosificar las diferentes adiciones y componentes para obtener materiales cementicios conductores.

Se utilizaron estudios experimentales y teóricos para determinar los parámetros de diseño, incluyendo la aplicación final, la selección de materiales conductores adecuados, la proporción de estos materiales en la mezcla, la resistividad y la relación agua-cemento. También se consideraron otros factores como la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón conductor. Los parámetros se distribuyen en seis pasos para la obtención del hormigón conductor.

Se encontró que la cantidad de material conductivo a incorporar puede afectar la trabajabilidad de la mezcla y se recomienda el uso de mezclas bifásicas para mantener un equilibrio entre las capacidades mecánicas y la resistividad deseada. Además, se debe tener en cuenta la compatibilidad entre adiciones y los factores ambientales que pueden influir en el resultado final.

En resumen, el diseño de un hormigón conductor puede llegar a ser más complejo que el del hormigón tradicional. El equilibrio entre la matriz cementosa y el material conductor no es el único factor que se debe tomar en cuenta. Los factores ambientales, la compatibilidad entre adiciones y la aplicación influirán en el resultado final.

Abstract

Concrete research and design have historically been focused on its mechanical properties. However, the demand for multifunctional building materials has increased. In this context, conductive concrete is a material to which non-structural functions can be added, such as sensor function, heating function, corrosion resistance, and protection against electromagnetic interference. Despite its importance, there is no standardized design methodology.

This document deals with the study and conceptual design of multifunctional cementitious materials. For this, it is intended to design a dosing criterion that allows the dosing of the different additions and components to obtain conductive cementitious materials.

Experimental and theoretical studies were used to determine the design parameters, including the final application, the selection of suitable conductive materials, the proportion of these materials in the mix, the resistivity, and the water-cement ratio. Other factors such as the mechanical resistance and durability of the conductive concrete were also considered. The parameters are distributed in six steps to obtain the conductive concrete.

It was found that the amount of conductive material to be incorporated can affect the mixture's workability. The use of biphasic mixtures is recommended to maintain a balance between the mechanical capacities and the desired resistivity. In addition, the compatibility between additions and environmental factors that may influence the final result must be taken into account.

In summary, the design of conductive concrete can become more complex than that of traditional concrete. The balance between the cementitious matrix and the conductive material is not the only factor that must be taken into account. Environmental factors, compatibility between additions and the application will influence the final result.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Índice general	XI
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodología empleada y estructuración de la tesis	2
2. Obtención de Materiales Cementosos Conductivos	5
2.1. Introducción	5
2.2. Adiciones conductivas	6
2.2.1. Polvo de Grafito	7
2.2.2. Negro de Humo	9
2.2.3. Fibra de Carbono	12
2.2.4. Árido Siderúrgico	15
2.2.5. Combinación de dos o más adiciones conductivas	17
2.3. Dosificación	19
2.4. Teoría de percolación	20
2.5. Material de Dispersión	22
2.6. Mezclado	24
3. Aplicaciones Piezoresistivas y Calefactantes	27
3.1. Introducción	27
3.2. Autodetección	27

3.3.	Función Calefactante	30
3.3.1.	Suelo radiante mediante soleras y baldosas de hormigón conductivo	32
3.3.2.	Deshielo de pavimentos de hormigón	34
4.	Evaluación de mezclas monofásicas y bifásicas	39
4.1.	Introducción	39
4.2.	Materiales a utilizar	40
4.2.1.	Cemento	40
4.2.2.	Aditivo	40
4.2.3.	Arena de sílice	40
4.2.4.	Betoflow	40
4.2.5.	Adiciones carbonosas	41
4.2.5.1.	Fibra de carbono (FC)	41
4.2.5.2.	Polvo de grafito (PG)	41
4.2.5.3.	Negro de humo (NH)	42
4.2.6.	Cascarilla de laminación	42
4.2.7.	Polvos de aspiración de cobre	43
4.2.8.	Lodos de lavado de cobre	44
4.3.	Ensayos a realizar (marco normativo; objetivo)	45
4.3.1.	Determinación de la densidad aparente	45
4.3.2.	Fluidez	46
4.3.3.	Determinación de la resistencia a flexión y a compresión	46
4.3.4.	Propiedades eléctricas	48
4.4.	Campaña experimental	49
4.5.	Composición del material compuesto a base de cemento	50
4.6.	Procedimiento de la campaña experimental	50
5.	Análisis de Resultados	55
5.1.	Introducción	55
5.2.	Propiedades del mortero fresco	55
5.3.	Propiedades del mortero endurecido	58
5.4.	Resistividad	62
5.4.1.	Resistividad en las adiciones carbonosas	63
5.4.2.	Resistividad de subproductos industriales	64
5.5.	Propuesta de diseño	66
6.	Conclusiones	75
6.1.	Introducción	75
6.2.	Conclusiones generales	75
6.3.	Conclusiones específicas	76

6.3.1. Relativas al estado fresco	76
6.3.2. Relativas al estado endurecido	76
6.3.3. Propiedades eléctricas	77
6.4. Futuras líneas de investigación	77
Bibliografía	77
Anejos	85
A. Características adicionales de los materiales	87
A.1. Propiedades químicas	87
A.2. Propiedades físicas	89
B. Recopilación fotográfica	91
B.1. Fotografías de la campaña experimental	91

Índice de figuras

2.1.1. Clasificación de adiciones en base a su conductividad	6
2.2.1. Estructura laminar hexagonal del grafito [1].	7
2.2.2. Polvo de grafito. [1]	8
2.2.3. Negro de humo.	10
2.2.4. Fibra de Carbono	12
2.2.5. Ejemplos de árido siderúrgico	16
2.4.1. Teoría de percolación	21
2.6.1. Métodos de adición [2].	25
3.2.1. Ensayo de carretera con hormigón autodetectante [3]	30
3.3.1. Suelo radiante tradicional	32
3.3.2. Imágenes infrarrojas de calentamiento de placas inteligentes	33
3.3.3. Ejemplo de sistema de suelo radiante [4].	33
3.3.4. Resultados de anti-congelamiento	35
3.3.5. Conductos de PVC de cloruro de polivinilo y cajas de derivación preposicionadas en el tablero del puente de hormigón armado	35
3.3.6. Experimento de descongelamiento	36
3.3.7. Sistema de pavimento con hormigón conductor [5].	37
4.2.1. Cascarilla de acero	43
4.2.2. Granulometría de la cascarilla de acero	43
4.2.3. Recuperación de polvos de aspiración	44
4.2.4. Recuperación de polvos de aspiración	44
4.2.5. Tratamiento de las aguas de lavado y obtención de lodos	45
4.2.6. Lodos de lavado	45
4.3.1. Circuito de dos terminales para medición de impedancia	48
4.3.2. Configuración en laboratorio para medición de impedancia	49
5.2.1. Porcentaje de fluidez de las mezclas	57
5.3.1. Fotografía de los ensayos de flexión y compresión	59
5.3.2. Resistencia a la flexión a los 7 días	60
5.3.3. Resistencia a la compresión a los 7 días	61

5.4.1.Fotografía de la medición de impedancia	62
5.4.2.Resistividad partículas férricas	63
5.4.3.Resistividad en polvos de aspiración y lodos de lavado.	65
5.4.4.Resistividad partículas férricas	66
5.5.1.Diagrama de la propuesta de diseño	67
5.5.2.Resistividad vs % en volumen de adiciones conductivas	69
5.5.3.Resistividad vs % en volumen de adiciones	70
5.5.4.Resistividad vs % en volumen de adiciones	70
5.5.5.Resistividad vs Relación de árido fino a Cascarilla de acero.	71
5.5.6.Diagrama del flujo del criterio de aplicación.	71
5.5.7.Combinación de áridos	72
B.1.1.Materiales para mezcla en laboratorio	91
B.1.2.Ensayos de mesa de sacudidas	92
B.1.3.Ensayos de flexión y compresión	92
B.1.4.Medición de impedancias	93

Índice de tablas

2.2.1.Experiencia de ensayos con polvo de grafito	9
2.2.2.Experiencia de ensayos con negro de humo	11
2.2.3.Experiencia de ensayos con fibra de carbono.	15
2.2.4.Experiencia de ensayos con árido siderúrgico.	17
2.2.5.Experiencia de ensayos híbridos.	19
2.5.1.Materiales de dispersión efectivos para adiciones funcionales en hormigón . .	24
4.2.1.Características de la fibra de carbono utilizada	41
4.2.2.Características del polvo de grafito utilizado	42
4.2.3.Características del negro de humo utilizado	42
4.3.1.Normativa para resistencia a flexión y compresión	47
4.5.1.Dosificación de referencia para $1m^3$	50
4.6.1.Mezclas a analizar correspondientes a polvo de grafito (PG)	51
4.6.2.Mezclas a analizar correspondientes a negro de humo (NH)	51
4.6.3.Mezclas a analizar correspondientes al polvo de aspiración CMG-1.	51
4.6.4.Mezclas a analizar correspondientes al polvo de aspiración CMG-2.	52
4.6.5.Mezclas a analizar correspondientes al polvo de aspiración (FQ).	52
4.6.6.Mezclas a analizar correspondientes a la cascarilla de acero (PF).	52
A.1.1.Composición química (FRX) de la muestra de polvo de aspiración CMG-2	88
A.1.2.Composición mineralógica de la muestra de polvo de aspiración CMG-2	88
A.1.3.Composición química (FRX) de la muestra de lodos de lavado	89
A.2.1.Propiedades físicas de la muestra de polvo de aspiración CMG-1	89
A.2.2.Propiedades físicas de la muestra de polvo de aspiración CMG-2	89
A.2.3.Propiedades físicas de la muestra de lodos de lavado	89
A.2.4.Propiedades físicas de la cascarilla de acero.	90

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Al hormigón se le considera el material más empleado en la construcción. El hormigón está formado por agregados de diferente tamaño y forma. Los agregados usados son mayormente de origen natural, mezclado con agua, aditivos específicos y un aglomerante cementicio. La mezcla en proporciones adecuadas da como resultado una roca artificial con características mecánicas suficientes para el uso de obra civil y edificaciones alrededor del mundo.

La línea de investigación del hormigón empleado en obra civil y edificación ha sido orientada tradicionalmente al estudio de sus propiedades mecánicas debido a su principal función estructural, es decir, a su capacidad de soportar esfuerzos sin sufrir deformaciones. No obstante, en la actualidad los investigadores buscan la integración de otras propiedades que le permiten tener funciones complementarias, convirtiéndose en un material estructural multifuncional.

Existe la tendencia al uso de un material estructural multifuncional en lugar de una combinación de materiales estructurales y materiales funcionales no estructurales. El material con estas características reduce coste, mejora la durabilidad y la capacidad de reparación, aumenta el volumen funcional, evita la degradación de las propiedades mecánicas, y simplifica el diseño. Las funciones no estructurales incluyen la función de sensor, función de calefacción, resistencia a la corrosión, función de auto reparación, de aislamiento térmico, de retención de calor y de protección frente a interferencias electromagnéticas (EMI) [1, 6, 7].

Para la obtención de materiales multifuncionales la comunidad científica a publicado numerosos estudios sobre distintas matrices con adición de fibras de carbono, polvo de grafito o fibras de acero, como elemento conductor. Adicionalmente, la nanotecnología ha provisto de grandes avances en diferentes campos de la ciencia. Dentro de este campo destacan los

nanotubos de carbono (NTC) y nanofibras de carbono (NFC) gracias a las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas que poseen [1]. Sin embargo, a pesar de observarse una cantidad de avances significativo en materiales compuestos y aplicaciones prácticas dentro del campo de la ingeniería civil; se ha prestado poca atención a la generación de un proceso normalizado para el diseño de un hormigón conductor.

1.2. Objetivos

El objetivo de este estudio es proponer una metodología para conseguir hormigones conductores de la energía eléctrica. Para ello, se examinarán los diferentes resultados experimentales publicados en revistas de alto impacto mediante los buscadores “Scopus” y “World Wide Science”. El siguiente paso es la realización de diversos estudios experimentales encaminados a valorar el comportamiento de los citados materiales modificados. Finalmente, mediante análisis estadístico se valorarán los diferentes parámetros que influyen al dar una resistividad eléctrica como característica del hormigón modificado. De esta manera se planteará una metodología ordenada para la generación de materiales cementicios multifuncionales cuya característica será la resistividad.

1.3. Metodología empleada y estructuración de la tesis

Para alcanzar el objetivo propuesto, se han desarrollado distintos trabajos los cuales dan contenido a esta tesis, estructurada en seis capítulos, el primero de los cuales corresponde a esta Introducción. A continuación, se describe la metodología seguida en cada uno de los siguientes capítulos.

En el **Capítulo 2** se aporta una panorámica general sobre el estado del conocimiento actual sobre el hormigón conductor. Con posteridad, se resumen cada una de las adiciones conductivas que se han incorporado a materiales cementosos y han dado resultados atractivos. Además, se expone una síntesis sobre los medios de dispersión de partículas y procesos de mezclado.

Tras el estado del conocimiento sobre el hormigón conductor y las adiciones que dieron su origen, en el **Capítulo 3**, se presenta en su primera parte, las bases teóricas en las que se han apoyado la aplicación de piezoresistividad y la función de calentamiento y descongelamiento del hormigón conductor como material multifuncional.

El **Capítulo 4** se explican y se detallan con el nivel suficiente los aspectos metodológicos asociados al desarrollo de la consecuente campaña experimental donde se evaluaron mezclas monofásicas y bifásicas. También, se expondrán las dosificaciones empleadas en cada caso, con objeto de favorecer la reproducibilidad de estos ensayos, independientemente de las personas, el lugar o el tiempo, principio básico de cualquier investigación.

Dando continuidad al estudio, el **Capítulo 5** presenta los resultados obtenidos de la campaña experimental, de las principales propiedades del hormigón. Entre estas propiedades están: la resistencia a compresión y a tracción, el módulo de elasticidad y la resistividad. Cabe recalcar que tratándose de un hormigón de altas prestaciones (UHPC por sus siglas en inglés) la edad de ensayo principal es de 7 días.

En la siguiente parte del capítulo se presenta una propuesta de diseño de hormigón conductor, en donde se toma en cuenta los problemas observados en el capítulo 4. El método propuesto tiene como característica principal la resistividad.

En el **Capítulo 6** se exponen las conclusiones derivadas de los diferentes trabajos realizados. Estas se exponen en una forma de conclusiones generales que responden al objeto principal propuesto y unas conclusiones específicas que obedecen a diferentes aspectos de los trabajos desarrollados. Seguidamente, se presentan las futuras líneas de investigación que permitirán una continuidad y profundización de varios de los aspectos en el presente trabajo.

En el apartado de bibliografía se recogen las principales fuentes bibliográficas consultadas a lo largo del presente documento.

En los **Anejos** se presentan las características de los materiales empleados en la campaña experimental. También se presenta una serie de documentación fotográfica generada a lo largo de este trabajo.

Capítulo 2

Obtención de Materiales Cementosos Conductivos

2.1. Introducción

Los materiales cementosos conductivos son materiales de construcción que tienen la capacidad de conducir electricidad. Los materiales cementosos conductivos se han convertido en un área de investigación y desarrollo en la industria de la construcción debido a su capacidad para disipar cargas eléctricas dándole capacidades multifuncionales.

La conductividad eléctrica de los materiales cementosos conductivos se debe a la presencia de materiales conductores en la mezcla de concreto, como grafito, negro de humo, fibras de carbono y nanotubos de carbono. Estos materiales conductores se mezclan con el cemento Portland ordinario y otros agregados para producir un nuevo material multifuncional.

En el contexto de este apartado, el término “Material Cementicio Multifuncional” se define como cualquier material o sistema basado en materiales con base cemento que combine integralmente dos o más propiedades, una de las cuales es normalmente estructural y la otra funcional, tales como procesos eléctricos, magnéticos, térmicos, etc.

Las capacidades conductoras de un material en cementicio estarán ligadas a las capacidades conductoras que tienen las adiciones dentro de la matriz [6]. Por lo tanto, la resistividad eléctrica de un compuesto cementoso se puede modificar mediante la incorporación de uno o varias adiciones conductoras.

Las adiciones que se utilizan para aumentar la conductividad eléctrica del cemento pueden clasificarse en función de su conductividad eléctrica, la cual depende de su resistividad y su geometría. En general, se busca utilizar materiales que tengan una resistividad baja y que

se distribuyan uniformemente en la matriz del cemento [8, 9].

La figura 2.1.1 muestra un esquema en base a la conductividad de los materiales utilizados para obtener un material cementicio conductor. La conductividad eléctrica de los materiales cementosos conductivos puede variar ampliamente dependiendo de la cantidad, forma y el tipo de materiales conductores utilizados en la mezcla [1, 7, 10, 11]. La conductividad eléctrica también puede ser ajustada según los requisitos de la aplicación.

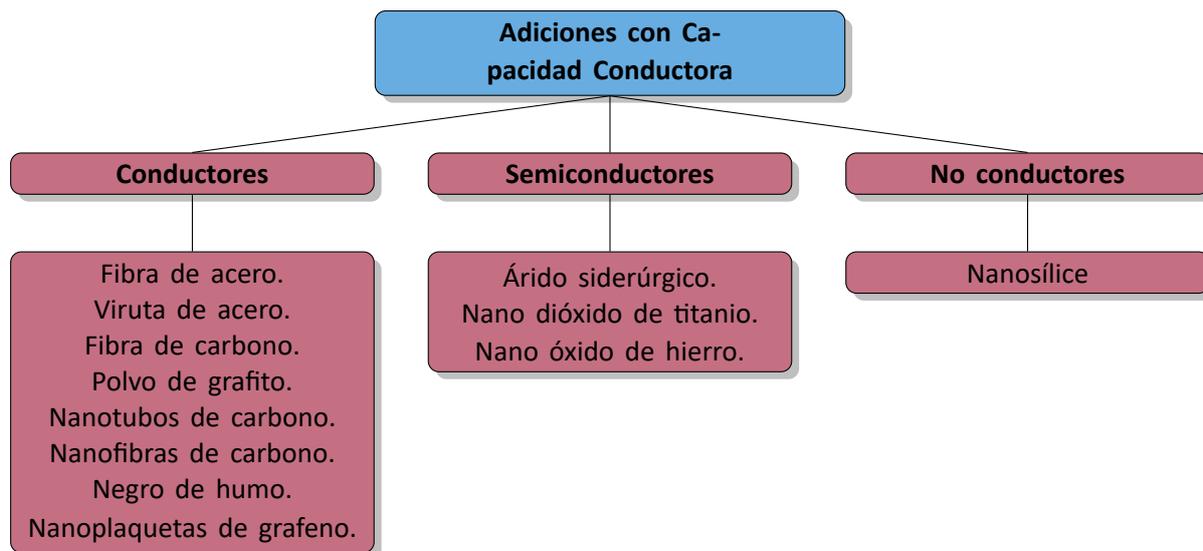


Figura 2.1.1: Clasificación de adiciones en base a su conductividad

Finalmente, para obtener un material cementicio conductor es necesaria la incorporación de adiciones conductivas en la matriz formando una línea interna capaz de transmitir una intensidad de corriente. El material resultante tendrá una cierta capacidad conductiva que definirá su posible aplicación.

2.2. Adiciones conductivas

Las adiciones conductivas son materiales que se agregan a la mezcla de hormigón para mejorar la capacidad del hormigón para conducir la electricidad. Las adiciones conductivas incluyen materiales como fibras de carbono o acero inoxidable, nanopartículas de carbono, grafito, polímeros conductores, entre otros. Estos materiales pueden mejorar la conductividad eléctrica del hormigón y se utilizan comúnmente en la construcción de estructuras que requieren protección contra la descarga electrostática, como en hospitales, plantas químicas, instalaciones de procesamiento de alimentos, entre otras.

2.2.1. Polvo de Grafito

El grafito es un polimorfo de carbono con una estructura plana en capas. Las capas individuales de grafito se llaman grafeno; dentro de ellos, los átomos de carbono están dispuestos en una red hexagonal con una separación entre ellos de 142 pm y una distancia entre capas de 335,4 pm como se muestra en la figura 2.2.1. Estas capas exhiben una buena conductividad a lo largo de los planos debido a la libre movilidad de los electrones. Por otro lado, la conductividad en la dirección transversal se reduce debido a la distancia y el enlace entre ellos es solo una interacción débil de Van der Waals. Sin embargo, si el grafito se presiona perpendicularmente a los planos, estos se acercan entre sí, lo que favorece el traspaso de electrones mediante una conducción de efecto túnel [1, 12, 13].

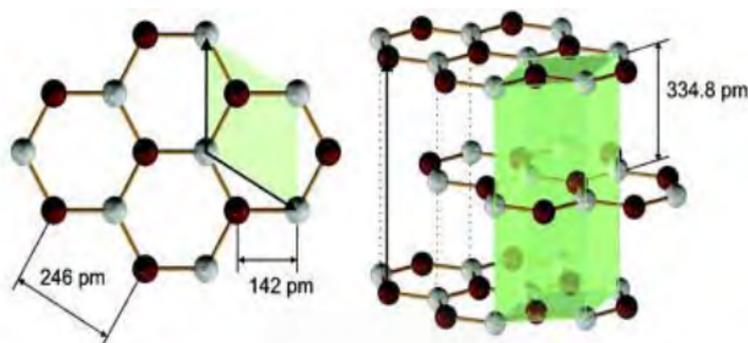


Figura 2.2.1: Estructura laminar hexagonal del grafito [1].

Las características del grafito se han aprovechado para mejorar la conductividad eléctrica y el control de daños internos en estructuras de hormigón ya sea como adición única o en combinación con fibras. La forma en la que se añade el grafito es en polvo finamente molido como se ve en la figura 2.2.2. La adición a compuestos en base cemento se da como reemplazo del agregado fino o en peso respecto al cementante. Las cualidades de los materiales compuestos resultantes dependen de su proporción. Sin embargo, un alto contenido de polvo grafito provocara una reducción en las propiedades mecánicas.

El-Dieb et al. 2018 probó concreto conductivo usando polvo de grafito como reemplazo parcial del agregado fino en volumen (niveles de reemplazo de 1 %, 3 %, 5 % y 7 %), lo que corresponde a 0,23 %, 0,68 %, 1,13 % y 1,58 % de el volumen total de concreto. Además, se planteó alcanzar hormigones con resistencias de uso común con un valor de 30MPa. Los resultados mostraron un aumento de la conductividad con la concentración de polvo de grafito a 7 %. No obstante, la fuerza se redujo en un 6 %, 17 %, 22 % y 30 % a los 28 días de edad para niveles de reemplazo de volumen de 1 %, 3 %, 5 % y 7 % respectivamente. La reducción en la resistencia es atribuida a la deficiente adherencia del polvo de grafito con la pasta de cemento [14].



Figura 2.2.2: Polvo de grafito. [1]

Al-Bayati et al. 2020 estudio el impacto del grafito como material cementoso complementario en la conductividad del hormigón. El grupo de investigación observó un efecto negativo en la característica de trabajabilidad. Además, en muestras que contenían 0,5 %, 2,5 % y 1 % de grafito como reemplazo de material cementante aumentó la conductividad en comparación con la muestra de control. De esta manera establecieron una marca del 1 % ya que valores por encima de este límite disminuyeron la conductividad [15].

Flores-Nicolás, Flores-Nicolás, and Uruchurtu-Chavarín 2021 investigaron los efectos de la corrosión en mezclas con polvo de grafito. Las muestras con adiciones de polvo de grafito en concentraciones de 2,5 %, 7,5 % y 15 % en peso de cemento con respecto a la muestra de control mostraron una corrosión con valores negativos al sumergirlos en un medio salino. Además, las muestras indicaron un alto proceso de corrosión sobre el acero de refuerzo. No obstante, la muestra con de 2,5 % mostro mejoras mecánicas y disminución de la porosidad [16].

Loamrat et al., 2014 analizó la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión de los sensores a base de cemento con la adición de polvo de grafito en concentraciones de 2 %, 4 % y 10 % por peso de cemento. Las proporciones de agua a aglutinante (w/b) fueron de 0,3, 0,4 y 0,5 y se mezclaron con humo de sílice al 15 % en peso de cemento. Los resultados de los ensayos dejaron al descubierto que los sensores a base de cemento de polvo de grafito tienen menor resistencia que la pasta de cemento simple. Además, a la edad de 28 días, la resistencia de la pasta de cemento simple se redujo de 5000 Ω a 1000-2000 Ω en los sensores de polvo de grafito [17].

Propiedades	Concentración	Proporción de mezclas	Propiedades mecánicas	Resistividad eléctrica [Ω m]	Aplicación	Referencia
D<75 μ m;	PG: 0 % a 50 % en peso de cemento;	a/c 0,44-0,79 AF/c 1 CMC 0,4 % wt TP 0,03 %wt		106,1-0,2	Calefactante	[1]
D: 30 μ m;	PG: 10 % a 30 % en peso de cemento;	a/c 0,5 AF/c 1 HS 15 % wt		30000-15		[16]
D: 2,5 μ m;	PG: 3 % y 9 % en reemplazo de agregado fino;	a/c 0,43 AF/c 1,635 AG/c 2,6	Rc: 36,7MPa; 28,7MPa		Emisión acústica	[18]
D: 2,5 μ m; Ge: 1,54 Ae: 33,7 m ² /kg	PG: 1 % a 7 % por volumen de agregado fino;	a/c 0,57 AF/c 1,7 AG/c 3,4	Rc: 15-32MPa	11,5-5,1		[14]
D<20 μ m;	PG: 0,05 %, 1 % y 2,5 % reemplazo en peso total de cemento;	a/c 0,46 AF/c 0,21 AG/c 1,45	Rc: 50,1-57,6MPa	<1000		[15]
D<20 μ m; Ga: 2-2,25 gr/cc As: 7,2 m ³ /g	PG: 2 %, 4 % y 10 % reemplazo en peso de cemento;	a/c 0,3;0,4;0,5 HS 15 % wt	Rc: 20-42MPa	50-1000 Ω	Piezoresistividad	[17]

Tabla 2.2.1: Experiencia de ensayos con polvo de grafito

Otras investigaciones dejan al descubierto la mala adherencia y el bajo enclavamiento del grafito con la piedra de cemento. Además, aumentan los defectos iniciales del hormigón, reduciendo su módulo elástico y debilitando así la resistencia a la compresión. Sin embargo, el polvo de grafito puede aumentar significativamente las señales de emisión acústica y el valor de daño en el período estable, dicha información precursora de fallas puede proporcionar una advertencia de seguridad para el desarrollo de daños [18].

En conclusión, el polvo de grafito se puede mezclar con el cemento, los agregados y el agua para producir una mezcla de hormigón conductiva. La cantidad de polvo de grafito que se debe agregar depende de la resistividad eléctrica requerida para la aplicación específica. Por lo general, se recomienda agregar alrededor de un 1-5 % de polvo de grafito en peso con respecto al cemento.

2.2.2. Negro de Humo

El negro de humo es un derivado de la combustión de un hidrocarburo sometido a altas temperaturas entre 1350°C a 1540°C. El material tiene unas medidas que oscilan desde 10nm a 500nm siendo un polvo bastante fino (ver figura 2.2.3). La aplicación del negro de humo se da como agente de refuerzo en compuestos de caucho (especialmente neumáticos) y como pigmento negro en tintas de impresión, revestimientos de superficies, papel y plásticos. Además, posee propiedades suficientes para aumentar la conductividad de los materiales plásticos o para disipar la electricidad para proteger contra descargas eléctricas estáticas.

Por lo tanto, el negro de humo es un tipo de pigmento negro hecho de carbono fino, y se puede utilizar como un aditivo en la mezcla de hormigón para mejorar la conductividad eléctrica del material.



Figura 2.2.3: Negro de humo.

En 2006, Li et al. empleó por primera vez negro de horno de 120 nm para desarrollar una pasta de cemento de negro de humo con propiedades de detección de deformación. El grupo investigativo mezcló negro de humo en cantidades de 5 %, 10 %, 12 %, 15 %, 20 % y 25 % en peso de cemento. La mezcla constaba de una relación de agua cemento de 0.4 a la cual se le añadieron dos aditivos un reductor de agua y un espumante en cantidades de 1.5 % en peso de cemento y 0.18 % en volumen respectivamente. Al tener los resultados concluyó que el umbral de percolación de la mezcla se dio en los porcentajes de concentración de 12 % a 20 % de negro de humo. Por último, estableció que los efectos en conductividad fueron más relevantes en la zona de postpercolación [19].

Han et al. 2008 obtuvo una pasta de cemento de negro de carbón con piezoresistividad agregando negro de humo de acetileno a la pasta de cemento. Encontró evidencia de que el negro de humo de acetileno es un componente eficaz en la fabricación de materiales piezoresistivos a base de cemento [20].

Lin et al, 2011 hormigón autodetectable fabricado mediante la incorporación de negro de humo de unos 30 nm de diámetro en el hormigón convencional [21]. La concentración de negro de humo utilizada en su estudio fue inferior al 1 %, mucho menor que la utilizada en las referencias [19] y [20]. La incorporación de partículas de negro de humo aumenta la primera fisura y la resistencia máxima a la tracción del material, pero disminuye la capacidad de deformación por tracción y el ancho medio de la fisura. Sin embargo, al igual que Han et al. 2008 el uso de partículas de negro de humo mejoro el comportamiento piezoresistivo.

Sun et al., 2011 realizó estudios de concretos con agregados ligeros que tenían capacidades conductivas gracias a la adición de fibras de carbono y negro de humo. La mezcla estu-

diada contenía negro de humo en una concentración de 0,83 % en volumen y fibras de carbono con una concentración de 0,3 %, 0,49 % y 0,7 % en volumen. Además, se añadió ceniza volante, un superplastificante y carboximetilcelulosa sódica para la trabajabilidad y dispersión de las fibras. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión alcanzan más de 30 MPa y 5 MPa respectivamente. También que la resistividad es inferior a 102 Ω -cm. Los datos obtenidos se atribuyeron a las fibras de carbono basadas en poliácridonitrilo. Por lo tanto, el uso en un pavimento de concreto con función de deshielo podría ser altamente satisfactorio [22].

Dehghanpour y su equipo (2019, 2020) utilizaron la teoría de percolación para diseñar mezclas de hormigón conductoras que incluyen nano negro de humo, desperdicios de electro-soldadura de hilo, fibras de carbono y fibras de acero. Primero, probaron 36 mezclas diferentes de hormigón conductor en el laboratorio para investigar las propiedades mecánicas y eléctricas. Luego, fabricaron 10 tipos diferentes de losas de hormigón. Los resultados mostraron que el negro de humo nano reduce la resistividad cuando se combina con otras adiciones, y que los desperdicios de electrosoldadura son beneficiosos para la conductividad cuando se combinan con fibras de carbono [23, 24].

Propiedades	Concentración	Proporción de mezclas	Propiedades mecánicas	Resistividad eléctrica [Ω m]	Aplicación	Referencia
D: 120 nm; Ge: 1,98	NH: 0 % a 25 % en peso de cemento;	a/c NSFyCF TBP	0,4 1,5 % wt 0,13 % vol	1000-10		[19]
D: 30-90 nm; Ge: 0,5 R:2,3	NH: 0,1 % a 0,4 % en peso de aglomerante;	a/b CV/c AF/c AG/c Sp	0,45 0,43 1,98 1,98 1 % wb	Rc: 43,53-45,45MPa; Rf: 4,52-4,83MPa;	1163-1098 Ω	Autodetección [25]
D: 20-100 nm; Ae: 30-50 m ² /g	NH: 0 % a 5 % en peso de aglomerante;	a/b CV/c AF/c Sp	0,27 1,2 - -	Rc: 56,18-42,48MPa;	90-45	Autodetección [26]
D: 30 nm; R:10 ⁻¹	NH: 0,45 % en fracción de volumen;	a/c AF/c Sp PVA	0,56 0,8 0,022 1,75 % vol	Rf: 5,48-6,15MPa;	57,5-65,6 k Ω	Autodetección [27]

Tabla 2.2.2: Experiencia de ensayos con negro de humo

El negro de humo como una nano adición resulta ser más efectivo para producir una matriz de baja resistividad eléctrica. Además de mejorar la conductividad eléctrica, el negro de humo también puede mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón.

Los valores de alrededor del 1-5 % de negro de humo en peso con respecto al cemento prometen una mejor combinación. Sin embargo, aditivos superplastificantes y agentes dis-

persantes son necesarios en las mezcla para obtener una buena trabajabilidad y distribución uniforme. Además, es importante tener en cuenta que el uso de negro de humo puede afectar el color. Por lo tanto, es necesario hacer pruebas para determinar el impacto del negro de humo en estas propiedades antes de su uso en una aplicación específica.

2.2.3. Fibra de Carbono

Una fibra de carbono es una hebra larga y delgada de material de aproximadamente 0,005-0,010 mm de diámetro más pequeñas que un cabello como se ve en la figura 2.2.4. La fibra de carbono está compuesta por átomos de carbono unidos en cristales microscópicos. La estructura de la fibra de carbono se alinea paralela al eje longitudinal de la fibra con una estructura hexagonal como la del grafeno. La diferencia radica en la forma en que se vinculan las láminas. Las láminas de átomos de carbono se colocan al azar, apretadas o juntas. Esta integración de las láminas de carbono es responsable de su alta resistencia.

Además, las fibras de carbono ofrecen una buena conductividad eléctrica y térmica, tienen bajos coeficientes de expansión térmica, altas resistencias específicas, resistencia a la corrosión y altos módulos elásticos. Todas las características hacen que las fibras de carbono sean objeto de múltiples líneas de investigación incluyendo materiales compuestos para la construcción [6, 28]

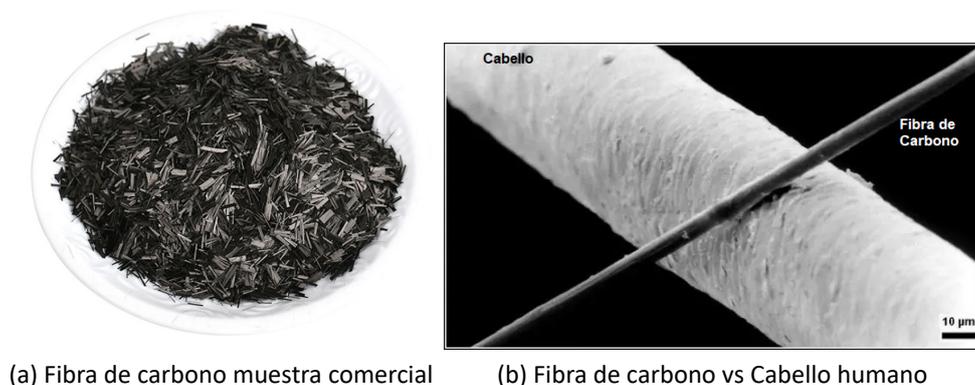


Figura 2.2.4: Fibra de Carbono

Ali, Majumdar and Rayment, 1972 fueron pioneros en el desarrollo de hormigón reforzado con fibras de carbono. Al usar fibras de carbono continuas basadas en poliacrilonitrilo (PAN) los estudios mostraron una gran capacidad mecánica en las muestras. Sin embargo, la aplicación práctica no llegó a gran escala ya que el costo económico era demasiado alto. Posteriormente, el desarrollo en Japón de hormigón reforzado con fibras de carbono cortas basadas en breas (pitch-based) desencadenó el uso más frecuente en la construcción ya que la metodología usada era más asequible económicamente [29].

En la literatura existen varios estudios que describen procesos y procedimientos para obtener fibras de carbono recicladas a partir de componentes desechados. Tanto técnicas químicas como térmicas han demostrado ser eficaces para este fin, produciendo una fibra de carbono que puede ser utilizada como aditivo en nuevos materiales. Este enfoque no solo ofrece una solución para la eliminación de residuos, sino que también beneficia al medio ambiente.

Durante el proceso de reciclaje, las fibras experimentan cambios debido a las altas temperaturas de los hornos, lo que puede debilitar sus características primitivas. Sin embargo, a pesar de ello, las fibras recicladas aún conservan significativamente sus propiedades iniciales, las cuales son comparables a las de una fibra de carbono virgen. Según Chung, 1994, las propiedades de la fibra de carbono reciclada pueden ser aún mejores que las de la fibra de carbono virgen en algunas aplicaciones específicas. Los estudios de Turner, 2011 y Pimienta, 2011 son algunos ejemplos de la investigación existente en esta área [30–32].

En la investigación de Faneca se compararon cuatro tipos de fibra de carbono reciclado y se observó que su comportamiento eléctrico es similar al de las fibras de carbono vírgenes, obteniendo resistividades del orden de 0,6 a 3 Ω m con un contenido de fibra de 0,2 % a 0,8 % en volumen. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de otros autores en la literatura, lo que sugiere que las fibras de carbono reciclado pueden ser utilizadas como un reemplazo viable para las fibras de carbono vírgenes en aplicaciones que requieren propiedades eléctricas similares [33].

Chung, 2000 mostró que los compuestos de matriz de cemento que contienen fibras cortas de carbono exhiben atractivas propiedades de tracción y flexión, baja contracción por secado, alto calor específico, baja conductividad térmica, alta conductividad eléctrica, alta resistencia a la corrosión y un comportamiento termoeléctrico débil.

También, favorecen la protección catódica del refuerzo de acero en el hormigón y tienen la capacidad de detectar su propia deformación, daño y temperatura. Además, postulo que las muestras resultantes en combinación con una segunda adición como humo de sílice o arena que es esencialmente no conductor reduce la resistividad del material compuesto cuando las cantidades de fibra de carbono se mantienen bajas [34].

En cuanto a las capacidades conductivas las fibras de carbono basados en poliacrilonitrilo proporcionan un rendimiento superior al de las fibras de carbono basados en brea porque su conductividad eléctrica es siete veces mejor [35]. Además, una alta relación de aspecto (longitud a diámetro) de las fibras de carbono aumenta la conductividad. Sin embargo, la dispersión en la matriz de hormigón y la trabajabilidad del hormigón resultan un desafío. La resistencia

mecánica se ve afectada negativamente debido a la mala trabajabilidad causada por el enredo de fibras [36]. Algunos investigadores recomiendan una relación de aspecto desde 400 a 900 para la producción de hormigón eléctricamente conductivo [37–39].

Loamrat et al., 2014 postula que al analizar la resistividad eléctrica de sensores a base de cemento que contenían fibra de carbono (2 % y 4 % por fracción volumétrica) se redujo en 10-30 Ω con respecto a la pasta de cemento simple. La mezcla usada contenía humo de sílice en una concentración de 15 % en peso de cemento y con una proporción de agua a ligante de 0,3, 0,4 y 0,5. También se emplea superplastificantes tipo F. Posteriormente, al comparar los sensores que contienen 2 % y 4 % de fibras de carbono, al tomar en cuenta la piezoresistividad de la muestra encontró que no existía una diferencia notable en la resistividad de ambos sensores. Sin embargo, las resistencias mecánicas fueron afectadas alcanzando valores por debajo de la muestra base [17]. Entonces, los valores significativos con respecto a la resistividad se dieron para una relación agua a ligante de 0,4 y 0,5 en ambas concentraciones de fibra de carbono.

Los resultados de diferentes ensayos muestran que se puede alcanzar un hormigón eléctricamente conductivo con cemento portland de 30MPa de resistencia a compresión (ver tabla 2.2.3). Al utilizar las fibras de carbono se pueden llegar a obtener valores de resistividad de alrededor de 0,1 Ω cm utilizando un contenido volumétrico de 0,75 % [37]. Las pruebas llevadas a cabo contenían diferentes valores de relación agua a ligante (0,55; 0,65; 0,75; 0,85). El método de mezcla semiseco y el uso de éter de celulosa tuvo un buen efecto de dispersión en las fibras de carbono. La aplicación llevada al campo mostro un buen rendimiento conservado buenas características conductivas manteniendo sus propiedades mecánicas [40].

También, se puede obtener el mismo nivel de resistencia en combinación con otras adiciones conductivas y no conductivas. Sun et al., 2011 alcanzo resultados satisfactorios en combinación con áridos ligeros y negro de humo. Sin embargo, los problemas de trabajabilidad se ven afectada por el tamaño de la fibra y mientras más larga es más complicado es alcanzar una buena dispersión [22]. Por lo tanto, se sugiere una dosis de 0.5 %vol a 0.75 %vol de fibras de carbono, el uso de aditivos superplastificantes, dispersantes y antiespumantes.

Características	Concentración	Proporción de mezclas	Propiedades mecánicas	Resistividad eléctrica [Ω m]	Aplicación	Referencia
D: 18 μ m; L: 6 mm Ge: 1,65 Rt: 590MPa E: 30Gpa	FC: 0% a 5% en peso de cemento;	a/c 0,3 HS 0,2% wt		661,17-0,78		[41]
D: 7+0.2 μ m; L: 6 mm Ge: 1,78 Rt: 3GPa E:220-240Gpa ρ : $10^{-2} - 10^{-3} \Omega$ cm pitch-based	FC: 0% a 16% en fracción de volumen;	a/c 0,25-0,50 HS 15% wt AF/c 0,1; 2,0				[37]
D:15 μ m L: 5 mm Ge: 1,6 Rt: 690MPa E:48GPa ρ : $3^{-3} \Omega$ cm pitch-based	FC: 0% a 1,5% en peso de cemento.	a/c 0,35 HS 15% wt AF/c 1 Ra 3% wt Met 0,4% wt TBP 0,13% vol		5980-2280	Autodetección	[42]
D:7,2 μ m L: 8 mm Ge: 1,81 Rt: 3800MPa E:242GPa ρ : $1,55*10^{-3} \Omega$ cm PAN-based	FC: 0% a 1.5% en peso de cemento.	a/c 0,35 HS 15% wt AF/c 1 Ra 3% wt Met 0,4% wt TBP 0,13% vol		2,2-2,35 $10^3 \Omega$	Autodetección	[42]
L: 3 mm Rt: 51,9MPa E: 40,5GPa	FC: 0% a 4% en fracción de volumen	a/c 0,3-0,5 HS 15% wt Sp -	Rc: 45-98MPa	20-1,5 Ω	Piezoresistividad	[17]
D:7 μ m Ge: 1,6 Rt: 3,8GPa E:226GPa ρ :1,5 Ω m k: 10 W/m*K PAN-based	FC: 0% a 1,5% en fracción de volumen.	a/c 0,45-0,85 HS 20% wt AF/c 1,2 AG/c 2,4 Sp 0-3,6% wt Eth 0-1,2% wt TBP 0-0,8% wt	Rc: 40-15MPa Rf: 1,25-2,6MPa	100-0,001		[40]

Tabla 2.2.3: Experiencia de ensayos con fibra de carbono.

2.2.4. Árido Siderúrgico

El árido siderúrgico es un material que se utiliza comúnmente como agregado en la fabricación de hormigón reciclado. El árido siderúrgico puede provenir de la escoria de acero y/o cobre que es un material conductor y se puede utilizar para mejorar la conductividad eléctrica del hormigón.

La adición de árido siderúrgico al hormigón conduce a un aumento en la resistividad



Figura 2.2.5: Ejemplos de árido siderúrgico

eléctrica y, por lo tanto, a una mejor conductividad. Esto se debe a que el árido siderúrgico es un material conductor que conduce la electricidad de manera eficiente gracias a su composición química. Sin embargo, la estructura química y física es variada, esta depende de cada aseria, del material que se utilice, como se trate al residuo y varias variables dentro de su operación y obtención [43, 44].

Además, árido siderúrgico muestra una contribución a la resistencia a la compresión, resistencia a flexión, durabilidad y una mejora en la adherencia entre hormigón y barras de refuerzo [45–48]. Por otro lado, la incorporación de áridos siderúrgico en la mezcla del hormigón puede afectar la trabajabilidad de la mezcla por lo que la modificación del esqueleto granular aumentando el contenido de finos mejorará la consistencia. Por lo tanto, las características que el árido siderúrgico añade al hormigón le permiten proporcionar un medio que favorece la conductividad.

En general, la escoria con altos contenidos de hierro es la más adecuada para la fabricación de hormigón conductor, ya que proporciona una buena conductividad eléctrica y es relativamente económica.

La escoria de acero usada en hormigón se puede clasificar en escorias de alto horno (EAH) y escorias de arco eléctrico (EAE). Los dos tipos de escoria de acero se pueden usar para obtener hormigón conductor. Sin embargo, la elección depende del tipo de aplicación y de las propiedades específicas que se buscan en el hormigón.

Por ejemplo, las escorias de alto horno tienen una granulometría uniforme y una alta reactividad química, lo que las hace adecuadas para mejorar la durabilidad y la resistencia mecánica del hormigón. Por otro lado, las escorias de arco eléctrico tienen una gran cantidad de compuestos de óxido metálico, lo que las hace más conductoras que las escorias de alto horno, por lo que son más adecuadas para aplicaciones en las que se requiere una alta conductividad eléctrica, como en el caso del hormigón conductor [45].

La escoria de cobre al ser un subproducto de la fundición y refinado de cobre que se puede utilizar en la fabricación de hormigón conductor. La escoria de cobre es un material que tiene propiedades conductoras similares a la escoria de acero. Entonces, el uso de escoria de cobre en el hormigón puede mejorar sus propiedades eléctricas y térmicas [49].

La cantidad de escoria de cobre que se utiliza en el hormigón puede variar según las especificaciones del proyecto. Por lo general, se agrega alrededor del 10 % al 15 % de escoria de cobre en peso del cemento utilizado. La escoria de cobre se mezcla con los otros materiales del hormigón, como agregados, cemento y agua, para crear una mezcla homogénea [50, 51].

Adición conductiva	Características de la adición	Concentración	Proporción de mezclas	Propiedades mecánicas	Resistividad eléctrica [Ω m]	Referencia	
Escoria de cobre	Ae: 472 m ² /kg Ge: 3,8 D: 55-75um	EC: 0 % a 60 % en reemplazo de agregado fino;	a/c	0,43	Rc: 15-35MPa	5000-200	[52]
			AF/c	3	Rf: 3-4,8MPa		
			AG/c	0,667			
			CV/c	0,22			
Escoria de acero	Ge: 3,7 D: 0-4mm abs: 2,1%	EAE: 0 % a 100 % en reemplazo de agregado fino	a/c	0,5	Rc: 38,4-42,5MPa	8930-240	[45]
			AF/c	3	Rf: 7,9 -9,2MPa		
			FC	0 %-4 % wt			

Tabla 2.2.4: Experiencia de ensayos con árido siderúrgico.

En conclusión, los áridos siderúrgicos provenientes de la industria de aserria y de cobre permiten alcanzar propiedades eléctricas y mecánicas al hormigón. La literatura muestra que el uso de escoria de cobre puede mejorar la conductividad eléctrica del hormigón, lo que lo hace adecuado para aplicaciones como calefacción y detección de grietas.

2.2.5. Combinación de dos o más adiciones conductoras

El hormigón conductor se ha convertido en una solución atractiva para una amplia gama de aplicaciones, como sistemas de calefacción por suelo radiante y cables calefactores, debido a su capacidad para conducir electricidad. Para mejorar aún más las propiedades eléctricas del hormigón, se han investigado diferentes materiales conductores para su incorporación en la matriz de hormigón. Uno de los enfoques más prometedores es la combinación de dos o más adiciones conductoras, lo que puede mejorar la conductividad eléctrica del hormigón y, en última instancia, su rendimiento.

La combinación de dos o más adiciones conductoras en el hormigón es una técnica que se utiliza para mejorar las propiedades eléctricas y mecánicas del hormigón conductor. Esta

técnica implica la adición de dos o más tipos de adiciones conductivas, como fibras metálicas, grafito, fibras de carbono, negro de humo, entre otros.

Algunos estudios han demostrado que la combinación de diferentes tipos de adiciones conductivas en el hormigón puede mejorar significativamente su conductividad eléctrica y su resistencia mecánica. Sin embargo, la combinación de diferentes tipos de adición también puede presentar algunos desafíos, como la selección adecuada de los materiales y la optimización de la distribución espacial de las adiciones en el material (ver tabla 2.2.5).

Adiciones híbridas	Contenido de adición	Material de la matriz	Resistividad eléctrica [Ω m]	Aplicación	Ref.
FC y FA	1% en volumen de FC con 2% en volumen de FA; 2% en volumen de FC con 1% en volumen de FA; 1,5% en volumen de FC y FA	Pasta de cemento con: a/c: 0,5 ; HS: 0,2% en peso de cemento	5,12; 1,87; 4,92	-	[41]
FC y PG	FC con 1% en peso y PG (hasta 50% en peso)	Mortero de cemento con: a/(c+PG): [0,44; 0,52; 0,53]; AF/c:1; CMC:0,4% en peso de cemento; TP: 0,03% en peso de cemento	106,1-0,2	Piezoresistividad	[53]
FC y PG; FC y NTCPM	10 a 30% en peso de GP con 0,1 a 2% en peso de CF; 0,1 a 2% en peso de NTCPM con 0,4% en peso de FC.	Mortero de cemento con: a/c:0,5; AF/c:1	1000-0,12; 0,6-1,6	-	[54]
FC y NTCPM	15% vol% CF con 1 vol% NTCPM	Pasta de cemento con: a/c:0,4; HS/c:0,2; MC:0,4% wt; D:0,2% wt;	3.71	Piezoresistividad	[55]

Sigue en la página siguiente.

Adiciones híbridas	Contenido de adición	Material de la matriz	Resistividad eléctrica [Ω m]	Aplicación	Ref.
NNH y FC	1 o 2 % en peso de FC con 0,4 o 0,8 % en peso de NNH	Concreto con: a/c:0,45; AF/c:1,98; AG/c:1,98; CV/c:0,43; SP:0,58 % en peso de cemento; D:0,58-2,13 % en peso de cemento.	600-200	Piezoresistividad	[25]

NNH: Nanonegro de humo; NTCPM: Nanotubos de carbono de pared múltiple; AF: Árido fino
AG: Árido grueso; CV: Ceniza Volante; D: Dosificación

Tabla 2.2.5: Experiencia de ensayos híbridos.

Al combinar dos o más adiciones conductoras en el hormigón conductor, pueden surgir problemas potenciales, como la formación de grumos y la mala dispersión de las adiciones en la matriz de hormigón. También puede ocurrir una interacción química no deseada entre diferentes tipos de adiciones, lo que afectaría la conductividad eléctrica del material compuesto [1, 56]. Además, la adición de múltiples adiciones conductoras puede aumentar la complejidad del proceso de fabricación y los costos asociados.

En términos generales, la inclusión de adiciones conductoras permite la creación de un hormigón conductor con una conductividad eléctrica óptima y propiedades adaptadas a las necesidades específicas de cada aplicación. Además, la combinación adecuada de estos aditivos puede resultar en una reducción de los costos del material, ya que algunos de ellos pueden ser más costosos que otros.

2.3. Dosificación

Existen diferentes métodos de dosificación para producir hormigón conductor, los cuales pueden variar según los materiales conductores que se utilicen y la resistencia eléctrica deseada. A continuación, se presentan algunos de los métodos más comunes [57–59]:

Dosificación por volumen: Este es el método más simple y consiste en dosificar los materiales por volumen, sin tener en cuenta las características específicas de los mismos. En este caso, se pueden utilizar diferentes materiales conductores, como polvo de grafito, negro de humo, fibra de carbono, entre otros. Sin embargo, este método no garantiza una resistividad

específica, por lo que puede ser necesario ajustar la cantidad de material conductor en función de los resultados obtenidos en los ensayos.

Dosificación por peso: Este método consiste en dosificar los materiales por peso, teniendo en cuenta las características específicas de cada uno de ellos. En este caso, se pueden utilizar diferentes materiales conductores, y se pueden ajustar las cantidades en función de la resistividad deseada. Este método es más preciso que el anterior y permite obtener resultados más consistentes.

Método de la pasta conductora: Este método consiste en producir una pasta conductora a partir de una mezcla de cemento, agua y material conductor, y posteriormente mezclarla con agregados para producir el hormigón conductor. En este caso, se pueden utilizar diferentes materiales conductores, como polvo de grafito, negro de humo, ceniza volante, entre otros. Este método permite una dosificación precisa del material conductor y puede producir hormigón con resistividad muy baja.

Método de la adición separada: Este método consiste en producir una mezcla de hormigón convencional y posteriormente agregar material conductor en forma de polvo o fibra. Este método puede ser utilizado para producir hormigón conductor con características específicas, pero requiere una dosificación precisa del material conductor para obtener los resultados deseados.

En general, la dosificación de hormigón conductor requiere una cuidadosa selección de los materiales conductores y una dosificación precisa para obtener los resultados deseados en términos de resistividad eléctrica. Además, es importante realizar ensayos en las mezclas para ajustar la cantidad de material conductor y garantizar la calidad del hormigón conductor producido.

2.4. Teoría de percolación

La teoría de percolación es un modelo matemático utilizado para describir el comportamiento de materiales heterogéneos en los que la conductividad eléctrica o térmica depende de la conectividad entre las diferentes partes del material. En el caso del hormigón conductor, la teoría de percolación se utiliza para analizar cómo la presencia de conductores eléctricos (por ejemplo, fibras de carbono o grafito) en un medio aislante (hormigón) afecta la conductividad eléctrica del conjunto [56].

En términos generales, la teoría de percolación sostiene que la conductividad eléctrica

de un material heterogéneo aumenta de manera abrupta a medida que se alcanza un cierto umbral de conectividad entre las diferentes partes conductoras del material. Este umbral se conoce como “umbral de percolación” y está relacionado con la densidad y la distribución de los conductores en el material.

En el caso del hormigón conductor, la teoría de percolación se utiliza para estudiar cómo la presencia de fibras conductoras en el hormigón afecta su conductividad eléctrica. Cuando la densidad y distribución de las fibras es baja, el hormigón es un aislante eléctrico. Sin embargo, a medida que se aumenta la cantidad de fibras, llega un punto en el que se alcanza el umbral de percolación y el hormigón se convierte en un conductor eléctrico. La teoría de percolación se utiliza para determinar la cantidad y distribución óptimas de fibras conductoras para lograr una conductividad eléctrica deseada en el hormigón conductor [10, 33, 56].

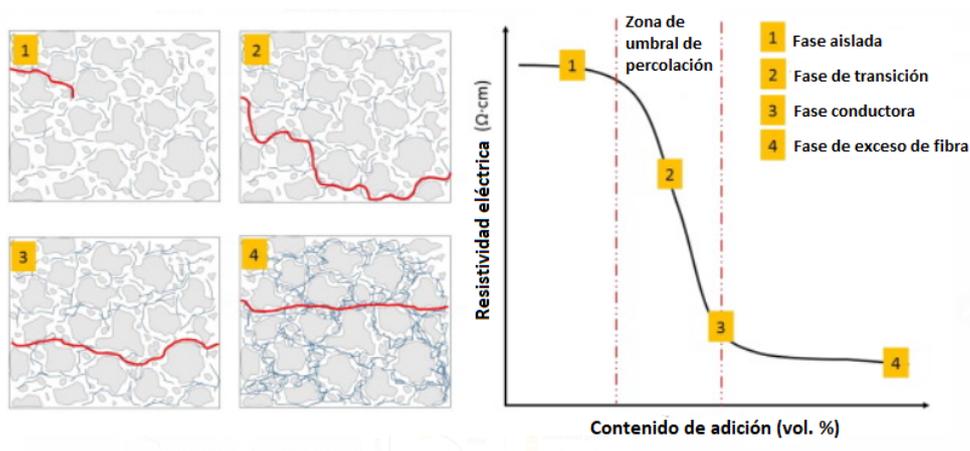


Figura 2.4.1: Teoría de percolación [10].

La percolación de esqueleto granular se refiere a la formación de un camino continuo de partículas conductoras dentro de un material conductor, como el hormigón conductor. En este caso, las partículas conductoras se utilizan como esqueleto granular en lugar de agregarse a un material no conductor. Cuando la concentración de partículas conductoras produce una distribución adecuada, se forma un camino continuo que permite la transferencia de corriente eléctrica a través del material.

Cuando la cantidad de material conductor en el hormigón es insuficiente, la percolación no se produce de manera adecuada y la conductividad eléctrica del material puede ser baja o incluso nula. Por otro lado, si se agrega una cantidad excesiva de material conductor, esto puede afectar negativamente las propiedades mecánicas del hormigón y su capacidad para soportar cargas estructurales.

Por lo tanto, es importante encontrar un equilibrio entre la cantidad de material conductor y la conductividad eléctrica deseada, para garantizar que el hormigón tenga las propiedades mecánicas y eléctricas necesarias para su uso en aplicaciones específicas, como en la construcción de estructuras de protección contra rayos o en la calefacción de pavimentos.

2.5. Material de Dispersión

Los materiales dispersantes se utilizan para mejorar la dispersión de las adiciones conductoras en la mezcla de hormigón y lograr una distribución uniforme en la matriz de cemento.

Por lo tanto, algunos ejemplos de materiales dispersantes que se han utilizado en la fabricación de hormigón conductor son:

1. **Polímeros:** Los polímeros se utilizan como materiales dispersantes para mejorar la distribución uniforme de las partículas en el hormigón. Los polímeros, como el policarboxilato y el poliacrilato, son comúnmente utilizados como materiales dispersantes en la fabricación de hormigón. Estos polímeros actúan como agentes aglutinantes que mantienen las partículas suspendidas.

Los policarboxilatos son un tipo de aditivo superplastificante utilizado para mejorar la fluidez del hormigón, reducir su contenido de agua y mejorar su resistencia a largo plazo. El policarboxilato se une a las partículas de cemento en el hormigón y evita que se aglomeren, lo que mejora la homogeneidad de la mezcla. También ayuda a reducir la segregación y la exudación en el hormigón.

El poliacrilato, por otro lado, es un polímero que tiene la capacidad de absorber y retener grandes cantidades de agua. Se utiliza en el hormigón para mejorar la retención de agua y, por lo tanto, reducir la contracción y el agrietamiento durante el proceso de fraguado. Sin embargo, el poliacrilato no tiene propiedades surfactantes y no se utiliza para reducir la tensión superficial del agua en el hormigón.

2. **Adiciones minerales:** Las adiciones minerales se utilizan como materiales dispersantes para mejorar la distribución uniforme de las partículas conductoras en el hormigón. Las adiciones minerales pueden actuar como dispersantes debido a su capacidad para reaccionar con el cemento Portland y formar compuestos químicos que reducen la carga superficial de las partículas de cemento. Esto puede reducir la repulsión electrostática

entre las partículas y permitir que se dispersen más fácilmente en la mezcla de hormigón.

Además, las adiciones minerales también pueden tener una superficie específica grande y una carga superficial alta, lo que les permite adsorber y retener agua en su superficie, reduciendo así la cantidad de agua libre en la mezcla y mejorando la cohesión y la densidad del hormigón. Por ejemplo el humo de sílice (HS) y las cenizas volantes (CV) actúan como agentes dispersantes que mantienen las partículas conductoras en suspensión lo que resulta en una distribución más homogénea.

3. **Surfactantes:** Los surfactantes son sustancias químicas que se utilizan para reducir la tensión superficial entre dos líquidos o entre un líquido y un sólido. Los surfactantes actúan como agentes de superficie que mantienen las partículas conductoras en suspensión y las distribuyen uniformemente a lo largo del hormigón. Los surfactantes pueden ser aniónicos, catiónicos o no iónicos, y se seleccionan en función de las propiedades del hormigón que se buscan mejorar.

La dispersión de los nanomateriales en el hormigón conductor es un proceso crítico para obtener las propiedades mecánicas y eléctricas deseadas en el material. Debido a su tamaño extremadamente pequeño, los nanomateriales tienen una alta superficie específica y una gran tendencia a aglomerarse, lo que puede dificultar su dispersión uniforme en la mezcla de hormigón [60].

Para dispersar eficazmente los nanomateriales en el hormigón, es necesario utilizar técnicas especiales de mezclado y aditivos dispersantes adecuados. Estos aditivos pueden ser polímeros, surfactantes u otros materiales que ayuden a separar y dispersar las partículas de nanomaterial en la mezcla de hormigón (ver tabla 2.5.1)[61, 62].

Por ejemplo, los estudios alrededor de nanotubos de carbono y nanofibras de carbono concluyen que el manejo de la dispersión y comprender la complejidad de los mecanismos fundamentales dentro de la pasta y las interacciones en las interfaces son clave para optimizar los beneficios de la adición de estos nanomateriales al concreto [63, 64].

En resumen, mientras que el policarboxilato puede tener propiedades surfactantes, no se considera un surfactante en el sentido técnico de la palabra en el hormigón, ya que su función principal es mejorar la trabajabilidad y la fluidez del hormigón, no reducir la tensión superficial.

Adicionalmente, cuando las adiciones minerales se agregan al hormigón pueden reducir la cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla de la consistencia adecuada, lo que puede mejorar la resistencia y la durabilidad del hormigón. También pueden mejorar la

Categoría	Material de dispersión	Objetos de dispersión	Adiciones funcionales dispersados
	Agente reductor de agua	Adiciones funcionales y partículas de cemento	Nanotubos de carbono, nanofibras de carbono, negro de humo, polvo de grafito, polvo de níquel, nanotitanio, nanohierro.
Surfactante	Metilcelulosa	Adiciones funcionales	Fibras de carbono, nanotubos de carbon.
	Carboximetilcelulosa	Adiciones funcionales	Fibras de carbono.
	Carboxietilcelulosa	Adiciones funcionales	Fibras de carbono.
	Hidroxipropilmetilcelulosa	Adiciones funcionales	Fibras de carbono.
	Dodecil sulfato de sodio	Adiciones funcionales	Nanotubos de carbono, nanofibras de carbono.
	Dodecilbenceno sulfonato de sodio	Adiciones funcionales	Nanotubos de carbono.
	Dodecilbenceno sulfonato de sodio y ácido poliacrílico	Adiciones funcionales	Nanotubos de carbono.
Adición mineral	Humo de sílice	Adiciones funcionales y partículas de cemento	Fibras de carbono, negro de humo, fibras de acero, polvo de níquel.
	Ceniza volante	Adiciones funcionales y partículas de cemento	Escoria de acería.

Tabla 2.5.1: Materiales de dispersión efectivos para adiciones funcionales en hormigón

trabajabilidad y la cohesión de la mezcla, reducir la segregación y el sangrado, y mejorar la homogeneidad y la densidad del hormigón.

Finalmente, es importante tener en cuenta que la elección del material dispersante depende de varios factores, como la cantidad de partículas conductoras a distribuir, la frecuencia de la corriente eléctrica y las condiciones ambientales en las que se utilizará el hormigón.

2.6. Mezclado

Las técnicas de mezclado colaboran en la dispersión de los materiales. Por ejemplo, la dispersión de los nanomateriales en el hormigón incluyen la mezcla en seco, la mezcla húmeda y la mezcla por ultrasonido [65]. En la mezcla en seco, los nanomateriales se mezclan con los componentes secos del hormigón antes de agregar agua. En la mezcla húmeda, los nanomateriales se mezclan con agua antes de agregarlos al hormigón. En la mezcla por ultrasonido, los nanomateriales se dispersan en la mezcla de hormigón utilizando ondas de sonido de alta frecuencia.

Tian et al., 2019 identificaron tres métodos de mezclado de material de adición y cemento relacionados con la dispersión de las partículas [2]. El método de adición inicial es común y consiste en premezclar la adición funcional en agua o solución acuosa, especialmente para partículas fibrosas. El método de adición final es adecuado para adiciones con partículas

más grandes y no requiere un tratamiento previo de solución acuosa. La mezcla sincrónica es apropiada para un sistema de relleno híbrido, donde se mezcla inicialmente el cemento y la primera adición, y luego se agrega una solución con una segunda adición (ver Figura 2.6.1). Estos métodos pueden ser útiles para la dosificación adecuada de adiciones en el diseño de hormigón conductor.

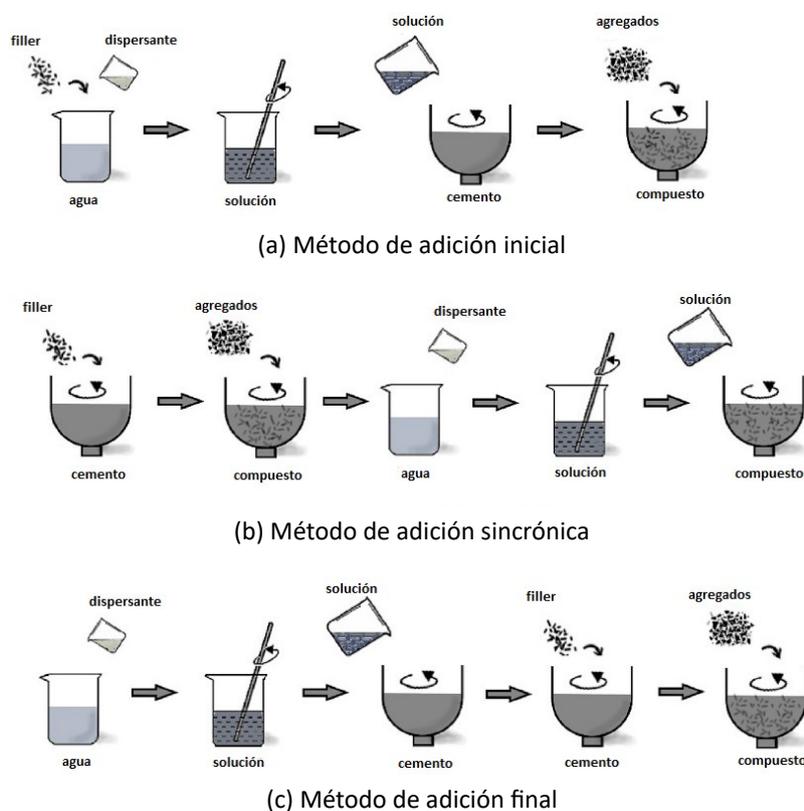


Figura 2.6.1: Métodos de adición [2].

Por lo tanto, podemos establecer que existen varios métodos para combinar las adiciones conductoras dentro de la mezcla de hormigón, entre ellos se encuentran:

1. Método de mezcla seca: En este método, los materiales conductores se mezclan previamente en seco antes de agregarlos al hormigón. La mezcla seca asegura que los materiales conductores estén uniformemente distribuidos en la mezcla de hormigón.
2. Método de mezcla húmeda: En este método, los materiales conductores se mezclan previamente con agua para formar una suspensión antes de ser agregados al hormigón. Este método se utiliza para mejorar la dispersión de los materiales conductores en la mezcla de hormigón.
3. Método de adición directa: En este método, los materiales conductores se agregan directamente a la mezcla de hormigón durante el proceso de mezcla. Este método es más simple y rápido que los métodos de mezcla previa, pero puede resultar en una distribución no uniforme de los materiales conductores.

4. Método de premezcla: En este método, los materiales conductores se mezclan previamente con una pequeña cantidad de cemento y agua para formar una pasta conductora. Esta pasta se mezcla luego con la mezcla de hormigón principal. Este método es útil para asegurar una distribución uniforme de los materiales conductores en la mezcla de hormigón.

También se debe considerar que, el tiempo de mezcla, la velocidad de mezcla y la elección del aditivo son variables que proporcionarían una mezcla homogénea en un hormigón. Además, estas variables colaboran en la dispersión de las partículas.

En conclusión, las mezclas de hormigón conductivo ofrecen mejoras en las propiedades eléctricas, la resistencia y la durabilidad en comparación con el hormigón convencional, lo que las hace adecuadas para aplicaciones específicas en las que se requiere conductividad eléctrica. Sin embargo, la fabricación y manipulación de estas mezclas pueden ser más complejas y su costo puede ser más elevado debido a la adición de aditivos conductivos. En general, la elección de un proceso de mezclado de hormigón conductivo no dependerá solo de la aplicación específica y de los requisitos de la estructura sino también del tipo de adiciones funcionales a añadir.

Capítulo 3

Aplicaciones Piezoresistivas y Calefactantes

3.1. Introducción

En esta sección se explorarán de manera sintetizada las aplicaciones piezoresistivas y calefactantes en materiales a base de cemento en el ámbito de la edificación.

Los materiales cementosos son ampliamente utilizados en la construcción debido a sus propiedades como la resistencia, durabilidad y facilidad de uso. La incorporación de tecnologías piezoresistivas en el cemento permite medir la tensión y deformación en las estructuras de hormigón, lo que resulta útil en la monitorización de la salud estructural de los edificios y puentes.

Además, la utilización de materiales calefactantes en el cemento puede ayudar a regular la temperatura en los edificios, lo que conduce a ahorros de energía y a una mejora en la comodidad de los ocupantes.

En este sentido, el estudio de las aplicaciones piezoresistivas y calefactantes en materiales cementosos es un tema de investigación de gran interés en la comunidad científica, ya que puede tener un impacto significativo en la industria de la construcción.

3.2. Autodetección

El hormigón con autodetección es aquel que tiene la cualidad de permitir una monitorización continua de sus elementos. El hormigón con auto detección también es llamado hormigón piezorresistivo o sensible a la presión. La capacidad de auto detección se logra con la implementación de rellenos funcionales que permiten obtener la capacidad de sentir las deformaciones, tensiones o daño dentro de si mismo sin perder sus capacidades mecánicas

[9, 66–69].

El proceso de detección de cambios en el hormigón autodetectante funciona mediante la aplicación de una corriente eléctrica a través del material. La resistencia eléctrica del material cambia cuando hay un cambio en la tensión, la deformación o la vibración, lo que se traduce en una variación en la corriente eléctrica. Estos cambios pueden ser detectados y transmitidos a un sistema de control para su monitoreo y análisis.

La creación de un hormigón autodetectante se vincula al concepto de estructuras inteligentes debido a sus capacidades. Sin embargo, las dificultades en esta aplicación están relacionadas con el control de contenido de agua la distribución de los rellenos funcionales y finalmente la repetitividad de la respuesta eléctrica.

En general, se considera que un hormigón autodetectante es aquel que tiene una resistividad eléctrica suficientemente baja para permitir la detección de fallos en el sistema de tierra, pero suficientemente alta para prevenir la corriente de fuga peligrosa en caso de fallo.

En la mayoría de las aplicaciones, se requiere que el hormigón autodetectante tenga una resistividad eléctrica comprendida entre 1000 a 100000 Ω/m^2 . Sin embargo, estos valores pueden variar en función de los requisitos de seguridad, la frecuencia de la corriente y otros factores.

Por otro lado, elementos de hormigón con esta cualidad al estar sujetos a las acciones reales en la cual un elemento de hormigón este sometido a lo largo de la vida útil, dará información relevante para la calibración de modelos teóricos y monitoreo real.

Actualmente, para medir la deformación en una pieza de hormigón se usan las galgas extensiométricas. La mayoría de las galgas poseen una característica especial conocida como piezoresistividad. La resistividad eléctrica de un material piezoresistivo es variable y depende de la deformación mecánica. La piezoresistividad es el principio de detección más común utilizado en sensores.

Por lo general, la resistividad eléctrica de una materia depende de las posiciones y el movimiento de los átomos en su interior. Cuando la materia está estresada, la tensión se produce provocando el cambio de posición de los átomos. La resistividad se ve así alterada como consecuencia. Tal manera correlacionada es reversible. Por lo tanto, al monitorear un cambio en la resistividad, se pueden determinar las deformaciones en los elementos estructurales [2].

La pasta de cemento también es piezoresistiva y se usa como componente principal de

un sensor a base de cemento. Normalmente tiene una resistividad tan alta que su sensibilidad es baja. No obstante, su resistividad se puede reducir agregando componentes conductores como fibras de carbono y polvo de grafito [17].

En este sentido para cuantificar la percepción de la deformación se utiliza el factor de galga (FG), que consiste en un parámetro adimensional representado por la variación unitaria de la resistividad eléctrica sobre la deformación unitaria (ver ecuación 3.2.1). Es el mismo parámetro que el utilizado para las galgas extensométricas de uso común.

$$FG = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho_o}}{\frac{\Delta l}{l_o}} = \frac{\Delta\rho}{\rho_o \epsilon} \quad (3.2.1)$$

Donde:

$\Delta\rho$ = Variación de la resistividad eléctrica.

ρ_o = Resistividad eléctrica original.

Δl = Variación de la longitud.

l_o = Longitud original.

ϵ = Deformación unitaria.

Para una percepción de la deformación con suficiente magnitud y reversible, se necesita la adición de partículas conductoras de electricidad en la matriz cementosa. Sin embargo, no es necesario llegar al límite de percolación, es decir, no es necesario que el material de adición forme un camino continuo a través del hormigón, para que la percepción de la deformación sea efectiva. Esto implica que no se necesitan resistividades eléctricas muy bajas para percibir la deformación [67].

Para esta aplicación los materiales carbonosos se comportan muy bien y son muy adecuados, como los nanotubos de carbono y las fibras de carbono. La sensibilidad de la percepción de la deformación en hormigones eléctricamente conductores es muy alta con un valor de FG superior a 700, en comparación con el valor de FG de 2 para las galgas extensométricas de uso común [70]. Esto se debe a la variación de la resistencia eléctrica de un elemento. Esto no solo es causado por los cambios dimensionales generados por la aplicación de cargas, sino también por la variación de la resistividad eléctrica intrínseca del material. Modificaciones por variación en el tipo de microestructura e interacción de las fases que forman el material, es decir, matriz-fibra.

El estudio liderado por Xun, Y. & Kwon, E., tuvo como objetivo desarrollar nuevos compuestos piezoresistivos de nanotubos de carbono y cemento, y demostrar que la resistencia eléctrica de este material compuesto cambia proporcionalmente a los niveles de tensión de

compresión.

Además, evaluaron el potencial del compuesto como sensor de tensión-deformación en pruebas de laboratorio y carretera. El estudio también incluyó el desarrollo de compuestos de cemento y nanotubos de carbono con detección automática. Se encontró que los nanotubos de carbono pueden funcionar como elementos de refuerzo para mejorar la resistencia y dureza del pavimento de hormigón. Los resultados experimentales demostraron que el compuesto de nanotubos de carbono y cemento funciona como excelentes sensores de tensión-deformación en pruebas de laboratorio y de carretera (ver figura 3.2.1)[3].



Figura 3.2.1: Ensayo de carretera con hormigón autodetectante [3]

El uso de adiciones carbonosas en la conformación de piezas a base de cemento ha demostrado ser una herramienta útil para el monitoreo de la salud estructural de la infraestructura civil, al permitir la detección de la tensión y deformación del hormigón.

Los resultados experimentales de pruebas de laboratorio y de carretera han demostrado el potencial del uso de este tipo de hormigón en la construcción de infraestructuras civiles, lo que podría tener un impacto positivo en la seguridad y eficiencia de estas estructuras. En conclusión, la tecnología de hormigón autodetectante es un área de investigación en constante evolución con el potencial de revolucionar la forma en que se construye y monitorea la infraestructura civil.

3.3. Función Calefactante

La capacidad del hormigón conductor para desarrollar funcionalidades térmicas, como el autocalentamiento y el control de la temperatura, está directamente relacionada con la mejora de su conductividad eléctrica. En este sentido, un material cementoso conductor actúa como una resistencia eléctrica, transformando parte de la energía eléctrica en calor, aumentando la temperatura del material. Este comportamiento se denomina efecto Joule y permite que el hormigón desarrolle la capacidad de calentar sistemas, construcciones, edificios o mo-

biliario urbano [4, 14, 39, 71, 72].

La calefacción eléctrica se logra al pasar corriente eléctrica a través de una resistencia que actúa como elemento calefactor. En el caso de edificios y otras estructuras, la calefacción implica embeber elementos calefactores, comúnmente aleaciones metálicas como el níquel-cromo, en el material estructural para conseguir una calefacción por resistencia. Sin embargo, este proceso afecta negativamente a las propiedades mecánicas del componente y limita la ubicación de los elementos calefactores, lo que puede resultar en una calefacción no uniforme. Además, los materiales estructurales suelen tener una baja conductividad térmica, lo que agrava la falta de uniformidad.

Una solución a estos problemas es un material cementicio conductor eléctrico que pueda actuar como resistencia y elemento calefactor, sin necesidad de embeber hilos en el componente estructural. A través de la adición de materiales a base de carbono a la matriz cementosa, se puede reducir la resistividad eléctrica del hormigón convencional y hacer que sea efectivo para la calefacción por resistencia. La resistividad eléctrica es un parámetro fundamental que define la efectividad de un material para aplicaciones térmicas, especialmente en relación con la potencia y la temperatura máxima [1, 4, 14, 34, 71].

Para utilizar el hormigón como resistencia, en el sistema de calefacción mediante el efecto Joule, la resistencia eléctrica no puede ser muy alta, de lo contrario, la intensidad de la corriente eléctrica que atraviesa el material sería muy baja, haciendo ineficiente el sistema. Aunque no puede ser demasiado alto, ya que se necesitaría una intensidad de corriente eléctrica muy alta para alcanzar la potencia suficiente.

Un hormigón calefactante funciona mediante la circulación de corriente eléctrica a través del material. El hormigón es mezclado con materiales conductores, como fibra de carbono, grafito, nanotubos de carbono, nanohierro, etc. Estos materiales conductores mejoran la conductividad eléctrica del hormigón, permitiendo que la corriente eléctrica circule a través del material.

Cuando se aplica corriente eléctrica a una superficie de hormigón calefactante, se genera calor a través de la resistencia eléctrica del material. Este calor se puede utilizar para calentar la superficie y mantenerla a una temperatura adecuada.

Utilizar un material cementoso con estas características tendría una amplia gama de aplicaciones prácticas, desde la evaporación del agua de lluvia en canchas deportivas hasta la calefacción de edificios y el derretimiento de hielo en carreteras y pistas de aeropuertos, así como para el calentamiento de mobiliario urbano durante todo el año. Además, la calefacción

por resistencia está ganando terreno debido a su bajo costo, adaptabilidad y alta eficiencia de conversión de energía. Por lo que, las aplicaciones de este tipo se presentan como una mejor alternativa para el medioambiente ya que desplazarán a los sistemas calefactores que usan combustibles fósiles.

3.3.1. Suelo radiante mediante soleras y baldosas de hormigón conductivo

El suelo radiante convencional consiste en una red de cables eléctricos o tuberías de agua caliente instalados en una capa de hormigón para proporcionar una distribución uniforme del calor en una habitación. En cambio, el suelo radiante mediante soleras y baldosas de hormigón conductivo es un sistema de calefacción eficiente que aprovecha la propiedad de conductividad eléctrica del concreto para generar calor en el piso.



Figura 3.3.1: Suelo radiante tradicional

Para resistir las tensiones de contracción y temperatura en las soleras de calefacción de suelo, se agrega comúnmente refuerzo de fibra a la mezcla compuesta. Sin embargo, al incluir fibras conductoras de electricidad en la mezcla, se puede lograr un calentamiento eléctrico in situ del enrasado sin necesidad de instalar elementos de calefacción debajo de la placa del piso. Esto es posible siempre y cuando las fibras conductoras proporcionen una buena conductividad del compuesto en el piso y una alta resistencia a la flexión, lo que resulta en un hormigón multifuncional [38, 73].

Los investigadores llegaron a la conclusión de que el principio utilizado en pavimentos exteriores para derretir hielo es aplicable en baldosas interiores. En una colaboración entre Schwenk Zement KG y la Universidad de Ausburgo, se desarrolló una placa calefactora modular con electrodos incrustados que permiten el calentamiento individual de diferentes áreas [38]. Para lograr la mejor conductividad, se utilizó cemento reforzado con fibra de carbono y una proporción de fibras de carbono del 1-2 % en volumen. Gracias a una rejilla de electrodos incrustados, se pueden calentar áreas seleccionadas hasta 100°C con un voltaje de CA de 12V, lo que permite ahorrar energía y reducir costos. Los electrodos de grafito o plata se utilizan

para propósitos de contacto (ver figura 3.3.2).

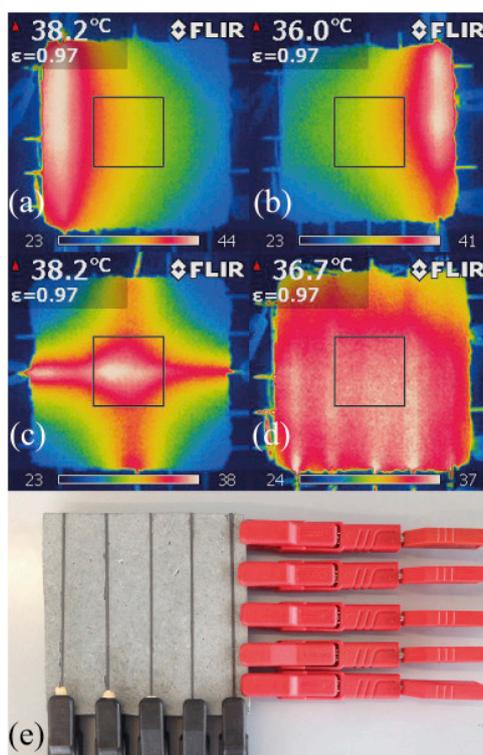
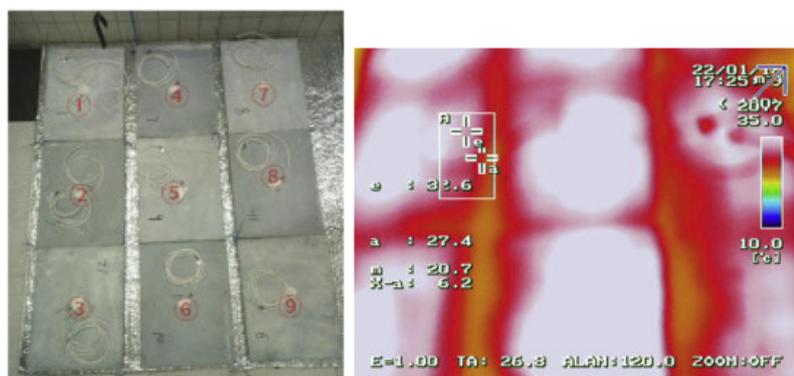


Figura 3.3.2: Imágenes infrarrojas de calentamiento de placas inteligentes [38].

También se han realizado investigaciones que demuestran la posibilidad de crear piezas conductoras de concreto. Un ejemplo es el estudio llevado a cabo por Zhao, R. et al, en el cual se produjeron nueve piezas de concreto conductoras para probar un sistema de calefacción radiante interior. El sistema se integró con sensores térmicos y un interruptor de control de alimentación automática. Para minimizar el riesgo de sobrecarga y facilitar la detección y reparación en caso de fallos, se utilizó un circuito eléctrico que combinaba una serie de conexiones en serie y en paralelo (ver figura 3.3.3) [4].



(a) Sistema de suelo radiante (b) Foto térmica de muestras radiantes

Figura 3.3.3: Ejemplo de sistema de suelo radiante [4].

En el estudio llevado a cabo por Zhao, R. et al., se observó que el uso de losas de hormigón conductoras de 20 mm de grosor con una malla de alambre de acero logró una excelente capacidad de calentamiento eléctrico, aumentando su temperatura en 52°C en tan solo una hora con una alimentación de 36 V CA. Asimismo, los resultados demostraron que este sistema de suelo radiante también fue eficaz para aplicaciones de calefacción, incrementando la temperatura en 4,5°C en tan solo 10 minutos. (ver figura 3.3.3) [4].

El uso de suelo radiante ofrece múltiples beneficios, tales como la eficiencia energética, la reducción del consumo de combustibles fósiles y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero. Además, el empleo de hormigón conductor para el suelo radiante puede ser una opción más rentable en comparación con los sistemas de calefacción convencionales. De esta manera, el suelo radiante por medio de material cementoso multifuncional se presenta como una alternativa innovadora y ecológica para la climatización de espacios interiores.

3.3.2. Deshielo de pavimentos de hormigón

El deshielo de pavimentos es un problema importante en áreas con bajas temperaturas invernales. La solución comúnmente utilizada es el uso de sales y productos químicos, pero esto es costoso y dañino para el medio ambiente. Una alternativa prometedora es el uso de hormigón multifuncional, que tiene la capacidad de autocalentarse y derretir la nieve y el hielo sin productos químicos.

El hormigón multifuncional es un material innovador que combina la resistencia y durabilidad del hormigón tradicional con la capacidad de conducir electricidad y generar calor. El uso de este material en el deshielo de pavimentos podría tener un impacto positivo en la seguridad vial, la reducción de costos y la sostenibilidad ambiental [1, 22, 40, 74, 75].

En algunas investigaciones sobre deshielo de pavimentos por sistema de calefacción, se estimó la resistividad eléctrica necesaria para generar un efecto de deshielo en pavimentos de esta funcionalidad en valores alrededor de 10 $\Omega\cdot\text{m}$ [5, 57, 74, 76, 77].

Sin embargo, la resistividad exacta requerida para un hormigón calefactante depende de varios factores, como la frecuencia de la corriente eléctrica, la cantidad de material conductor incorporado y la geometría del material.

En 1998, Yehia y Tuan desarrollaron una mezcla de concreto conductor para el deshielo de puentes mediante fibras de acero. Esta mezcla se utiliza para verter una capa en la parte superior de la plataforma del puente para deshielo o antihielo. Después de 28 días, las

propiedades de la mezcla cumplieran con las especificaciones de ASTM y AASHTO. Se realizaron experimentos de deshielo y antihielo en cinco tormentas de nieve de 1998 en dos losas de hormigón con una capa de hormigón conductor de 9 cm que generaron una potencia promedio de alrededor de 590 W/m^2 para evitar la acumulación de nieve y hielo [74, 78].



Figura 3.3.4: Resultados de anti-congelamiento [74].

Posteriormente, el trabajo de Yehia y Tuan sería parte del tablero calefactante del Puente Roca Spur convirtiéndose en la primera implantación en el mundo que utiliza hormigón conductor para el deshielo. El éxito del proyecto de demostración del Puente Roca es prueba de la efectividad del uso del hormigón conductor.



Figura 3.3.5: Conductos de PVC de cloruro de polivinilo y cajas de derivación preposicionadas en el tablero del puente de hormigón armado [78].

Al pasar de los años investigadores han utilizado hilos calefactores de fibra de carbono para crear un pavimento de hormigón autocalentable. Una de las ventajas de este enfoque es que los hilos se colocan y orientan por separado de la mezcla de hormigón, lo que facilita el control de su distribución y la homogeneidad de la producción de calor en el producto final. Este método, que implica la inserción de los hilos en el interior de las losas de hormigón, ha sido probado con éxito. Con una potencia de entrada de 1134 W/m^2 , se ha demostrado que

la temperatura en la superficie de la losa aumenta de -25 °C a más de 0 °C en 2,5 horas, a una tasa aproximada de $0,17\text{ °C/min}$ [79].

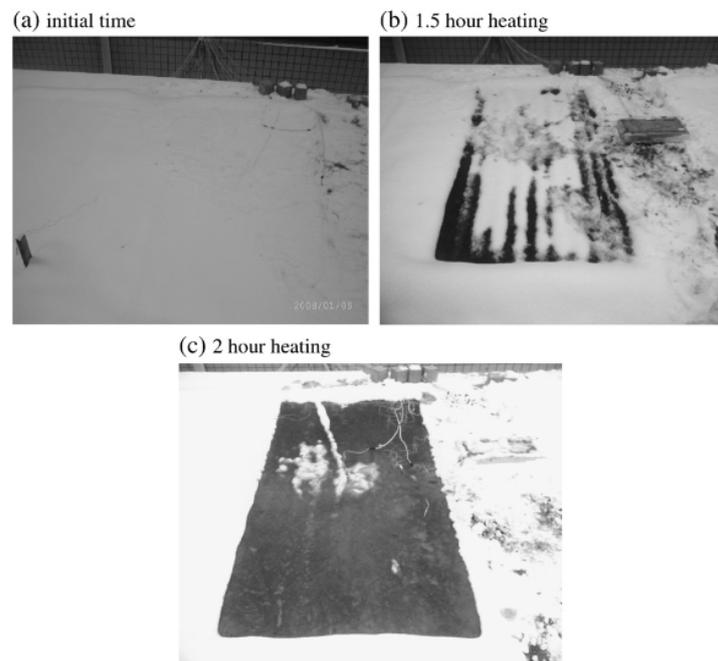
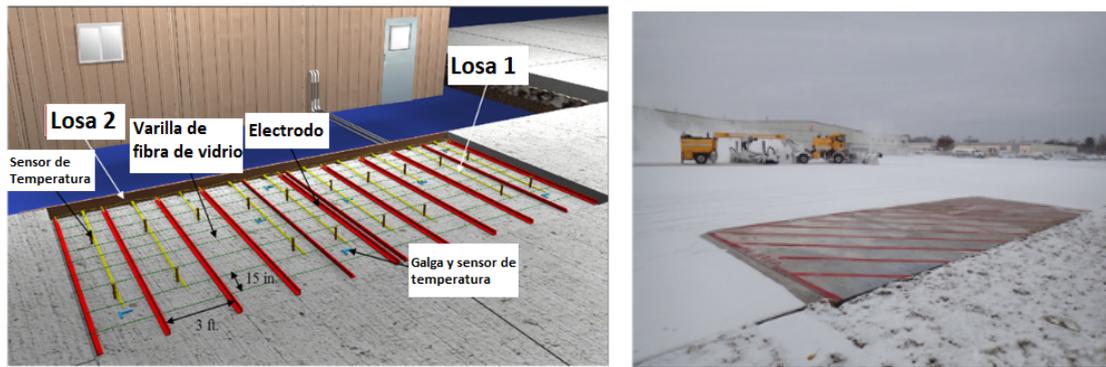


Figura 3.3.6: Experimento de descongelamiento [79].

En 2016, un equipo de investigadores de la Universidad de Arkansas construyó dos losas de hormigón conductor en la plataforma de Aviación General del Aeropuerto Internacional de Des Moines en Iowa. Se desarrollaron procedimientos de construcción para un sistema de pavimento calefactante basado en hormigón conductor y se evaluó el rendimiento de las losas de hormigón conductor durante la temporada de invierno 2016-2017. Los resultados indicaron que los sistemas de pavimento calefactante basados en hormigón conductor tienen una gran capacidad para el deshielo y anti-congelamiento. Este enfoque mantiene la superficie de la losa de concreto por encima del punto de congelación mediante el uso de energía de corriente continua suministrada por un sistema fotovoltaico y de batería (ver figura 3.3.7).



(a) Planos 3D de sistema de pavimento con hormigón conductor (b) Implementacion del sistema con hormigón conductor vs sistema tradicional

Figura 3.3.7: Sistema de pavimento con hormigón conductor [5].

En conclusión, los pavimentos construidos con hormigón conductor ofrecen una solución prometedora para el deshielo y anti-congelamiento en áreas de clima frío y nevado. A través del uso de materiales conductores de electricidad y la aplicación de energía eléctrica, estos pavimentos pueden generar calor y mantener una temperatura por encima del punto de congelación, evitando la acumulación de hielo y nieve en la superficie. Además, la tecnología de pavimento calefactante basado en hormigón conductor ha sido probada y demostrada con éxito en varios entornos, incluidos puentes y aeropuertos. En general, los pavimentos de hormigón conductor son una opción interesante y prometedora para la construcción de infraestructuras resistentes a las condiciones climáticas invernales.

Capítulo 4

Evaluación de mezclas monofásicas y bifásicas

4.1. Introducción

En los capítulos anteriores se han revisado los diferentes aspectos que inciden en la configuración de un hormigón conductor, así como los procedimientos utilizados para su dosificación. Se ha observado que a pesar de los diferentes métodos propuestos de dosificación para este tipo de hormigón, no existe un consenso único en cuanto a la proporción de los materiales empleados debido a la influencia de la naturaleza de las adiciones conductivas.

Como consecuencia, se ha decidido estudiar las proporciones de las adiciones carbonosas, áridos provenientes de escoria de acería y de la industria de cobre tanto en hormigón fresco como endurecido. Además, se individualiza cada hormigón por su adición conductiva, al igual que se realiza un hormigón patrón con arena de sílice y otro con fibra de carbono.

En este capítulo se presenta los aspectos metodológicos asociados al desarrollo de la campaña experimental. En primer lugar, se presenta una descripción simplificada de los materiales a utilizar. En segundo lugar, se presenta una sintaxis de los normas que rigen diferentes ensayos de caracterización de hormigón. Finalmente, se presenta el programa experimental y los objetivos que han guiado este trabajo.

4.2. Materiales a utilizar

4.2.1. Cemento

Al igual que con cualquier otro tipo de hormigón, el tipo de cemento utilizado en la mezcla puede afectar la resistencia y las propiedades del hormigón conductor. Sin embargo, en el caso del hormigón conductor, también es importante considerar la conductividad eléctrica del cemento utilizado.

De manera general, para las diferentes amasadas se empleará cemento tipo CEM I 52,5 R que cumple la norma EN 197-1. Se trata de un cemento tipo Portland con resistencias iniciales y finales elevadas. el cemento es de endurecimiento rápido incluso en clima frío. La utilización de este tipo de cemento obedece a que se trata del tipo de cemento empleado en Cataluña.

4.2.2. Aditivo

En todas las pruebas realizadas se emplearon dos tipos de aditivos: uno para modificar la trabajabilidad y otro para mejorar la resistencia. Se utilizó un aditivo superplastificante reductor de agua de alta actividad, basado en policarboxilatos (MasterGlenium ACE 425), y una suspensión de nanosilice precipitada (MasterRoc MS 685).

4.2.3. Arena de sílice

Durante las pruebas de laboratorio, se utiliza arena de sílice como árido fino. Este tipo de arena se utiliza en la fabricación de hormigón de alto rendimiento (UHPC por sus siglas en inglés) debido a que posee una granulometría uniforme que mejora la trabajabilidad y resistencia a la compresión del hormigón. Además, la arena de sílice tiene una alta resistencia al desgaste, lo que puede aumentar la durabilidad del UHPC en comparación con otros agregados. La utilización de la arena de sílice también puede proporcionar una superficie más lisa y uniforme en el hormigón, mejorando así la apariencia estética del mismo.

4.2.4. Betoflow

Betoflow es un filler de calcio carbonatado utilizado en la producción de hormigón autocompactante. Es un material que se añade a la mezcla con el objetivo de mejorar la fluidez del hormigón, reducir la segregación y controlar el exceso de aire. Se caracteriza por su forma redondeada y su tamaño uniforme, lo que lo hace ideal para su uso en mezclas de hormigón

con alta resistencia y alta trabajabilidad. Al ser un filler, no aporta resistencia mecánica al hormigón, pero sí mejora su trabajabilidad y cohesión, lo que resulta en una mezcla homogénea y de alta calidad.

4.2.5. Adiciones carbonosas

4.2.5.1. Fibra de carbono (FC)

Durante los ensayos se usa la fibra de carbono FCR Carbiso CT+ que se utiliza como adición conductiva. Es un material compuesto avanzado fabricado por la empresa Carbiso, especializada en la producción de materiales compuestos. Este material tiene alta resistencia, rigidez y dureza, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren un alto rendimiento mecánico y durabilidad. Además, el FCR Carbiso CT+ también tiene una excelente resistencia a la fatiga, impacto, corrosión y altas temperaturas (ver tabla 4.2.1). En resumen, este material es de alta calidad y rendimiento y se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones que requieren una gran resistencia y durabilidad.

Característica	FCR Carbiso CT+
Diámetro	7.0 μm
Longitud	6-12 mm
Densidad	1800 kg/m^3
Resistencia a la tracción	4150 MPa
Módulo de tracción	230-255 GPa
Resistividad Eléctrica	0.103/0.34 $\Omega\cdot\text{m}$

Tabla 4.2.1: Características de la fibra de carbono utilizada

4.2.5.2. Polvo de grafito (PG)

Con el objetivo de mejorar las propiedades eléctricas del hormigón, se utiliza polvo de grafito como aditivo para aumentar su conductividad eléctrica. El polvo de grafito se mezcla con otros materiales como cemento, agregados y aditivos. Los suministros de polvo de grafito se obtienen de la empresa Minerals i Derivats, S.A., que proporciona un producto con las siguientes especificaciones:

Característica	Grafito 96-6
Contenido de carbón	96,5 %
Cenizas	3.5 %
Densidad aparente	0,65 – 0,85 g/ml
Peso específico	2,1 – 2,3 g/cm ³
Granulometría	
0.425 mm	10 – 30 %
0.300 mm	Min. 80 %

Tabla 4.2.2: Características del polvo de grafito utilizado

4.2.5.3. Negro de humo (NH)

Se empleó el negro de humo como adición conductiva para mejorar la conductividad eléctrica del material. Este material está compuesto por partículas de carbono altamente puras y tiene una gran superficie, lo que permite su integración efectiva en materiales conductores y mejora su conductividad. Además, es altamente resistente y estable, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren gran durabilidad y resistencia. El proveedor del negro de humo utilizado en el desarrollo del material conductivo es Minerals i Derivats, S.A., con las siguientes especificaciones:

Característica	Negro Humo Conductivo XM
Densidad	≥ 115 kg/m ³
Tamaño medio partícula	30 ± 2 nm
Área superficial BET	120 ± 20 m ² /g
Absorción de aceite DBP	420 ± 40 cm ³ /100g
pH	6.5 – 9.5
Cenizas	≤ 2.0 %
Pérdida por desecación a 125°C	≤ 0.8 %

Tabla 4.2.3: Características del negro de humo utilizado

4.2.6. Cascarilla de laminación

Una opción para mejorar la conductividad es el uso de cascarilla de laminación, un subproducto siderúrgico que se obtiene del proceso de laminación en caliente del acero. Este material está compuesto principalmente por hierro y óxidos de hierro, y puede contener grasas y aceites en diferentes proporciones. Los suministros de este material provienen de Celsa Circular Steel.



Figura 4.2.1: Cascarilla de acero

Para realizar ensayos, el material se trata como un árido y se establece un tamaño máximo de partícula de 4 mm. De esta manera, se obtiene un material con una granulometría de 0 a 4 mm (ver la figura 4.2.1 y 4.2.2).

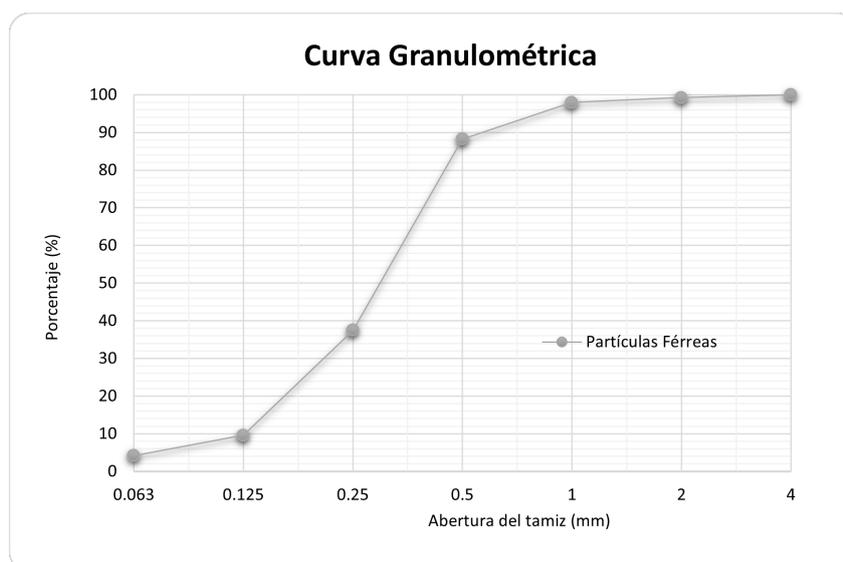


Figura 4.2.2: Granulometría de la cascarilla de acero

4.2.7. Polvos de aspiración de cobre

Los polvos de aspiración son materiales pulverulentos arrastrados por los gases de combustión de los diferentes hornos de producción de la industria metalúrgica. La empresa LA FARGA YOURCOPPER SOLUTIONS, S.A. dedicada a la producción y comercialización de semielaborados de cobre proporciona dos tipos diferentes de polvos de aspiración: CMG-1 y CMG-2. El esquema del proceso de obtención de ambos subproductos se muestra en la figura 4.2.3.

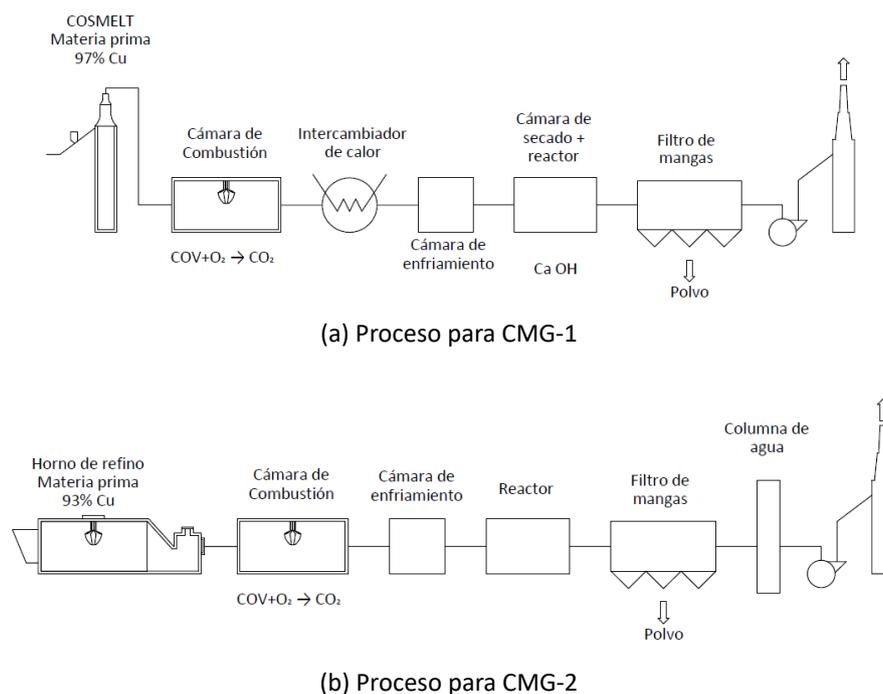


Figura 4.2.3: Recuperación de polvos de aspiración

Los polvos de aspiración fueron suministrados en un tamaño de partícula micrométrico, por lo que no fue preciso llevar a cabo molienda previa para su tratamiento. En la figura 4.2.4 se ve una muestra de cada uno de los polvos de aspiración suministrado.

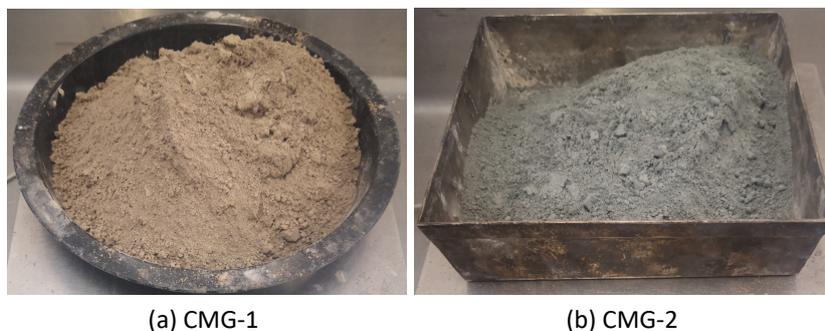


Figura 4.2.4: Recuperación de polvos de aspiración

4.2.8. Lodos de lavado de cobre

Por último, se ha proporcionado otra muestra que corresponde a los lodos de lavado. Los lodos de lavado son un tipo de residuo que se produce en la industria siderúrgica al tratar las aguas de lavado de gases y polvo. Estos lodos se obtienen tras el tratamiento de las aguas de lavado almacenadas en un depósito. El proceso de obtención y tratamiento de los lodos de lavado se puede apreciar en el esquema mostrado en la Figura 4.2.5.

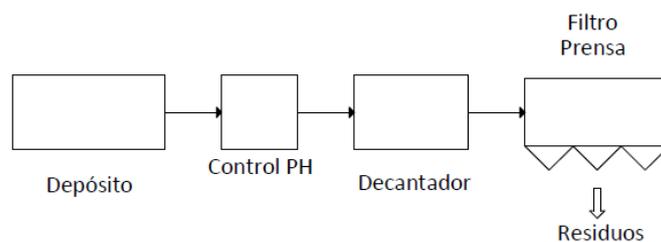


Figura 4.2.5: Tratamiento de las aguas de lavado y obtención de lodos

Estos lodos contienen una mezcla de metales, arcilla y otros materiales. El material recibido de LA FARGA YOURCOPPERSOLUTIONS, S.A. era de color oscuro con un alto contenido de humedad y un aroma fuerte. En la figura 4.2.6 se puede ver una imagen de los lodos de lavado.



Figura 4.2.6: Lodos de lavado FQ

4.3. Ensayos a realizar (marco normativo; objetivo)

En esta sección se pasarán a explicar brevemente los ensayos que se realizarán para estudiar las características mecánicas y eléctricas de las diferentes mezclas de hormigón. Se utilizará mayormente el marco normativo vigente en España por las normativas UNE. Sin embargo, se toma en cuenta que no existe normativa que regule los ensayos eléctricos con un fin diferente al de la durabilidad.

4.3.1. Determinación de la densidad aparente

La norma europea UNE EN 1015-6 establece el método para determinar la densidad aparente de morteros frescos. La densidad aparente se define como la masa del mortero por unidad de volumen, incluyendo los huecos de la masa. La norma se aplica a morteros de cemento, cal, yeso y mezclas de estos, así como a morteros con aditivos especiales. El método establecido en la norma se basa en la medición de la masa y el volumen de un molde lleno

de mortero fresco. Esta norma es importante porque la densidad aparente del mortero es un parámetro importante para determinar la calidad y el rendimiento del mortero en la aplicación práctica. Además, la norma UNE EN 1015-6 también establece los requisitos técnicos y de seguridad para la realización de las mediciones y la utilización de los equipos de prueba.

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.3.1)$$

Donde:

ρ_m es la densidad aparente del mortero fresco (kg/m^3).

m_2 es la masa del recipiente lleno de mortero (g).

m_1 es la masa del recipiente vacío (g)

V es el volumen de medida del recipiente (l).

4.3.2. Fluidez

Para la consistencia se conocen dos normas que describen el método ASTM C 230 y UNE EN 1015-3. El ensayo consiste en usar la mesa de flujo. El procedimiento implica llenar la mesa de sacudidas con una cantidad de hormigón fresco, compactarlo y nivelarlo, y luego levantar la mesa para permitir que el hormigón se extienda. La distancia que el hormigón se extiende horizontalmente se mide y se usa para determinar la mesa de flujo del hormigón. Este método de prueba se utiliza comúnmente para controlar la calidad del mortero.

$$F = \frac{(D_p - D_1) * 100}{D_1} \quad (4.3.2)$$

Donde:

F es la fluidez de la mezcla (%).

D_p es el diámetro promedio medido (mm).

D_1 es el diámetro inicial (mm)

4.3.3. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión

La norma UNE EN 1015-11:2020 describe un método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión y a la compresión del mortero endurecido.

El ensayo de resistencia a la flexión se realiza mediante la aplicación de una carga en el centro de la muestra, mientras que el ensayo de resistencia a la compresión se realiza mediante la aplicación de una carga en las caras laterales de la muestra. La norma también establece los criterios para la evaluación de los resultados y la elaboración de informes.

La resistencia a flexión f , en N/mm^2 se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f = 1,5 * \frac{F * l}{b * d^2} \quad (4.3.3)$$

F es la carga máxima aplicada a la probeta (N).

l es la distancia entre los bordillos de apoyo (mm)

b es el ancho de la probeta (mm).

d es la profundidad de la probeta (mm).

Por otro lado, la resistencia a compresión en la norma UNE EN 1015-11 se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta por la sección transversal de la placa de apoyo (normalmente 1600 mm^2).

También, la norma UNE-EN 12390-3 especifica el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión del hormigón endurecido. Este ensayo se utiliza para evaluar la calidad del hormigón en términos de su resistencia a la compresión, que es una medida importante de la capacidad del hormigón para soportar cargas estructurales.

La resistencia a compresión viene indicada por la fórmula:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.3.4)$$

Donde:

f_c es la resistencia a compresión (MPa).

F es la carga máxima de rotura (N).

A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la carga de compresión (mm^2).

En la tabla 4.3.1, se muestra el marco normativo para los ensayos, la cantidad y tipo de probetas por la amasada de hormigón y la edad en días al momento de ensayo.

Normativa	Probetas	N° por amasada	Edad
UNE-EN 1015-11	Prismáticas 160X40X40mm	3	7 y 28 días
UNE-EN 12390-3	Cúbicas 100X100X100mm	2	28 días
	Cilíndricas 100x200mm	3	28 días

Tabla 4.3.1: Normativa para resistencia a flexión y compresión

4.3.4. Propiedades eléctricas

Se realizará la prueba de caracterización eléctrica, con el fin de calcular la conductividad y resistividad derivadas de la adición de fibra de carbono y demás adiciones conductivas. Con la finalidad de cumplir el objetivo se utilizará la medición de impedancia en dos puntos. Esta técnica se utiliza a menudo en la caracterización de materiales conductores y semiconductores, y es una técnica comúnmente utilizada en la industria y en la investigación científica.

En este caso, se utilizará el analizador de impedancia digital MFIA de Zurich Instruments, que establece un nuevo estándar para las mediciones de impedancia con un barrido de frecuencia de 1Hz a 1MHz. El MFIA cuenta con una precisión básica del 0,05 % y tiene un rango de medición que va de 1 mΩ a 1 TΩ. Además, se caracteriza por una alta repetibilidad de medición y una baja desviación de temperatura.

La impedancia se calcula como la tensión de accionamiento dividida por la corriente medida. Este cálculo se aplica en el dispositivos de alta impedancia, donde se puede asumir que el voltaje en el dispositivo bajo prueba es igual al voltaje del controlador. En estos casos, el método de dos terminales es beneficioso, ya que elimina las capacitancias parásitas y las corrientes de fuga que podrían afectar la medición.

La técnica para medir la impedancia consiste en colocar dos electrodos en el material, uno en cada extremo de la muestra. A continuación, se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos, y se mide la caída de voltaje entre ellos. En la figura 4.3.1 se presenta el circuito de dos terminales usado para la medición.

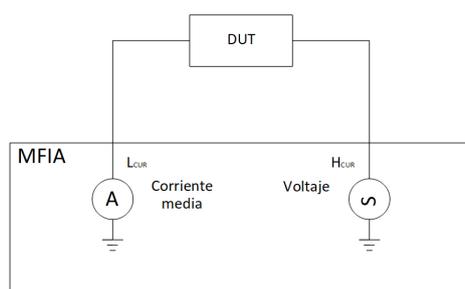


Figura 4.3.1: Circuito de dos terminales para medición de impedancia

En el pos-proceso de datos la resistividad del material se calcula mediante la ley de Ohm, que establece que la resistencia eléctrica es igual a la caída de voltaje dividida por la corriente eléctrica. Al conocer la distancia entre los dos electrodos, se puede calcular la resistividad del material utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho = R * A/L \quad (4.3.5)$$

Donde:

ρ es la resistividad (Ωm).

R es la resistencia eléctrica medida (Ω).

A es la sección transversal del material (m^2).

L es la distancia entre los dos electrodos (m).

Por lo tanto, una vez que se obtiene la resistividad, se puede calcular la conductividad (A/m), ya que es la inversa de la resistividad (ver ecuación 4.3.6).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.3.6)$$

Para las caracterizaciones correspondientes a conductividad eléctrica se fabricaron probetas prismáticas de dimensiones 40x40x160mm. Las probetas serán tratadas con pintura conductiva carbonosa en sus extremos para facilitar el contacto. En la figura 4.3.2 se muestra la configuración que se usa en condiciones controladas temperatura (alrededor de 20°C) y de humedad (54 %).

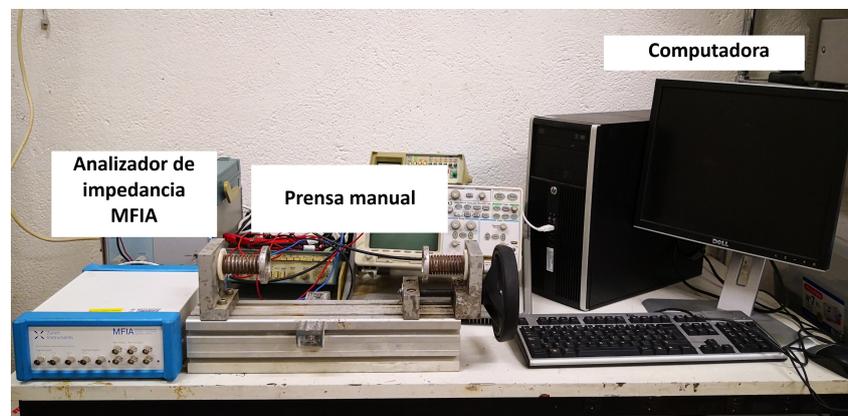


Figura 4.3.2: Configuración en laboratorio para medición de impedancia

4.4. Campaña experimental

La campaña experimental se desarrolla en su totalidad en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya. El objetivo de esta campaña ha sido, por un lado, realizar una caracterización del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido.

4.5. Composición del material compuesto a base de cemento

En la siguiente tabla (ver tabla 4.5.1), se presenta una adaptación de la composición de la matriz de naturaleza cementosa de Faneca, 2018; que incluye la dosificación de áridos, adiciones y aditivos utilizados en el proyecto. Es importante destacar que se optó por utilizar hormigón de ultra altas prestaciones para cumplir con los requerimientos específicos del proyecto [33].

Material	Cantidad
Cemento	787.3 kg
Agua	148 kg
Árido fino	1141.5 kg
Betoflow-D	196.8 kg
Master-ROC MS685	5 % en peso de cemento
Masterglenium ACE425	6.5 % en peso de cemento

Tabla 4.5.1: Dosificación de referencia para $1m^3$

El hormigón conductor se diferencia principalmente del hormigón convencional por su esqueleto granular y su mayor contenido de cemento, que puede ser más del doble que el de un hormigón convencional. Además, tiene una baja relación agua/cemento y ofrece diversas ventajas estructurales. Según Fehling en 2014, estas características permiten que el hormigón conductor tenga una mayor conductividad eléctrica y una resistencia mecánica superior a la del hormigón convencional, lo que lo hace especialmente adecuado para su uso en aplicaciones donde se requiere conductividad eléctrica, como en la construcción de estructuras de calefacción por suelo radiante o en la protección contra descargas atmosféricas [58].

4.6. Procedimiento de la campaña experimental

Antes de entrar en la preparación de las muestras de UHPC, debemos tener en cuenta que hay un punto crítico en la planificación de la prueba, que es el número de moldes disponibles o el número de pruebas que podría ser posible hacer en un día. Idealmente, todos los especímenes de hormigón la mezcla y el vaciado deben hacerse en el mismo día, para tener un mejor conocimiento de las mezclas proporciones y garantizar una mayor homogeneidad de la mezcla. Sin embargo, considerando que es más importante el tiempo correcto de curado que la homogeneidad de la mezcla, dividiremos nuestro casting en diferentes días para ajustarnos a la capacidad de prueba.

Saber cuántos moldes podemos tener y cuándo los tenemos disponibles es tan importante como conocer la disponibilidad del laboratorio para realizar las pruebas, y debe planificarse de antemano para ser coordinado con el tiempo de prueba.

Las propiedades de los materiales son un factor importante ya que determinan los resultados de la prueba. Como estaremos usando materiales recientemente experimentados para el concreto, adquiriremos más material que el exactamente calculado para prevenir futuros problemas que puedan ocurrir, y en caso de que todo vaya según el plan, podría usarse en el futuro para crear especímenes y usarlos como respaldo o para realizar diferentes pruebas, como la prueba de fatiga con ciclos de carga/descarga.

El objeto de este documento es estudiar UHPC conductores, por lo que necesitamos obtener los habituales materiales para preparar hormigón más adiciones conductivas. Las tablas siguientes muestran las combinaciones con los materiales que se plantea analizar.

Código	a/c	AF/c	BD/c	SP % en peso	Nanosílice % en peso	FC % en peso	FC % en vol.	PG % en peso	PG % en vol.
0,19UHPC—6,5SP	0,19	1,45	0,25	6,5	5				
0,19UHPC-0,65FC—7SP	0,19	1,45	0,25	7	5	0,65	0,28		
0,19UHPC-1PG-0,65FC-7,5SP	0,19	1,45	0,25	7,5	5	0,65	0,28	1	0,35
0,19UHPC-0,65FC-1,25PG-7SP	0,19	1,45	0,25	7	5	0,65	0,28	1,25	0,44
0,19UHPC-0,65FC-0,8PG-7SP	0,19	1,45	0,25	7	5	0,65	0,28	0,8	0,28
0,19UHPC-1PG—7SP	0,19	1,45	0,25	7	5			1	0,36

Tabla 4.6.1: Mezclas a analizar correspondientes a polvo de grafito (PG).

Código	a/c	AF/c	BD/c	SP % en peso	Nanosílice % en peso	FC % en peso	FC % en vol.	NH % en peso	NH % en vol.
0,19UHPC-0,65FC-0,375NH-7SP	0,19	1,45	0,25	7	5	0,65	0,28	0,38	2,49
0,19UHPC-0,65FC-0,205NH-7SP	0,19	1,45	0,25	7	5	0,65	0,28	0,21	1,38
0,19UHPC-0,5NH-0,65FC-7,5SP	0,19	1,45	0,25	7,5	5	0,65	0,27	0,5	3,28
0,2UHPC-0,5NH-0,65FC-7,5SP	0,2	1,45	0,25	7,5	5	0,65	0,28	0,5	3,28
0,2UHPC—0,5NH-7,5SP	0,2	1,45	0,25	7,5	5			0,5	4,14

Tabla 4.6.2: Mezclas a analizar correspondientes a negro de humo (NH).

Código	a/c	AF/c	BD/c	SP % en peso	Nanosílice % en peso	FC % en peso	FC % en vol.	CMG1 % en peso	CMG1 % en vol.
0,2UHPC-5,24CMG1-0,65FC-7,2SP	0,2	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	5,24	1,65
0,19UHPC-5,24CMG1—7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			5,24	1,65
0,19UHPC-4,35CMG1-0,65FC-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	4,35	1,37
0,19UHPC-4CMG1-0,65FC-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	4	1,26
0,19UHPC-5,45CMG1—7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			5,45	1,72
0,19UHPC-4,35CMG1—7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			4,35	1,38
0,19UHPC-3,48CMG1-0,65FC-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	3,48	1,1
0,19UHPC-1,109CMG1—7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			1,11	0,35

Tabla 4.6.3: Mezclas a analizar correspondientes al polvo de aspiración CMG-1.

Código	a/c	AF/c	BD/c	SP % en peso	Nanosílice % en peso	FC % en peso	FC % en vol.	CMG2 % en peso	CMG2 % en vol.
0,19UHPC-5,98CMG2-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			5,98	3,25
0,2UHPC-4,91CMG2-0,65FC-7,2SP	0,2	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	4,91	2,68
0,19UHPC-3,55CMG2-0,65FC-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	3,55	1,95
0,19UHPC-2,5CMG2-0,65FC-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	2,5	1,38
0,19UHPC-1,25CMG2-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			1,25	0,7
0,19UHPC-4,05CMG2-0,65FC-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5	0,65	0,28	4,5	2,22

Tabla 4.6.4: Mezclas a analizar correspondientes al polvo de aspiración CMG-2.

Código	a/c	AF/c	BD/c	SP % en peso	Nanosílice % en peso	FC % en peso	FC % en vol.	FQ % en peso	FQ % en vol.
0,19UHPC-1,5FQ-7,2SP	0,19	1,45	0,25	7,2	5			1,5	0,56
0,21UHPC-3,6FQ-7,2SP	0,21	1,45	0,25	7,2	5			3,6	1,34

Tabla 4.6.5: Mezclas a analizar correspondientes al lodo de lavado (FQ).

De acuerdo a pruebas iniciales donde se perdió la trabajabilidad de la mezcla que contenía cascarilla de acero se planteó manejar una relación agua cemento diferente a la original. También, la dosificación de la cascarilla se lo hace como reemplazo del árido fino en 37 % 56 % y 100 % en volumen de árido fino (ver tabla 4.6.6).

Código	a/c	AF/c	BD/c	SP % en peso	Nanosílice % en peso	FC % en peso	FC % en vol.	PF % en peso	PF % en vol.
0,38UHPC-178,53PF-7,4SP	0,38		0,25	7,4	5			178,53	43,55
0,24UHPC-44,61PF-0,65FC-7,2SP	0,24		0,25	7,2	5	0,65	0,5	44,61	16,13
0,24UHPC-74,7PF-7,2SP	0,24		0,25	7,2	5			74,7	24,45
0,24UHPC-44,61PF-7,2SP	0,24		0,25	7,2	5			44,61	16,2
0,23UHPC-44,61PF-7,2SP	0,23		0,25	7,2	5			44,61	16,2

Tabla 4.6.6: Mezclas a analizar correspondientes a la cascarilla de acero (PF).

Para la conformación de mezcla se agregarán los rellenos conductivos y demás ingredientes del concreto de la siguiente manera: Los materiales secos (es decir, cemento, adiciones conductivas carbonosas) se mezclaron primero durante 60 s a velocidad media. El árido fino (AF) se añadió a los ingredientes secos mezclados anteriormente y continuamos mezclando durante otros 60 s para asegurar una mezcla homogénea y una buena dispersión. Finalmente, se añadirá gradualmente agua de amasado junto con los aditivos y se mezclará el hormigón durante 120 s a una velocidad alta.

Al finalizar cada proceso de amasado se procederá a realizar el ensayo de consistencia. Se seguirán las especificaciones de la norma ASTM C 230 en donde se toman 4 mediciones de diámetro siguiendo lo establecido por la norma; colocando hormigón por 2 capas compactadas por 20 golpes con un pisón en un cono truncado. Después de enrasar la superficie, se eleva verticalmente el cono y se procede a realizar 25 giros en 15 segundos de la manivela de la mesa

de sacudidas que producirá que el hormigón, según su consistencia, se extienda o mantenga su forma.

A los 7 días de curado se procederá a realizar los ensayos mecánicos correspondientes a flexión y compresión. Estos ensayos se realizarán en la máquina Ibertest Autotest SW localizada en el laboratorio de tecnología de estructuras Lluís Agulló de la UPC. Se seguirán los lineamientos de la norma UNE-EN 1015–11.

Para el ensayo de flexión, la probeta tendrá que estar colocada en una posición simétrica con respecto al eje de la carga puntual, la condición de apoyo es simplemente apoyada en 2 puntos, la carga puntual desciende a una velocidad de 0.05 KN/s hasta la rotura.

Para el ensayo de compresión, la mitad resultante del ensayo de flexión se colocará en la posición adecuada según como la máquina lo disponga, en este caso, con la cara fragmentada hacia el frente. La carga que desciende a una velocidad de 0.5 MPa/s hasta la rotura se distribuye en un área de $4X4cm^2$.

En cuanto a los ensayos eléctricos se prepararán las probetas en condiciones controladas una vez salidas del curado a los 7 días. La pintura se aplicará en cuanto la superficie de los extremos se encuentre lo suficientemente seca para realizar la acción de pintado. Una vez aplicada la pintura carbonosa en los extremos la muestra quedará en reposo para facilitar el secado en la cámara seca donde se mantendrá temperaturas alrededor del 20°C y un humedad del 54 %. Todo el proceso de pintado, secado y medición no sobrepasara las 24 horas.

En la caracterización eléctrica en corriente alterna se usó el equipo MFIA. Con ayuda del un software se registrar medidas de impedancia bajo diferentes frecuencias, es decir, un barrido de frecuencia que nos permitirá obtener gráficas de impedancia contra frecuencia. Las mediciones se harán a dos hilos con un voltaje efectivo de 1 V. La pieza estará sujeta mediante una prensa manual de tal manera que se garantice el mejor contacto posible.

Finalmente, se pasará a realizar un pos-proceso de los datos obtenidos consiguiendo gráficas que representen el trabajo realizando en la campaña experimental. Las gráficas servirán para apoyar las conclusiones finales.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1. Introducción

En esta sección se presentan los datos y resultados obtenidos a través de la investigación y se interpretan en función de los objetivos de la tesis. Los resultados obtenidos son la respuesta a las preguntas de investigación planteadas y es a través del análisis riguroso de estos datos que se pueden sacar conclusiones significativas.

Este capítulo consta de tres secciones la primera mostrara los resultados del hormigón en su estado fresco incluyendo observaciones del proceso de fabricación. La segunda sección incluye las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. Finalmente, la tercera parte se concentrará en la respuesta eléctrica del hormigón.

5.2. Propiedades del mortero fresco

Iniciamos estableciendo que los ensayos y fabricación en estado fresco se realizan con la intención de cumplir lo descrito en los capítulos anteriores. Sin embargo, debido a la novedosa utilización de residuos industriales el comportamiento en estado fresco estaba rodeado de incertidumbre.

La literatura establece que, al incrementar el porcentaje de finos en un mortero, se produce un aumento en la cantidad de partículas más pequeñas en la mezcla, lo que puede afectar su comportamiento. Por un lado, un aumento en la cantidad de finos puede mejorar la capacidad de relleno de la mezcla, lo que resulta en una mayor trabajabilidad. Por otro lado, también puede afectar la relación agua/cemento de la mezcla, lo que puede influir en la resistencia y durabilidad del mortero.

Además, un exceso de finos puede provocar una disminución en la permeabilidad del mortero y una mayor dificultad para la eliminación de burbujas de aire, lo que puede generar problemas de adherencia y fraguado.

Conociendo los posibles comportamientos alrededor de las adiciones conductoras se siguió el protocolo predefinido sin problema aparente. Hay que recalcar que, la gran parte de los ensayos en literatura existente contenían relaciones agua / cemento mayores a la utilizada en esta propuesta. Por lo tanto, el haber incluido un porcentaje alto de aditivo superplastificante fue acertado para mejorar la trabajabilidad.

Mientras mayor era el contenido de adiciones dentro de la mezcla mayor era la necesidad de aumentar superplastificante. En algunos casos se incrementó la relación agua/cemento original con la finalidad de establecer un límite de control. Este hecho se vio mayormente reflejado en los compuestos con área específica alta como el negro de humo, polvos de aspiración y cascarilla de acero.

En este contexto, la fluidez de la mezcla se ve afectada difiriendo de los resultados iniciales producidos por la dosificación de referencia. Por lo tanto, con la finalidad de reflejar este hecho se genera la figura 5.2.1 de fluidez.

Si se conoce que un concreto más fluido tendrá un mayor contenido de agua y una menor consistencia, este aparecerá en la parte superior derecha del gráfico. Un concreto más duro tendrá un contenido de agua más bajo y una mayor consistencia, y aparecerá en la parte inferior izquierda del gráfico.

También se sabe que un concreto más fluido es más fácil de colocar y compactar, pero puede tener una resistencia a la compresión más baja y una mayor posibilidad de segregación. Un concreto más duro es más resistente, pero puede ser más difícil de colocar y compactar.

Aparte del comportamiento en la fluidez de la mezcla se tuvo que efectuar cambios en el proceso de mezclado referentes al tiempo en la etapa de colocación de líquidos. Esto debido a los componentes provenientes de residuos industriales.

Al incorporar las adiciones provenientes de la industria de cobre (CMG-1, CMG-2 y FQ) en la mezcla de hormigón, se necesitó un aumento en el tiempo de mezclado de aproximadamente 6 minutos, desde la colocación de los líquidos.

De manera similar, al reemplazar el árido fino por la cascarilla de acero (PF) en diferentes porcentajes, también se registró el incremento en el tiempo de mezclado de los líquidos

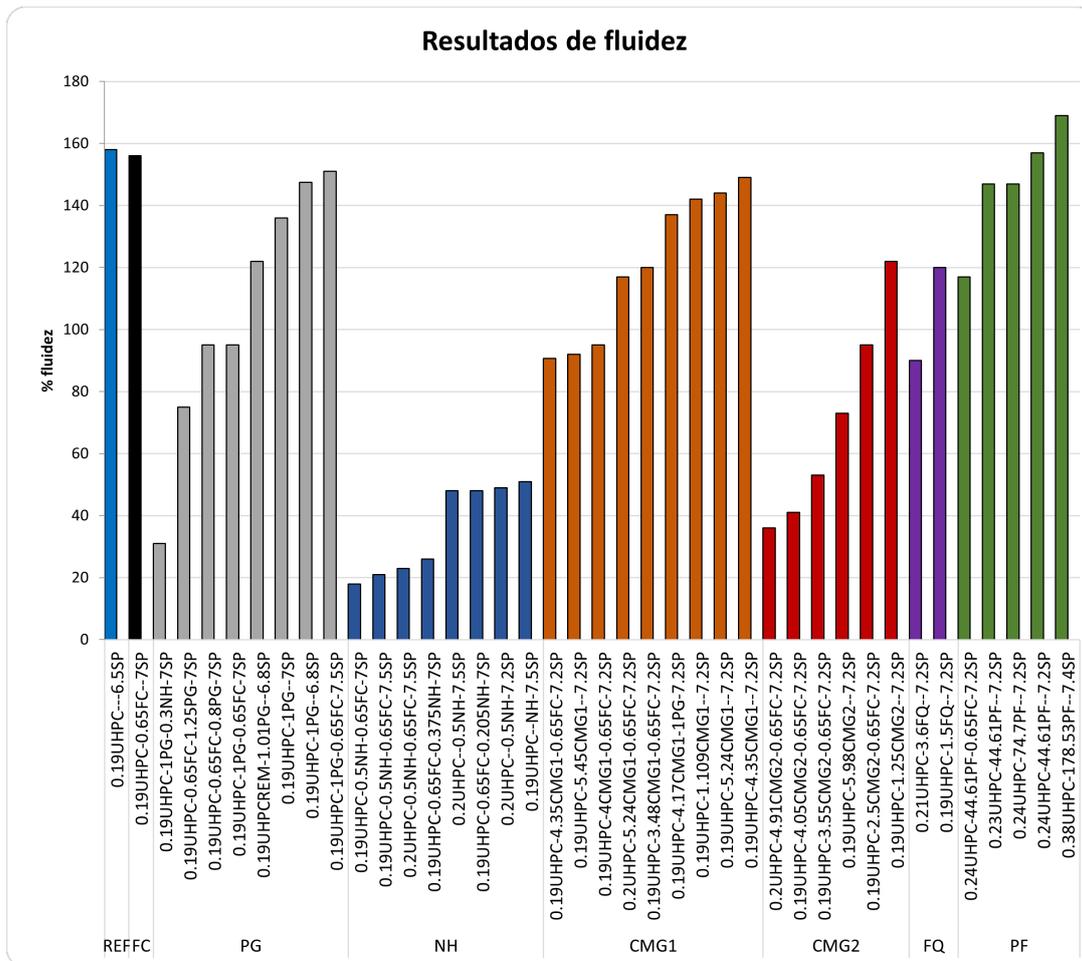


Figura 5.2.1: Porcentaje de fluidez de las mezclas.

con un valor de 6 minutos. Además se menciona que, para poder realizar una mezcla trabajable el hecho de haber alterado significativamente la relación agua/cemento a un valor de 0,24 fue acertado para proveer resultados.

Debido a las limitaciones de tiempo para la elaboración de este trabajo frente a un hecho no considerado dentro de la planificación como el cambio abrupto de la relación de agua/cemento no se realizó un hormigón de referencia propio que se pueda comparar con los compuestos de cascarilla de acero. Por lo tanto, se deja establecido que los resultados en adelante mostrados no se compararán entre si y son meramente informativos.

En general, un concreto fluido con adiciones conductoras es más fácil de colocar y compactar, pero puede tener una resistencia a la compresión más baja y una mayor posibilidad de segregación. Un concreto más duro es más resistente, pero puede ser más difícil de colocar y compactar.

Por lo tanto, al interpretar un gráfico de fluidez de concreto puede ayudar a los dise-

ñadores y constructores a seleccionar la mezcla de concreto adecuada para una determinada aplicación, optimizando la relación entre la facilidad de colocación, la resistencia y otras propiedades importantes del concreto.

5.3. Propiedades del mortero endurecido

Un hormigón se endurece gracias al proceso de fraguado. El proceso se produce por una serie de reacciones químicas entre el agua y los componentes del mortero, principalmente el cemento.

El proceso de fraguado comienza cuando se mezcla el agua con el cemento y los agregados del mortero. En ese momento, el agua comienza a hidratar al cemento, lo que produce una serie de reacciones químicas que liberan calor y forman compuestos cristalinos. Estos compuestos cristalinos se adhieren a los agregados del mortero, creando una estructura sólida.

A medida que el proceso de fraguado avanza, el mortero comienza a perder su plasticidad y a volverse cada vez más rígido. Una vez que se ha producido suficiente reacción química, el mortero alcanza su resistencia final y se vuelve completamente sólido.

En este ámbito, el trabajo carece de análisis de micro-estructura para corroborar el comportamiento general a ese nivel por lo que nos limitamos al ojo del observador para brindar una perspectiva del comportamiento de las mezclas.

Una vez realizada las mezclas y colocadas las muestras se esperaba un desmolde a las 24 horas en todas las muestras. No obstante, el tiempo de desmolde no fue el mismo para las muestras en las que se incorporaban polvos de aspiración de la industria de cobre.

En las mezclas realizadas con polvos de aspiración (CMG-2) y lodos de lavado (FQ) el endurecimiento de las muestras se produjo al superar las 48 horas. El motivo del comportamiento se desconoce con precisión por lo que se deja planteada la hipótesis de una reacción química no común que debe ser investigada más a profundidad en un proyecto posterior.

Ahora, la literatura muestra que la adición de materiales carbonosos al hormigón, como grafito y negro de humo, puede mejorar su conductividad eléctrica. Sin embargo, también puede afectar negativamente la resistencia mecánica del hormigón. Esto se debe a que los materiales carbonosos no tienen la misma capacidad de unión que los agregados tradicionales, lo que puede debilitar la estructura del hormigón.

También, el uso de adiciones provenientes de residuos industriales siderúrgicos puede tener un impacto en las resistencias mecánicas del hormigón. Esto se debe a que las adiciones pueden tener diferentes composiciones y características físicas que pueden afectar la hidratación del cemento y la estructura del material.

Con el fin de corroborar la disminución de las resistencias mecánicas, las muestras endurecidas se colocaron en la cámara húmeda durante 7 días y una vez cumplido este periodo se pasarán a realizar los ensayos de rotura (ver figura 5.3.1).



Figura 5.3.1: Fotografía de los ensayos de flexión y compresión.

En las figuras 5.3.2 y 5.3.3 se muestran los resultados de flexión y compresión correspondientes a los 7 días.

En cuanto a las fibras de carbono, el porcentaje que se agrega a la mezcla debe ser aquel que proporcione el mejor comportamiento eléctrico, ya que la resistencia mecánica será proporcionada por la matriz cementosa de referencia. La adición de fibras de carbono en el hormigón tiene como resultado una mejora en la resistencia a la compresión debido a su capacidad de restringir el crecimiento de microfisuras [36].

Las muestras que contienen polvo de grafito en sus edades tempranas no muestran una diferencia sustancial en la resistencia a compresión incluso llegan a superar los resultados del de referencia. No obstante, este no es el caso en los resultados de flexión ya que sus valores están por debajo de 16 MPa.

En contraste con todos los resultados los compuestos con negro de humo (NH) muestran una diferencia más significativa. Los valores de flexión se encuentran con su valor máximo en 14,3 MPa y 77,8 MPa correspondientes a los valores de flexión y compresión respectivamente.

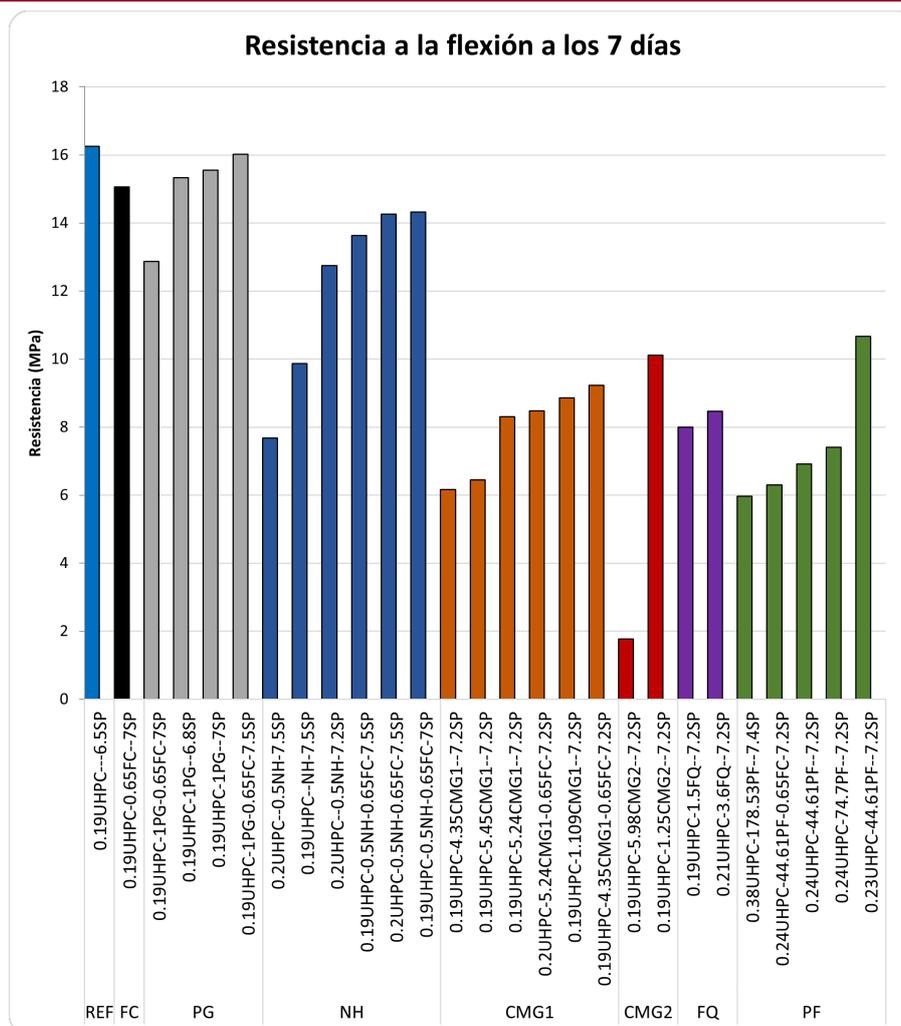


Figura 5.3.2: Resistencia a la flexión a los 7 días.

De manera muy interesante los valores mecánicos de los polvos de aspiración difieren de manera significativa entre si a pesar de ser partículas finas. La diferencia posiblemente radica en su respectiva composición.

Los valores obtenidos con los polvos de aspiración tipo CMG-1 resultaron atractivos por el incremento de la resistencia a compresión de 79,5 MPa del hormigón de referencia a 96,7 MPa en su mejor combinación. En contraste, la resistencia a flexión se redujo en un alto rango cayendo un 56,7 % con un valor de 9,2 MPa en su mejor combinación para resistencia a flexión.

Dentro de los polvos de aspiración también tenemos el tipo CMG-2 que produjo los peores valores de resistencias tanto en flexión como en compresión. Mientras mayor era la cantidad de adición colocada mayor era reducción de resistencia mecánica.

En cuanto a los lodos de lavado (FQ) aunque tenían el fraguado más lento al igual que

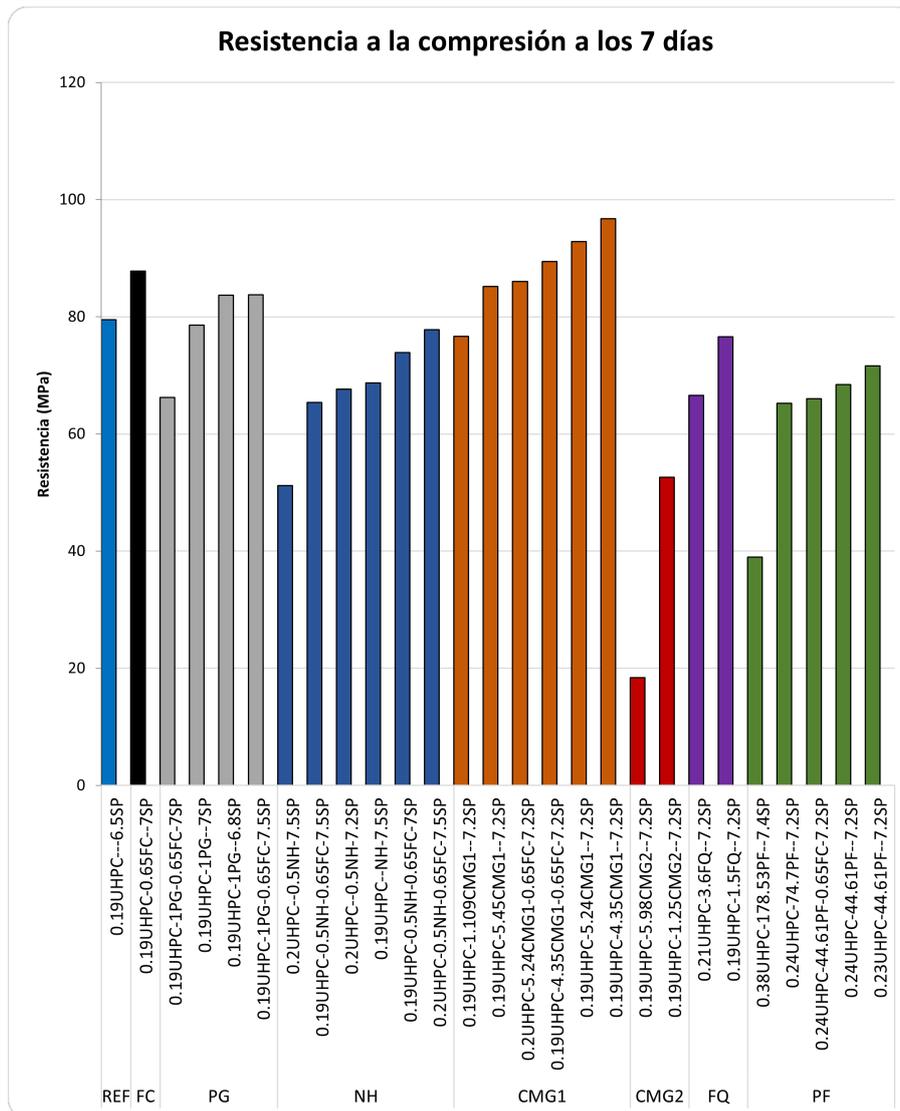


Figura 5.3.3: Resistencia a la compresión a los 7 días.

el polvo CMG-2 las resistencias si fueron afectadas pero en menor medida que lo sucedido con el polvo ya que FQ alcanza una resistencia de 52,6 MPa en compresión y 10,11 MPa en flexión.

La cascarilla de acero (PF), utilizada como sustituto de la arena de sílice, tiene un impacto directo en la estructura granular del material y puede afectar sus propiedades físicas y mecánicas. En este estudio se incorporó la cascarilla de acero en diferentes porcentajes y se encontró que, aunque la relación agua/cemento aumentó, las resistencias mecánicas resultaron atractivas en primera instancia. Los valores alcanzados para la resistencia a la compresión y a la flexión fueron de 71,6 MPa y 10,7 MPa, respectivamente. Estos resultados sugieren que la cascarilla de acero puede ser una alternativa viable para sustituir la arena de sílice en la producción de hormigón.

Finalmente, las muestras que contienen negro de humo muestran una diferencia sig-

nificativa en la resistencia a la flexión, mientras que las muestras que contienen grafito no presentan una diferencia sustancial en la resistencia a la compresión, aunque sus resultados de flexión están por debajo de los valores de referencia. Por consiguiente, es posible que una combinación de adiciones genere resultados óptimos en términos de compresión, pero no necesariamente garantice la máxima resistencia a la flexión. Cabe destacar que este enunciado también es válido en sentido inverso.

5.4. Resistividad

La resistividad de los hormigones conductores con adiciones conductoras es mucho menor que la de los hormigones convencionales. La razón de esto es que las adiciones conductoras tienen propiedades conductoras que permiten que la electricidad fluya a través del hormigón.

Ahora con la finalidad de obtener los datos de resistividad se usa la configuración de medición de impedancia explicada en el capítulo anterior. Podemos observar en la figura 5.4.1 una fotografía del ensayo en marcha.



Figura 5.4.1: Fotografía de la medición de impedancia.

Una de las mayores virtudes del MFIA se encuentra en los datos de exportación, puesto que muestra tanto la parte real como imaginaria de la impedancia correspondiente a la pieza ensayada. Por lo tanto, se toma la parte real dada por el medidor y se obtiene los valores de la resistencia para cada una de las piezas prismáticas correspondiente a cada mezcla aplicando la ecuación 4.3.5.

Además, los resultados mostrados en este apartado corresponden a las frecuencias de 50 Hz, 100 Hz, 1kHz y 1MHz. El dato más interesante es el correspondiente a la frecuencia de

50 Hz ya que este último es la misma frecuencia usada en la red española.

5.4.1. Resistividad en las adiciones carbonosas

Los resultados de la resistencia eléctrica con adiciones carbonosas se muestran en la figura 5.4.2 donde se observa valores medidos a los 28 días a las diferentes frecuencias.

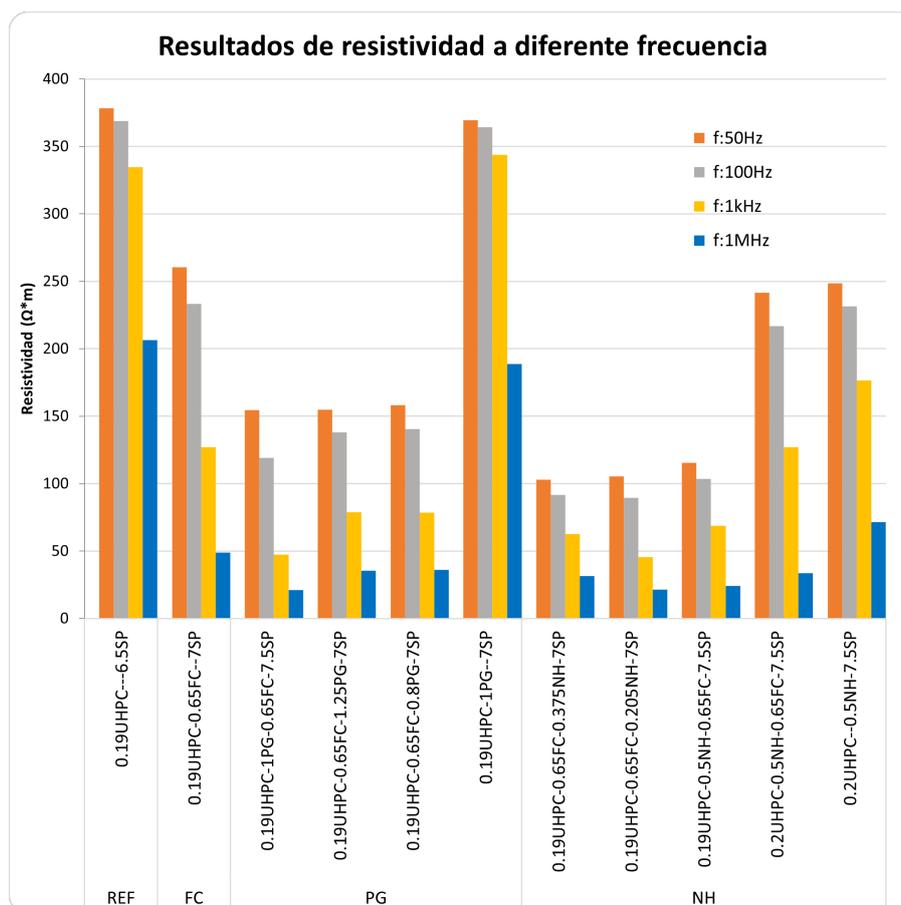


Figura 5.4.2: Resistividad de adiciones carbonosas.

Lo observable en la figura 5.4.2 concuerda con la documentación bibliográfica. La resistividad responde a que las mayores concentraciones de compuestos carbonosos añadidos a la mezcla de hormigón reducen la resistividad de las muestras.

En este sentido, se observa que las muestras bifásicas presentan una menor resistividad, especialmente aquellas que contienen negro de humo (NH) y fibra de carbono (FC). Es importante destacar que la muestra más eficiente en términos de conductividad eléctrica se obtuvo a partir de la combinación de NH y FC, con una resistividad de 102,9 $\Omega \cdot m$. En comparación, la muestra más conductiva, producida a partir de la combinación de polvo de grafito (PG)

y fibra de carbono (FC), alcanzó una resistividad de 154,6 Ω m.

Al comparar las combinaciones de negro de humo y fibra de carbono con las combinaciones de polvo de grafito y fibra de carbono, se observa que estas últimas producen una mayor resistividad. Teniendo en cuenta que el porcentaje de fibra de carbono (0,28 % en volumen) se mantuvo constante para todos los ensayos. Entonces, la diferencia en resistividad se debe al segundo componente.

En conclusión, los resultados muestran que el uso del negro de humo como adición conductora es altamente efectivo, ya sea en mezclas monofásicas o bifásicas en combinación con la fibra de carbono. Los valores obtenidos indican que el negro de humo mejora significativamente la conductividad eléctrica del hormigón, lo que lo convierte en una adición superior en comparación con el polvo de grafito.

5.4.2. Resistividad de subproductos industriales

El ensayo de resistividad en las muestras de hormigón que contienen los polvos de aspiración y lodos de lavado se efectúa a la edad de 7 días de curado.

En la figura 5.4.3 se presentan las combinaciones de la matriz cementosa a las que se les adicionaron los polvos de aspiración y lodos de lavado para medir su resistividad.

Se puede concluir a partir de la figura 5.4.3 que la combinación que produce la resistividad más baja es la mezcla monofásica que contiene el polvo de aspiración CMG-2, con un valor de 4,5 Ω m. Sin embargo, al agregar fibra de carbono a esta mezcla, la conductividad no mejora, sino que empeora, aumentando los valores de resistividad.

Se plantea la hipótesis de que el polvo de aspiración CMG-2 sea más conductivo que la fibra de carbono y que en la muestra monofásica se haya logrado una efectiva percolación debido al contacto entre las partículas. Se cree que cuando se añadió la fibra de carbono a la mezcla, este contacto se vio interrumpido, lo que ocasionó un aumento en los valores de resistividad. Esta idea se fundamenta en que, en un circuito simple con resistencias en serie, la resistencia total se obtiene sumando las resistencias parciales.

Se ha encontrado que la combinación más efectiva es una mezcla bifásica que incluye el polvo de aspiración CMG-1 y fibra de carbono, lo que produce un valor de 22,7 Ω m. Además, se ha observado que las combinaciones que contienen CMG-1 son superiores a las que utilizan lodos de lavado FQ, ya que estas últimas alcanzan un valor mínimo de 71 Ω m.

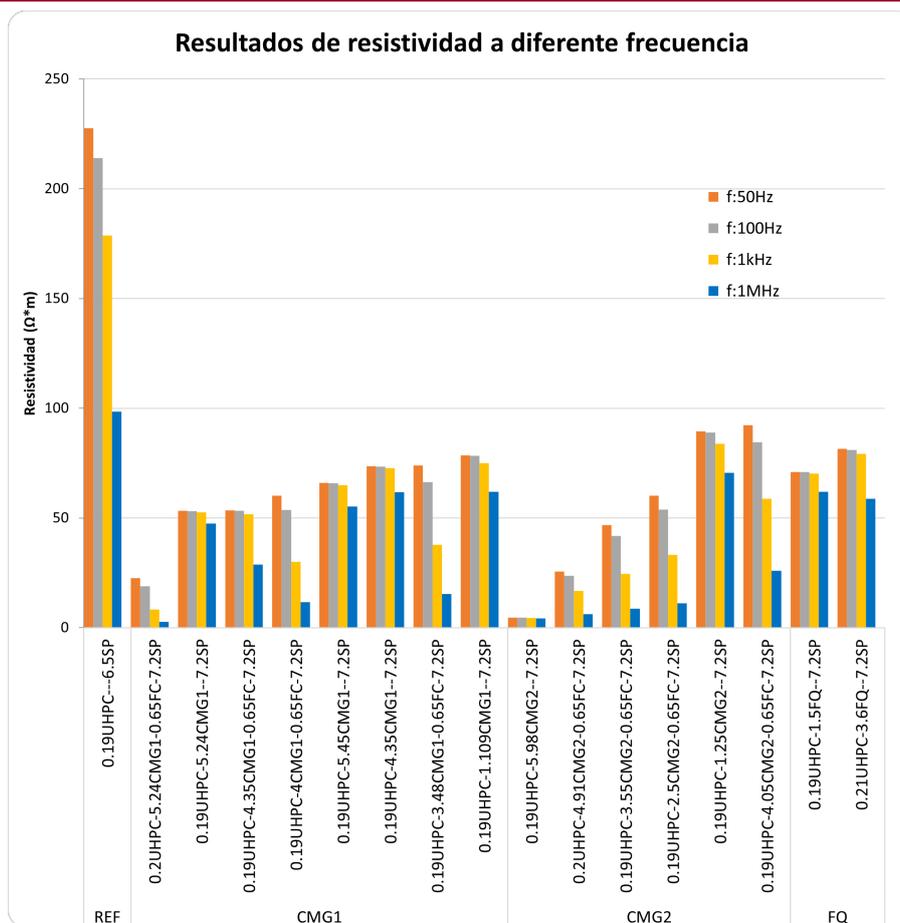


Figura 5.4.3: Resistividad en polvos de aspiración y lodos de lavado.

Ahora es importante destacar que la cascarilla de acero utilizada en el estudio tiene un carácter diferente al de los otros materiales, ya que su función principal fue reemplazar a la arena de sílice utilizada en la fabricación del hormigón. Es posible que la incorporación de estas partículas haya modificado la distribución de tamaños de las partículas en el hormigón, lo que puede influir en su conductividad eléctrica.

Podemos analizar la figura 5.4.4 de resistividad en piezas a los 7 días para obtener información valiosa sobre el efecto del reemplazo de la arena de sílice por cascarilla de acero en la conductividad del hormigón.

Al realizar un reemplazo completo de la arena de sílice por cascarilla de acero se logró mejorar significativamente la conductividad del hormigón, obteniendo un valor de resistividad de 26,3 Ω m. Sin embargo, al reemplazar solo un 25 % de la arena de sílice, la resistividad aumentó a 68 Ω m. Es importante destacar que al combinar la mezcla con la adición de fibras de carbono recicladas, se logró una mejora del 36,6 %, alcanzando una resistividad de 43,2 Ω m.

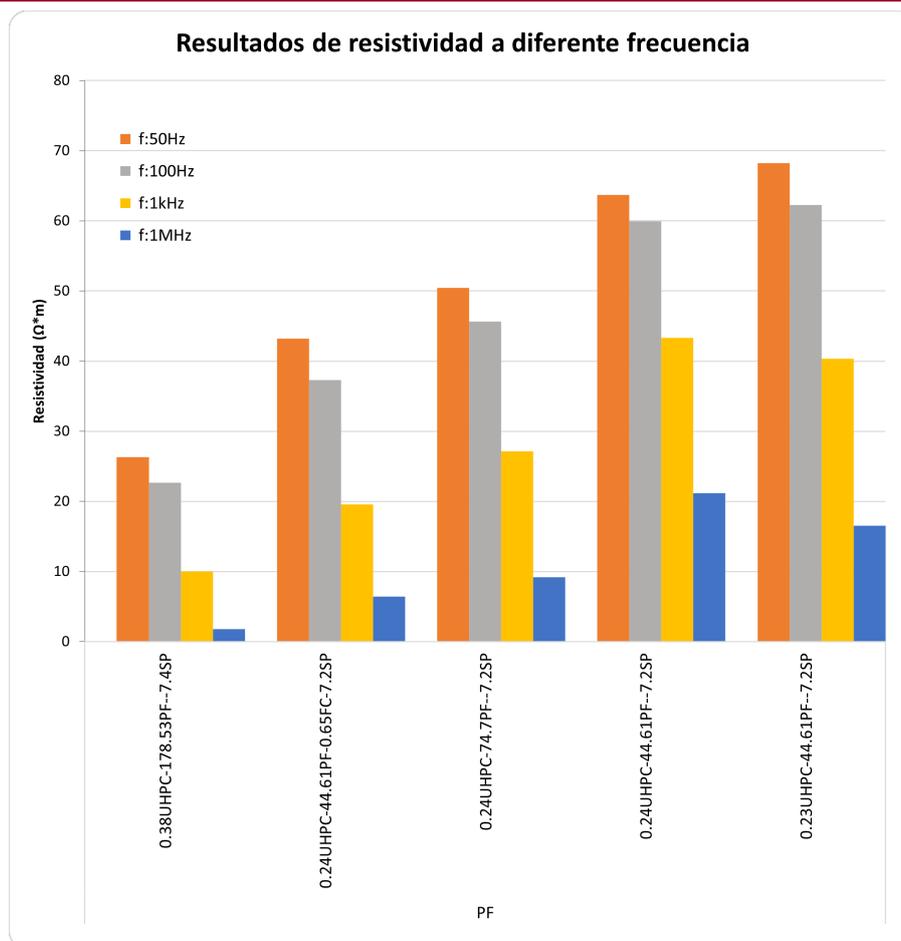


Figura 5.4.4: Resistividad partículas férreas.

Estos resultados sugieren que el uso de cascarilla de acero y fibras de carbono puede ser beneficioso para mejorar la conductividad del hormigón y, por lo tanto, sus propiedades eléctricas.

Los estudios han evaluado la resistividad eléctrica del hormigón con materiales provenientes de residuos industriales, y se ha encontrado que la adición de polvos de aspiración CMG-1 y la sustitución del árido fino por cascarilla de acero puede disminuir la resistividad eléctrica del hormigón. En general, la adición de materiales conductores puede mejorar significativamente la conductividad eléctrica del hormigón.

5.5. Propuesta de diseño

En el diseño del hormigón conductor se deben tomar en cuenta diversos factores que afectan la funcionalidad y durabilidad del material. Estos incluyen la aplicación final del hormigón, la selección de materiales conductores adecuados, la proporción de estos materiales en la mezcla, la resistividad y la relación agua-cemento. También se deben considerar factores

como la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón conductor, ya que estos materiales a menudo se utilizan en aplicaciones estructurales.

A continuación, se presenta una propuesta de procedimiento de diseño de hormigón conductor, basado en las recomendaciones de la bibliografía y el resultado de la campaña experimental:

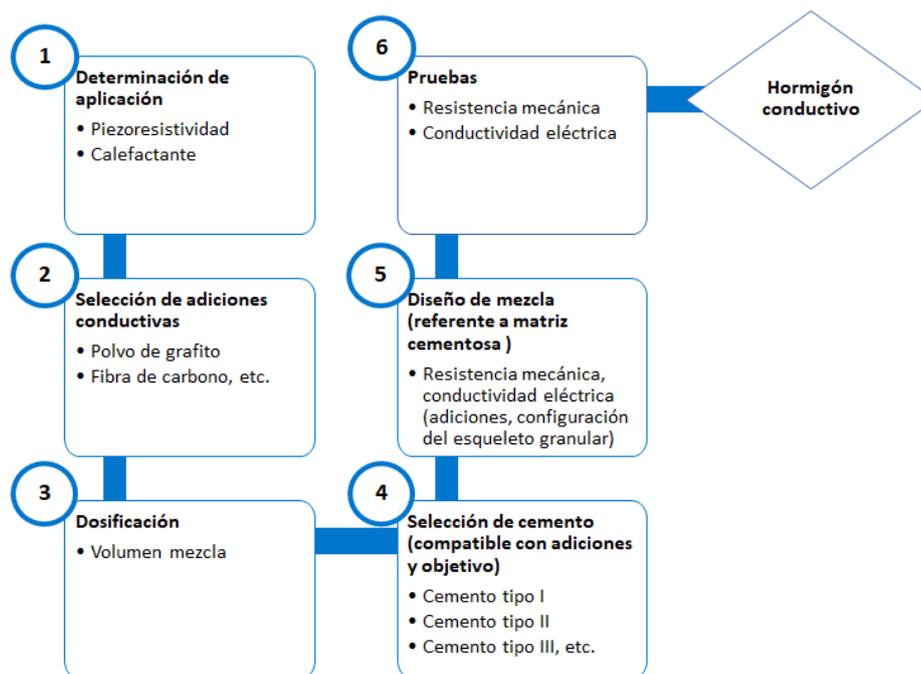


Figura 5.5.1: Diagrama de la propuesta de diseño.

1. Definir la aplicación: se debe determinar la aplicación específica para la que se va a utilizar el hormigón conductor. Esto ayudará a determinar la conductividad eléctrica necesaria y las propiedades mecánicas requeridas.

Por ejemplo, el valor de resistividad del hormigón para ser calefactante depende de diversos factores, como la dosificación de los materiales conductivos, el espesor del hormigón y la geometría de la estructura. A pesar de esto, en general, se considera que un hormigón puede tener una función calefactante cuando su resistividad eléctrica es alrededor de 10-50 Ω m. Por otro lado, un hormigón con una aplicación piezoresistiva puede tener una resistividad alrededor de los 100 Ω m para obtener un factor de galga adecuado.

No solo la resistividad que produce una aplicación u otra se considera en este punto, sino también las condiciones a las que estará sometida la pieza. Hay que recordar que la geometría, las condiciones ambientales, los costes y la energía disponible son puntos

que tratar en este paso.

2. Selección de adiciones conductoras: se deben seleccionar adiciones conductoras de carbono, como negro de humo, fibras de carbono, grafito, nano tubos de carbono, etc. en función de la aplicación y la conductividad requerida.

Además, si se piensa en incluir áridos que tengan cierto nivel de conductividad esto también afectará los resultados finales. En caso de una combinación mediante la agregación de una adición conductiva más como la fibra de carbono o polvo de grafito los resultados conductivos mejoraran sin necesidad de llegar a grandes concentraciones.

Para ambos planteamientos se debe tener en cuenta que estas incorporaciones conductoras también afectarán a las propiedades mecánicas del hormigón, por lo que se deben seleccionar cuidadosamente.

3. Dosificación: una vez que se han seleccionado las adiciones conductoras, se debe determinar la dosificación adecuada para lograr la conductividad eléctrica y las propiedades mecánicas requeridas.

Se ha mencionado reiteradamente las afecciones a las propiedades mecánicas del hormigón, como la resistencia a la compresión y la durabilidad por las concentraciones altas. Por lo tanto, se deben realizar pruebas y ensayos de laboratorio para determinar la dosificación óptima que permita cumplir con las propiedades eléctricas y mecánicas requeridas.

Para agilizar este proceso podemos tomar en cuenta que la investigación bibliográfica muestra valores de concentración de fibra de carbono (0,2-0,8 % en volumen) los cuales son suficientes para obtener un hormigón conductor (ver figura 5.5.2).

En combinaciones bifásicas tanto con lo expresado en la literatura como en los resultados mostrados no se recomienda sobrepasar el 2.5 % en volumen. La razón radica en la pérdida de trabajabilidad de la mezcla y los problemas que esto produce en las diferentes etapas del hormigón, en este caso para el UHPC.

Para continuar el análisis en la figura 5.5.2 se presenta los valores obtenidos de diferentes artículos [35, 56]. Mostrando que los valores de concentración más altos producen la mayor resistividad pero no están exentos de los problemas naturales de concentraciones dentro rangos altos.

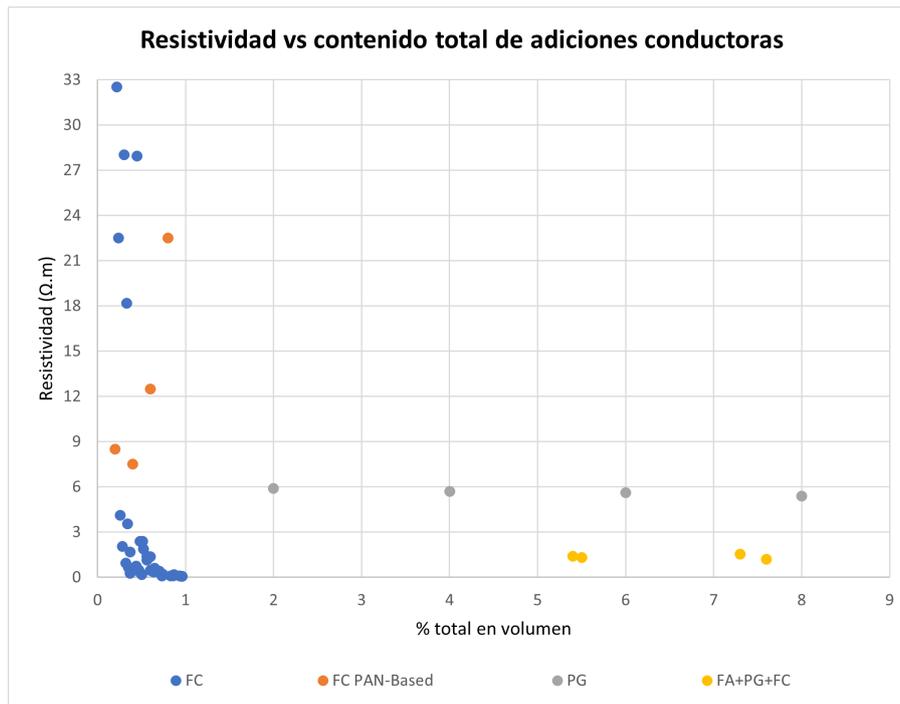


Figura 5.5.2: Resistividad vs % en volumen de adiciones conductoras.

Como resultado de la campaña experimental obtenemos figuras que concuerdan con las ideas de Baeza et al., 2010 y Wu et al., 2014 ya que independientemente del tipo de adición se muestra cierto nivel de correlación, ya que a mayor volumen de adiciones conductoras dentro de la mezcla menor resistividad se obtendrá, al mismo tiempo la resistividad de los compuestos incrementa con respecto a la edad de la muestra (ver figuras 5.5.3 y 5.5.4).

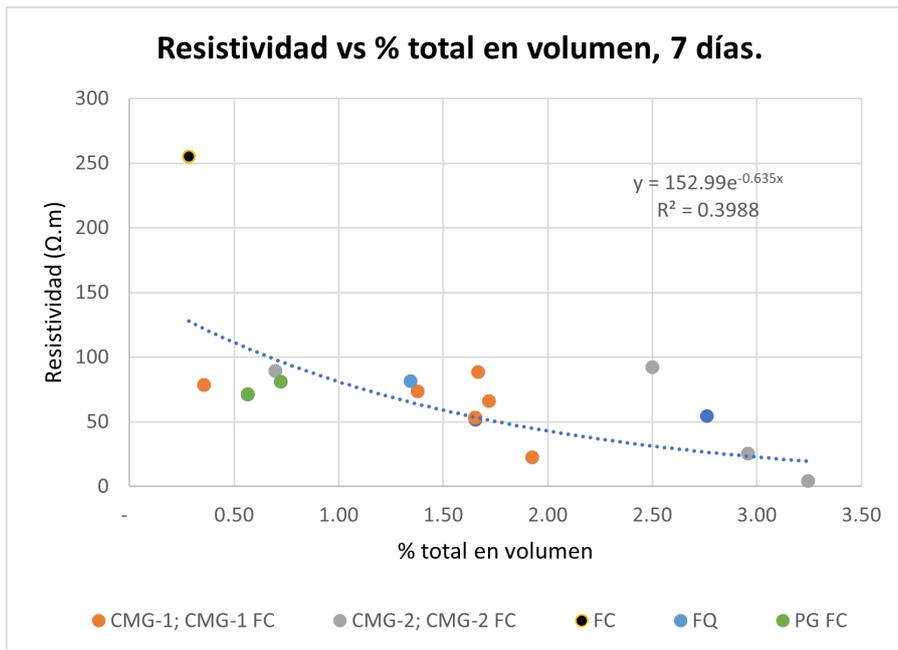


Figura 5.5.3: Resistividad vs % en volumen de adiciones en usadas en este trabajo a 7 días.

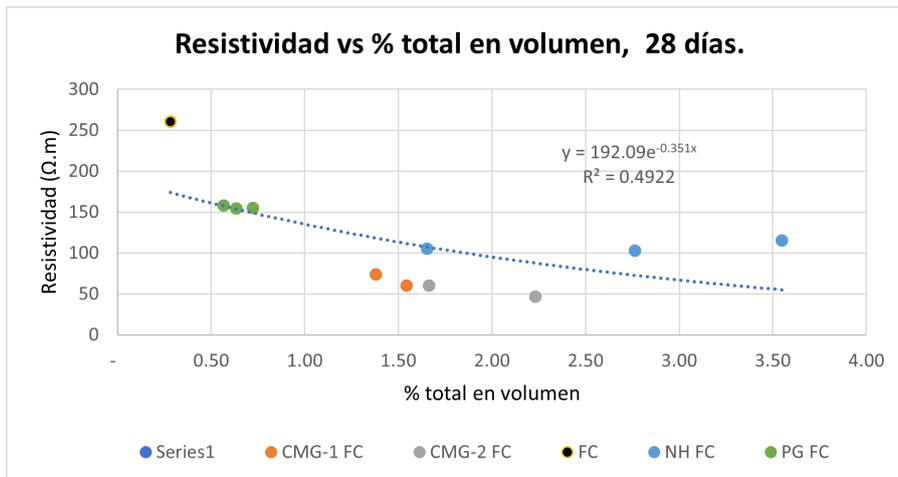


Figura 5.5.4: Resistividad vs % en volumen de adiciones en usadas en este trabajo a 28 días.

En cuanto a la configuración de la estructura granular que se da al reemplazar la arena con la cascarilla de acero se muestra una línea de tendencia en la relación de árido fino (arena de sílice) a cascarilla de acero (ver figura 5.5.5). La línea de tendencia incluye el punto correspondiente a la mezcla que contiene fibra de carbono. Si a esto se le añade que, el volumen ocupado por la fibra de carbono es del 0.28%. Concluimos una posible ventaja al usar mezclas bifásicas en esta forma, considerando la conductividad.

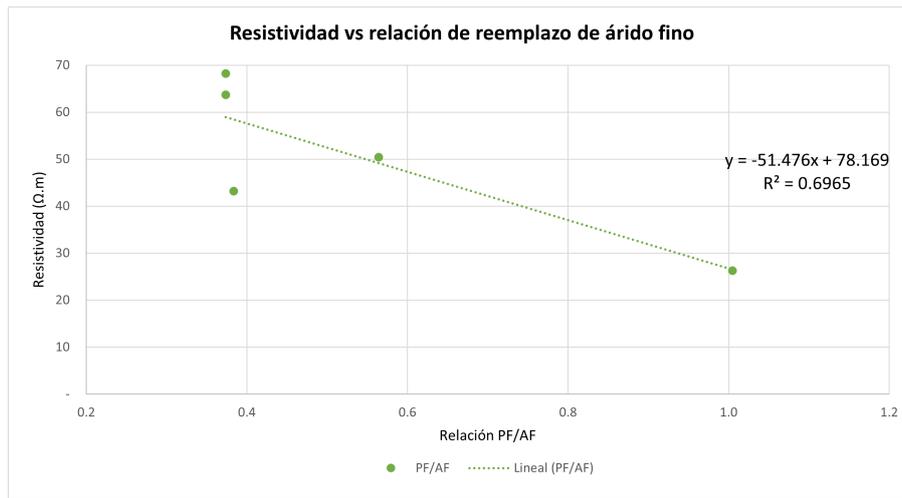


Figura 5.5.5: Resistividad vs Relación de árido fino a Cascarilla de acero.

Si a este análisis le sumamos lo descrito en los puntos anteriores podemos establecer el siguiente diagrama de flujo que para cumplir con un criterio de resistencia eléctrica.

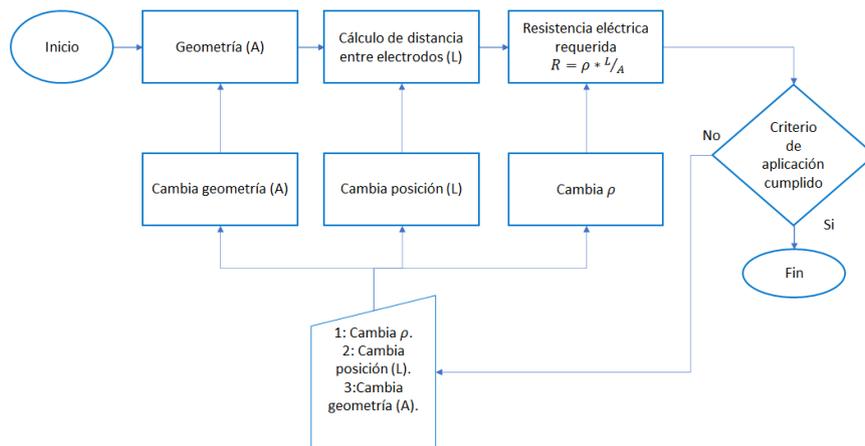


Figura 5.5.6: Diagrama del flujo del criterio de aplicación.

4. Selección de cemento: se debe seleccionar un tipo de cemento adecuado para la aplicación específica y que sea compatible con las adiciones conductoras. El tipo de cemento utilizado en el hormigón puede afectar significativamente su resistencia, siendo el cemento Portland ordinario el más comúnmente utilizado. Sin embargo, existen otros tipos de cemento como el de alta resistencia, ultra alta resistencia y bajo calor de hidratación, que pueden tener resistencias mucho mayores y ser más adecuados para aplicaciones específicas. A pesar de esto, la inclusión de partículas conductoras afectará las resistencias mecánicas finales.

5. Diseño de mezcla: El diseño de la mezcla es un aspecto clave en la producción de hormigón conductor, ya que debe cumplir con diversas propiedades requeridas, como la

resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la durabilidad y la conductividad eléctrica. La relación agua-cemento es un factor importante que afecta la resistencia final del compuesto. Además, es importante considerar que la incorporación de adiciones conductoras o el cambio del esqueleto granular con partículas conductoras puede tener efectos mecánicos en el hormigón conductor que deben ser considerados en el diseño de la mezcla.

En este aspecto comentaremos que se puede esperar una caída de resistencia a flexión del 6-37% y en caso de la compresión alrededor del 25% dependiendo de la adición conductiva. No obstante, también se puede ganar resistencia en un 20%. No hay que olvidar que lo descrito depende tanto de la composición de la matriz cementosa y de la adición conductiva a usar.

Por otro lado, las variaciones de resistencia final también pueden considerarse parte de la configuración de la estructura granular resultante de la combinación de material conductor.

En este documento se ilustra un ejemplo del impacto del cambio en la estructura granular en la resistividad de un hormigón conductor mediante la cascarilla de acero. En la siguiente figura se muestra como cambia la curva granulométrica mediante la combinación de áridos con un reemplazo del 25%.

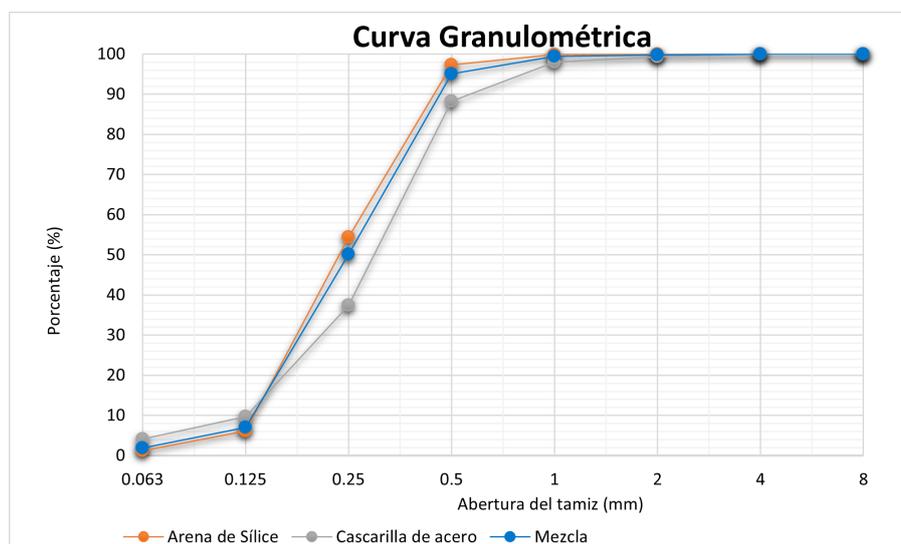


Figura 5.5.7: Combinación de áridos

6. Pruebas: después de mezclar y colocar el hormigón, se deben realizar pruebas para verificar la conductividad eléctrica y las propiedades mecánicas del hormigón. Los ensayos para control de calidad siempre han sido parte de producción de hormigón por lo que

en el hormigón conductor no es diferente. Esto ayudará a asegurar que se cumplan los requisitos de la aplicación.

Es importante tener en cuenta que el diseño de un hormigón conductor llega a ser más complejo que el diseño de un hormigón convencional debido a la necesidad de equilibrar la conductividad eléctrica y las propiedades mecánicas. Por lo tanto, se recomienda que se realicen pruebas adicionales para verificar el rendimiento del hormigón en la aplicación específica.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Introducción

En el presente capítulo, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los estudios realizados durante el desarrollo del trabajo. En primer lugar, se presentan las conclusiones generales que se relacionan con el cumplimiento del objetivo principal de la tesis. También se exponen las conclusiones específicas, que se refieren a los distintos aspectos concretos estudiados para alcanzar el objetivo propuesto.

Las conclusiones generales se basan en la consecución del objetivo principal del documento, que se han enfocado en el análisis de cómo las adiciones conductivas afectan el comportamiento del hormigón, abarcando tanto su estado fresco como endurecido y desde distintas perspectivas.

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos referentes a los estudios que se han realizado encaminados a conseguir los objetivos propuestos.

Al concluir este capítulo, se exponen las posibles líneas de investigación que podrían ser exploradas en el futuro, ya sea porque no se han abordado en profundidad en esta tesis, debido a su complejidad o porque surgieron nuevas ideas a lo largo del desarrollo del trabajo.

6.2. Conclusiones generales

Como consecuencia de dicho estudio las conclusiones principales son las siguientes:

- Las adiciones carbonosas son los materiales que cuentan con un mayor estudio. En consecuencia, son las más sencillas al momento de mezclar puesto que se conoce más a fondo su comportamiento en el hormigón. En contraste, las adiciones provenientes de resi-

duos industriales provocan comportamientos no documentados en profundidad dentro de la matriz cementosa.

- En general, la resistividad eléctrica del concreto con subproductos industriales tanto de la industria siderúrgica de acero o la de cobre dependerá de la cantidad, el tipo y las propiedades de los materiales utilizados, así como de las condiciones de curado y exposición del concreto. Por lo tanto, es importante realizar pruebas y mediciones específicas para cada caso en particular.
- El diseño de un hormigón conductor implica la incorporación de materiales conductivos, como fibras o partículas metálicas, en la mezcla de concreto para mejorar su conductividad eléctrica. El proceso de diseño incluye la selección de los materiales conductores adecuados, la determinación de la proporción adecuada de estos materiales en la mezcla y el ajuste de la relación agua-cemento para obtener las propiedades deseadas. También se deben considerar otros factores, como la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón conductor. La dosificación de adiciones conductivas debe ser cuidadosamente calculada para garantizar que se logre la conductividad eléctrica deseada y se mantenga la resistencia mecánica del hormigón.

6.3. Conclusiones específicas

En lo que sigue se presentan las conclusiones específicas de las etapas de los estudios realizados en la tesis, organizadas de acuerdo con las distintas temáticas abordadas.

6.3.1. Relativas al estado fresco

- El hormigón con adiciones polvorientas y cascarilla de acero necesita mayor cantidad de superplastificante para alcanzar una trabajabilidad adecuada.
- La cascarilla de acero en el hormigón reduce la trabajabilidad por lo que necesita de relaciones agua/cemento mayores al 0,23 y la adición de superplastificantes.

6.3.2. Relativas al estado endurecido

- Los compuestos con polvo de grafito tienen una mayor resistencia mecánica que el negro de humo, lo que lo convierte en una opción preferible si se busca mantener la resistencia mecánica del hormigón conductor.
- Los polvos de aspiración CMG-2 presentan un comportamiento no deseado en un UHPC puesto que la resistencia mecánica dista de la de referencia en gran medida. Además, si

se suma el comportamiento visual en el tiempo de fraguado del material resulta ser una adición poco atractiva en el tema de resistencias mecánicas.

- La combinación de cascarilla de acero y arena de sílice en la fabricación de hormigón conductor puede ser una alternativa interesante debido a que se ha observado que esta mezcla presenta una mayor resistencia en comparación con las adiciones.

6.3.3. Propiedades eléctricas

- En términos generales, el negro de humo tiene una mayor conductividad eléctrica que el polvo de grafito, lo que lo convierte en una opción preferible para mejorar la conductividad eléctrica del hormigón.
- Los polvos de aspiración resultan ser una adición que mejora significativamente la conductividad de un hormigón. Sin embargo, la aplicación como adición solo es recomendable para los tipos CMG-1 ya que el otro tipo como se explica en puntos anteriores afectan su comportamiento de manera negativa.

6.4. Futuras líneas de investigación

- Las capacidades conductivas del hormigón resultante son consecuencia de las capacidades conductivas de las adiciones por lo que se recomienda investigar la conductividad de los polvos de aspiración provenientes de la industria de cobre para futuras aplicaciones.
- Durante la elaboración del trabajo se observó un periodo extendido de fraguado en las mezclas con CMG-2 y FQ. Por lo que, se propone desarrollar un trabajo alrededor de este tema.
- Los resultados de mezclas monofásicas que contenían los residuos industriales mostraron ser buenas adiciones conductivas se plantea realizar un estudio más profundo de las características eléctricas de este material.

Bibliografía

- [1] Luis Bañón Blázquez. Hormigones conductores mediante la adición de materiales carbonosos., 9 2016.
- [2] Zhuang Tian, Yancheng Li, Jiajia Zheng, and Shuguang Wang. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties. *Composites Part B: Engineering*, 177:107437, 11 2019.
- [3] Yu Xun and Eil Kwon. Carbon nanotube based self-sensing concrete for pavement structural health monitoring, 2012.
- [4] Ruohong Zhao, Christopher Tuan, Bao Luo, and An Xu. Radiant heating utilizing conductive concrete tiles. *Building and Environment*, 148:82–95, 1 2019.
- [5] Hesham Abdulla. Design, construction, and performance of heated concrete pavements system, 2018.
- [6] Pedro Terradillos Garcés. *Hormigones conductores multifuncionales*. Editorial Club Universitario, 2011.
- [7] Natt Makul. Advanced smart concrete - a review of current progress, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 274:122899, 11 2020.
- [8] Farhad Aslani and Lining Wang. Fabrication and characterization of an engineered cementitious composite with enhanced fire resistance performance. *Journal of Cleaner Production*, 221:202–214, 6 2019.
- [9] Lining Wang and Farhad Aslani. Self-sensing performance of cementitious composites with functional fillers at macro, micro and nano scales. *Construction and Building Materials*, 314:125679, 1 2022.
- [10] Lining Wang and Farhad Aslani. A review on material design, performance, and practical application of electrically conductive cementitious composites, 12 2019.
- [11] Benny Suryanto, W. John McCarter, Gerry Starrs, Sam A. Wilson, and Ryan M. Traynor. Smart cement composites for durable and intelligent infrastructure. *Procedia Engineering*, 125:796–803, 2015.

-
- [12] Shengwei Sun, Baoguo Han, Shan Jiang, Xun Yu, Yanlei Wang, Hongyan Li, and Jinping Ou. Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring. *Construction and Building Materials*, 136:314–328, 4 2017.
- [13] Pavel Rovnaník, Ivo Kusák, Patrik Bayer, Pavel Schmid, and Lukáš Fiala. Electrical and self-sensing properties of alkali-activated slag composite with graphite filler. *Materials*, 12:1616, 5 2019.
- [14] Amr S. El-Dieb, Mahmoud A. El-Ghareeb, Mohamed A.H. Abdel-Rahman, and El Sayed A. Nasr. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. *Journal of Building Engineering*, 15:61–69, 1 2018.
- [15] Ahmed Jalil Al-Bayati, Kamal H. Butrouna, Robert E. Steffen, Baris Salman, and Mohammad Al-Qaralleh. Utilizing graphite powder to improve concrete conductivity, compressive strength, and workability. pages 881–888. American Society of Civil Engineers, 11 2020.
- [16] Alejandro Flores-Nicolás, Mario Flores-Nicolás, and Jorge Uruchurtu-Chavarín. Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physical-electrochemical properties. *Revista ALCONPAT*, 11:18–33, 1 2021.
- [17] Kraisit Loamrat, Manote Sappakittipakorn, Piti Sukontasukkul, and Nemkumar Banthia. Effect of carbon fiber and graphite powder on resistivity of cement-based sensor under compression. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, 7:29–35, 3 2014.
- [18] Wei He, Wenru Hao, Xia Meng, Pengchong Zhang, Xu Sun, and Yinlan Shen. Influence of graphite powder on the mechanical and acoustic emission characteristics of concrete. *Buildings*, 12:18, 12 2021.
- [19] Hui Li, Hui gang Xiao, and Jin ping Ou. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 28:824–828, 10 2006.
- [20] B. Han, W. Chen, and J. Ou. Piezoresistivity of cement-based materials with acetylene carbon black. *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*, 25:39–44, 2008.
- [21] Vincent W. J. Lin, Mo Li, Jerome P. Lynch, and Victor C. Li. Mechanical and electrical characterization of self-sensing carbon black ecc. page 798316, 3 2011.
- [22] Mingqing Sun, Ying Wu, Bin Li, and Xiedong Zhang. Deicing concrete pavement containing carbon black/carbon fiber conductive lightweight concrete composites. pages 662–668. American Society of Civil Engineers, 6 2011.
-

-
- [23] Heydar Dehghanpour, Kemalettin Yilmaz, and Metin Ipek. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction and Building Materials*, 221:109–121, 10 2019.
- [24] Heydar Dehghanpour, Kemalettin Yilmaz, Faraz Afshari, and Metin Ipek. Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach. *Construction and Building Materials*, 260:119948, 11 2020.
- [25] Yining Ding, Zhipei Chen, Zhibo Han, Yulin Zhang, and F. Pacheco-Torgal. Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam. *Construction and Building Materials*, 43:233–241, 6 2013.
- [26] Ali Al-Dahawi, Mohammad Haroon Sarwary, Oğuzhan Öztürk, Gürkan Yıldırım, Arife Akın, Mustafa Şahmaran, and Mohamed Lachemi. Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials. *Smart Materials and Structures*, 25:105005, 10 2016.
- [27] Leifeng Shi, Ye Lu, and Yu Bai. Mechanical and electrical characterisation of steel fiber and carbon black engineered cementitious composites. *Procedia Engineering*, 188:325–332, 2017.
- [28] Jr. William D. Callister and David G. Rethwisch. *Materials science and engineering : an introduction*. Wiley, 10th edition. edition, 2018.
- [29] M.A. Ali, A.J. Majumdar, and D.L. Rayment. Carbon fibre reinforcement of cement. *Cement and Concrete Research*, 2:201–212, 3 1972.
- [30] Deborah D.L. Chung. Carbon-matrix composites, 1994.
- [31] T.A. Turner, S.J. Pickering, and N.A. Warrior. Development of recycled carbon fibre moulding compounds – preparation of waste composites. *Composites Part B: Engineering*, 42:517–525, 4 2011.
- [32] Soraia Pimenta and Silvestre T. Pinho. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, 31:378–392, 2 2011.
- [33] G. Faneca, I. Segura, J.M. Torrents, and A. Aguado. Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres. *Cement and Concrete Composites*, 92:135–144, 9 2018.
- [34] D D L Chung. Cement-based electronics. *Journal of Electroceramics*, 6:75–88, 2000.
- [35] Jianmin Wu, Jianguo Liu, and Fei Yang. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials*, 75:129–135, 1 2015.
-

-
- [36] Baoguo Han, Liqing Zhang, Chenyu Zhang, Yunyang Wang, Xun Yu, and Jinping Ou. Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 125:479–489, 10 2016.
- [37] Bing Chen, Keru Wu, and Wu Yao. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 26:291–297, 5 2004.
- [38] Manuel Hambach, Hendrik Möller, Thomas Neumann, and Dirk Volkmer. Carbon fibre reinforced cement-based composites as smart floor heating materials. *Composites Part B: Engineering*, 90:465–470, 4 2016.
- [39] Alireza Sassani, Ali Arabzadeh, Halil Ceylan, Sunghwan Kim, S.M. Sajed Sadati, Kasthuriangan Gopalakrishnan, Peter C. Taylor, and Hesham Abdulla. Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements. *Journal of Cleaner Production*, 203:799–809, 12 2018.
- [40] Shuhua Liu, Yuchuan Ge, Meiqiang Wu, Henglin Xiao, and Yaning Kong. Properties and road engineering application of carbon fiber modified-electrically conductive concrete. *Structural Concrete*, 22:410–421, 2 2021.
- [41] N. Banthia, S. Djeridane, and M. Pigeon. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete Research*, 22:804–814, 9 1992.
- [42] David G. Meehan, Shoukai Wang, and D.D.L. Chung. Electrical-resistance-based sensing of impact damage in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21:83–105, 1 2010.
- [43] Huang Yi, Guoping Xu, Huigao Cheng, Junshi Wang, Yinfeng Wan, and Hui Chen. An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16:791–801, 1 2012.
- [44] Yi Jiang, Tung-Chai Ling, Caijun Shi, and Shu-Yuan Pan. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136:187–197, 9 2018.
- [45] F.J. Baeza, O. Galao, I.J. Vegas, M. Cano, and P. Garcés. Influence of recycled slag aggregates on the conductivity and strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement mortars. *Construction and Building Materials*, 184:311–319, 9 2018.
- [46] G. Adegoloye, A.-L. Beaucour, S. Ortola, and A. Noumowé. Concretes made of eaf slag and aod slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability. *Construction and Building Materials*, 76:313–321, 2 2015.
-

-
- [47] Eleftherios K. Anastasiou, Ioanna Papayianni, and Michail Papachristoforou. Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement. *Materials Design*, 59:454–460, 7 2014.
- [48] Flora Faleschini, Amaia Santamaria, Mariano Angelo Zanini, José-Tomás San José, and Carlo Pellegrino. Bond between steel reinforcement bars and electric arc furnace slag concrete. *Materials and Structures*, 50:170, 6 2017.
- [49] Caijun Shi, Christian Meyer, and Ali Behnood. Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52:1115–1120, 8 2008.
- [50] Zhenhua Ren, Junbo Sun, Weichen Tang, Xiantao Zeng, Hao Zeng, Yufei Wang, and Xiangyu Wang. Mechanical and electrical properties investigation for electrically conductive cementitious composite containing nano-graphite activated magnetite. *Journal of Building Engineering*, 57:104847, 10 2022.
- [51] T Hemalatha, Bhaskar Sangoju, and G Muthuramalingam. A study on copper slag as fine aggregate in improving the electrical conductivity of cement mortar. *Sādhanā*, 47:141, 9 2022.
- [52] Zhenhua Ren, Junbo Sun, Xiantao Zeng, Xi Chen, Yufei Wang, Weichen Tang, and Xiangyu Wang. Research on the electrical conductivity and mechanical properties of copper slag multiphase nano-modified electrically conductive cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 339:127650, 7 2022.
- [53] Xiaoming Fan, Dong Fang, Mingqing Sun, and Zhuoqiu Li. Piezoresistivity of carbon fiber graphite cement-based composites with cccw. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 26:339–343, 4 2011.
- [54] Jun Jie Qin, Wu Yao, Jun Qing Zuo, and Hai Yong Cao. Assessment on the electrical conductivity of additive fillers into carbon fiber-cement based composites. *Key Engineering Materials*, 492:185–188, 9 2011.
- [55] Faezeh Azhari and Nemkumar Banthia. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34:866–873, 8 2012.
- [56] Javier F. Baeza, D. D. L. Chung, Emilio. Zornoza, Luis G. Andi6n, and Pedro. Garc6s. Triple percolation in concrete reinforced with carbon fiber. *ACI Materials Journal*, 107, 2010.
- [57] Md Lutfor Rahman, Amir Malakooti, Halil Ceylan, Sunghwan Kim, and Peter C. Taylor. A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. *Construction and Building Materials*, 329:127139, 4 2022.
-

-
- [58] Ekkehard Fehling. *Ultra-High Performance Concrete UHPC*. Wiley, 9 2014.
- [59] Steven H Kosmatka, Besatrix Kerkhoff, CP Panarese William, and Jussana Tanesi. Pca diseño y control de mezclas de concreto. *PCA Portland Cement Association*, 2004.
- [60] Farhad Aslani, Lining Wang, and Meizhiwen Zheng. The effect of carbon nanofibers on fresh and mechanical properties of lightweight engineered cementitious composite using hollow glass microspheres. *Journal of Composite Materials*, 53:2447–2464, 7 2019.
- [61] Agnieszka ŚŁOSARCZYK, Waldemar PICHÓR, and Maksymilian FRAĆ. Thermal and electrical characterization of the carbon nanofibers based cement composites. *Materials Science*, 23, 5 2017.
- [62] Luigi Coppola, Alessandra Buoso, and Fabio Corazza. Electrical properties of carbon nanotubes cement composites for monitoring stress conditions in concrete structures. *Applied Mechanics and Materials*, 82:118–123, 7 2011.
- [63] X XIE, Y MAI, and X ZHOU. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49:89–112, 5 2005.
- [64] Wengui Li, Wenkui Dong, Yipu Guo, Kejin Wang, and Surendra P. Shah. Advances in multifunctional cementitious composites with conductive carbon nanomaterials for smart infrastructure. *Cement and Concrete Composites*, 128:104454, 4 2022.
- [65] Hui Wang, Xiaojian Gao, and Rui Wang. The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance. *Construction and Building Materials*, 134:673–683, 3 2017.
- [66] Baoguo Han, Xun Yu, and Jinping Ou. *Self-sensing Concrete in Smart Structures*. Elsevier, 8 2014.
- [67] Ming qing Sun, Richard J.Y. Liew, Min-Hong Zhang, and Wei Li. Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 65:630–637, 8 2014.
- [68] André O. Monteiro, Paulo B. Cachim, and Pedro M.F.J. Costa. Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles. *Cement and Concrete Composites*, 81:59–65, 8 2017.
- [69] I Segura, G Faneca, J M Torrents, and A Aguado. Self-sensing concrete made from recycled carbon fibres. *Smart Materials and Structures*, 28:105045, 10 2019.
- [70] D.D.L. Chung. Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing. *Carbon*, 50:3342–3353, 8 2012.
-

-
- [71] Oscar Galao, Luis Bañón, Francisco Baeza, Jesús Carmona, and Pedro Garcés. Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing. *Materials*, 9:281, 4 2016.
- [72] Jian Wei, Lei Hao, Geping He, and Chunli Yang. Enhanced thermoelectric effect of carbon fiber reinforced cement composites by metallic oxide/cement interface. *Ceramics International*, 40:8261–8263, 7 2014.
- [73] Alberto Belli, Alessandra Mobili, Tiziano Bellezze, and Francesca Tittarelli. Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 109:103569, 5 2020.
- [74] Sherif A. Yehia and Christopher Y. Tuan. Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1698:45–53, 1 2000.
- [75] Hui Li, Qiangqiang Zhang, and Huigang Xiao. Self-deicing road system with a cnfp high-efficiency thermal source and mwcnt/cement-based high-thermal conductive composites. *Cold Regions Science and Technology*, 86:22–35, 2 2013.
- [76] Hesham Abdulla, Halil Ceylan, Sunghwan Kim, Kasthurirangan Gopalakrishnan, Peter C. Taylor, and Yelda Turkan. System requirements for electrically conductive concrete heated pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2569:70–79, 1 2016.
- [77] C Farcas, O Galao, R Navarro, E Zornoza, F J Baeza, B Del Moral, R Pla, and P Garcés. Heating and de-icing function in conductive concrete and cement paste with the hybrid addition of carbon nanotubes and graphite products. *Smart Materials and Structures*, 30:045010, 4 2021.
- [78] Christopher Y. Tuan. Roca spur bridge: The implementation of an innovative deicing technology. *Journal of Cold Regions Engineering*, 22:1–15, 3 2008.
- [79] Hongming Zhao, Zhimin Wu, Songgen Wang, Jianjun Zheng, and Guangjie Che. Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires. *Cold Regions Science and Technology*, 65:413–420, 3 2011.

Anejo A

Características adicionales de los materiales

A.1. Propiedades químicas

Compuesto	Contenido (%)				
	M1	M2	M3	Promedio	Desv.Est.
As	-	-	0,199	0,20	-
Ca	9,87	4,73	8,38	7,66	2,64
Cd	0,143	-	-	0,14	-
Cl	3,73	7,47	5,33	5,51	1,88
Cr	0,275	0,116	0,221	0,20	0,08
Cu	13,68	11,18	11,03	11,96	1,49
Fe	0,299	0,155	0,231	0,23	0,07
K	0,819	0,439	0,823	0,69	0,22
Mg	0,576	0,376	0,529	0,49	0,10
Na	5,21	10,77	11,75	9,24	3,53
Ni	0,0098	0,008	0,0118	0,01	0,00
P	3,44	-	-	3,44	-
Pb	2,76	3,51	4,04	3,44	0,64
Pt	0,0159	-	-	0,02	-
P	-	0,912	1,37	1,14	0,32
S	2,32	-	-	2,32	-
Si	1,1	0,505	0,823	0,81	0,30
Sn	0,927	0,78	1,35	1,02	0,30
S	1,11		0,918	1,01	0,14
Ti	0,0086		0,0067	0,01	0,00

Tabla A.1.1 Continúa en la siguiente página

Tabla A.1.1 Continúa de la página anterior

Compuesto	Contenido (%)				
	M1	M2	M3	Promedio	Desv.Est.
Zn	13	7,03	4,99	8,34	4,16
B	1,98	-	-	1,98	-
O	23,08	14,64	17,07	18,26	4,34
LOI	16,47	36,13	30,91	27,84	10,18
Índice de Basicidad	5,13	7,02	6,02	6,06	0,95

Tabla A.1.1: Composición química (FRX) de la muestra de polvo de aspiración CMG-2

Compuesto	Contenido (%)				
	M1	M2	M3	Promedio	Desv.Est.
Contenido amorfo	65,50 %	68,50 %	71,00 %	68,33 %	2,75
Anortita (CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	0,79 %	-	-	0,79 %	-
Calcita (CaCO ₃)	0,023	2,40 %	1,46 %	2,05 %	0,52
Chabazite-ca	-	3,00 %	-	3,00 %	-
Cassiterite	-	-	1,14 %	1,14 %	-
Carbón	12,20 %	-	-	12,20 %	-
Chalcapyrite	-	0,03 %	-	0,03 %	-
Chloride	-	-	2,70 %	2,70 %	-
Cristobalite	-	-	0,33 %	0,33 %	-
Cuarzo	0,78 %	-	-	0,78 %	-
Dolomita	-	-	1,01 %	1,01 %	-
Grafito	-	0,53 %	0,90 %	0,72 %	0,26
Isocubanite	-	0,02 %	-	0,02 %	-
Fe(SO ₄)(OH)·5H ₂ O	0,36 %	-	-	0,36 %	-
Herbertsmithita (Cu ₃ Zn(OH) ₆ Cl ₂)	1,60 %	-	-	1,60 %	-
MgFe-chloridehidroxide	-	0,46 %	0,00 %	0,23 %	0,33
NaZn ₄ (SO ₄)(OH) ₆ Cl·6H ₂ O	0,24 %	-	-	0,24 %	-
Oldhamita	-	9,42 %	6,16 %	7,79 %	2,31
Periclase	-	0,05 %	-	0,05 %	-
Portlandita	-	-	2,40 %	2,40 %	-
Siderita (FeCO ₃)	-	1,40 %	0,01 %	0,70 %	0,98
Talco	2,57 %	-	-	2,57 %	-
Tenorita (CuO)	6,26 %	7,17 %	4,33 %	5,92 %	1,45
Yeso (CaSO ₄ ·½H ₂ O)	1,24 %	7,50 %	5,50 %	4,75 %	3,20
Zincita (ZnO)	4,47 %	2,49 %	1,29 %	2,75 %	1,61
Zincowoodwardite	-	-	2,31 %	2,31 %	-
Fe(SO ₄)(OH)·2H ₂ O	1,70 %	-	-	1,70 %	-

Tabla A.1.2: Composición mineralógica de la muestra de polvo de aspiración CMG-2

Fase	Contenido (%)				
	M1	M2	M3	Promedio	Desv.Est.
Contenido amorfo	88,50 %	88,87 %	92,25 %	89,87 %	2,07
Cuprita (Cu ₂ O)	0,99 %	0,52 %	0,60 %	0,70 %	0,25
Tenorita (CuO)	2,11 %	-	-	2,11 %	
Cuarzo (SiO ₂)	1,66 %	1,13 %	0,98 %	1,26 %	0,36
Calcita (CaCO ₃)	2,82 %	9,47 %	0,98 %	4,42 %	4,47
„Arcanita K ₂ SO ₄ ”	0,86 %	-	-	0,86 %	-
(K,Na) ₃ Na(SO ₄) ₂	0,61 %	-	-	0,61 %	-
Calcocita (Cu ₂ S)	0,41 %	-	-	0,41 %	-
Espinela (MgAl ₂ O ₄)	0,68 %	-	-	0,68 %	-
Alabandita (MnS)	0,10 %	-	-	0,10 %	-
Albita (NaAlSi ₃ O ₈)	0,0049	-	-	0,49 %	-
Hematita (Fe ₂ O ₃)	0,77 %	-	-	0,77 %	-

Tabla A.1.3: Composición química (FRX) de la muestra de lodos de lavado

A.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los materiales fueron completas con una campaña experimental adicional.

Parámetro	Resultado
Gravedad específica	2,44
Tamaño medio partícula (μm)	4,22
Superficie específica (m ² /kg)	29343,1

Tabla A.2.1: Propiedades físicas de la muestra de polvo de aspiración CMG-1

Parámetro	Resultado
Gravedad específica	2,75
Tamaño medio partícula (μm)	2,94
Superficie específica (m ² /kg)	10499,8

Tabla A.2.2: Propiedades físicas de la muestra de polvo de aspiración CMG-2

Parámetro	Resultado
Gravedad específica	2,07
Tamaño medio partícula (μm)	6,77
Superficie específica (m ² /kg)	32874

Tabla A.2.3: Propiedades físicas de la muestra de lodos de lavado

Parámetro	Resultado
Tamaño máximo partícula (mm)	4
Superficie específica (m ² /kg)	0,323±0.108

Tabla A.2.4: Propiedades físicas de la cascarilla de acero.

Anejo B

Recopilación fotográfica

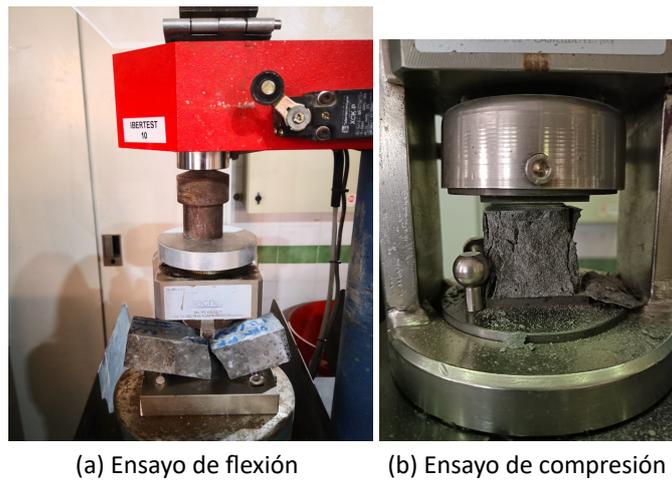
B.1. Fotografías de la campaña experimental



Figura B.1.1: Materiales para mezcla en laboratorio



Figura B.1.2: Ensayos de mesa de sacudidas

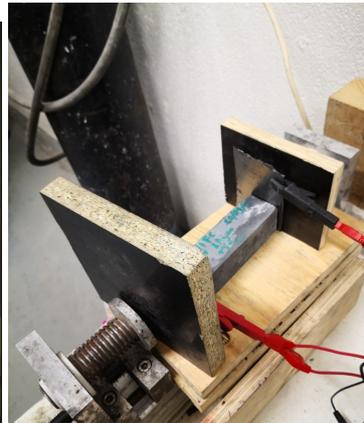


(c) Ensayo de compresión en cilindro

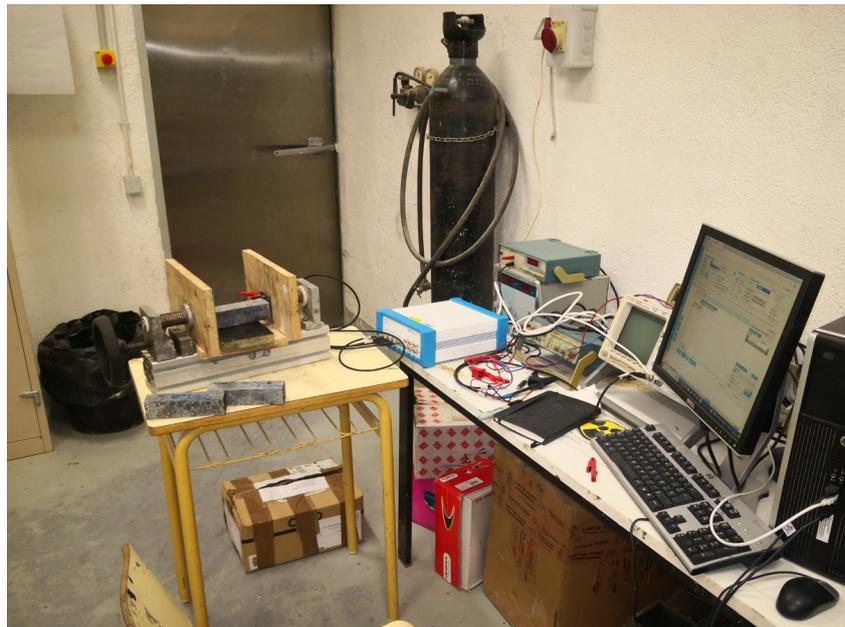
Figura B.1.3: Ensayos de flexión y compresión



(a) MFIA Zurich Instruments



(b) Muestra sujeta en prensa



(c) Ensayo en marcha en cámara seca

Figura B.1.4: Medición de impedancias