

**PROPUESTA DE CONCRETO CON AGREGADO FINO DE
ESCORIA DE CUBILOTE COMO APORTE AL ESTUDIO DE
LA DURABILIDAD Y PROPIEDADES ACÚSTICAS**



CARLOS MAURICIO PICO CORTÉS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**PROPUESTA DE CONCRETO CON AGREGADO FINO DE
ESCORIA DE CUBILOTE COMO APORTE AL ESTUDIO DE
LA DURABILIDAD Y PROPIEDADES ACÚSTICAS**

CARLOS MAURICIO PICO CORTÉS

Tesis de grado en modalidad investigación para optar por el título de
Ingeniero Civil

Director

Ph.D. RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ

Codirector

Ing. LUDWING PÉREZ BUSTOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios, mi Amigo Fiel, quien me sostiene en los momentos buenos y en los momentos malos, hablando a mi corazón y dirigiendo mis pasos. Padre, tú mereces toda la honra y la gloria por los siglos de los siglos. Gracias por tu gran amor.

A mi madre, con quien comparto todos los éxitos que pueda alcanzar en mi vida. Ella es la gestora de este proyecto y de todos los que pueda emprender, pues con su amor y dedicación me ha apoyado día a día, enseñándome que nunca hay que rendirse, que los grandes no son los que nunca han caído, sino los que saben levantarse y sobreponerse a la adversidad. Te amo mucho, mami.

A mi hermanita Melissa, a quien amo y admiro por su alegría constante, y a quien dedico este trabajo como una motivación para su realización personal.

A mi padre, que en todo momento está pendiente de mí y es quien me motiva día a día a ser un mejor profesional y una mejor persona. A él debo en gran parte lo que soy, pues me enseñó a tener amor por el estudio. Te amo papá.

A Laurilyn, mi novia, quien me da su amor y comprensión. Ella es quien me alegra con su sonrisa, me motiva con su actitud y me enamora cada día más con su mirada. Mi amor, te admiro por ser la profesional que eres, pero sobre todo por ser una gran persona.

A mis demás familiares, con quienes espero compartir el día que Dios nos de la recompensa final. Los amo a todos.

A mis amigos, los que crecieron conmigo, los que compartieron conmigo en el colegio, mis compañeros de la universidad, los que me han acompañado en el ministerio musical, los que forman parte de la familia Gama. A todos, gracias por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, donde he encontrado las bases para ser un profesional integral y el apoyo constante en la realización de este sueño.

A la Escuela de Ingeniería Civil, la cual me ofreció una educación de calidad, por medio de su talento humano, su desarrollo tecnológico y su infraestructura física.

Al profesor Ricardo Cruz, PhD., director de la investigación, por su valiosa colaboración a lo largo de todo el proyecto, por atenderme siempre con buena disposición y por brindarme su confianza.

Al codirector del proyecto, ingeniero Ludwing Pérez, por ser mi soporte en cada una de las fases que se desarrollaron en el proyecto. Por su amistad y apoyo incondicional, que para mí son invaluableles.

A la profesora Luz Amparo Quintero, M.Sc., por permitirme el uso de la cámara de carbonatación para el desarrollo de los ensayos y me brindó capacitación teórica en cuanto a las normas de seguridad.

A los tecnólogos del Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, en especial, a Jairo Hernández y Jaime Cadena por su guía y cooperación en el desarrollo de los ensayos físico-mecánicos y de durabilidad.

Al señor Gebrail Botello, técnico de soporte académico del Laboratorio de Electrónica de la Escuela de Física UIS, por brindarme su constante colaboración en el desarrollo del ensayo acústico del tubo de impedancia.

A la empresa Multingeniería Ltda., en especial al ingeniero Carlos Castro, por su soporte en el entrenamiento de la cámara de carbonatación y en la realización de las pruebas con dióxido de carbono.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. ESTADO DEL ARTE	22
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO	22
2.2 EL CONCEPTO DE DURABILIDAD	25
2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO	26
2.3.1 CARBONATACIÓN	26
2.3.1.1 CONCENTRACIÓN DE CO ₂ EN LA ATMÓSFERA	26
2.3.1.2 CARBONATACIÓN DEL CONCRETO	27
2.3.2 REACCIÓN ALCALI-AGREGADO	29
2.3.3 ATAQUE POR SULFATOS	31
2.4 LA ESCORIA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	33
2.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESCORIAS	33
2.4.2 DIFERENTES APLICACIONES DE LA ESCORIA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	34
2.4.3 ESCORIAS Y OTRAS ADICIONES QUE FAVORECEN LA DURABILIDAD	36
2.5 LA ESCORIA DE HORNO DE CUBILOTE	38
2.6 ENSAYOS DE DURABILIDAD	40
2.6.1 ENSAYO ACELERADO DE ATAQUE POR SULFATOS	41
2.6.2 ENSAYO DE ACELERACIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO	41
2.6.3 ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA	42
2.6.4 ENSAYOS COMPLEMENTARIOS	44

2.7 AISLAMIENTO ACÚSTICO DEL CONCRETO	45
2.7.1 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL SONIDO E ÍNDICE DE REDUCCIÓN DE RUIDO	46
2.7.2 FUNDAMENTO FÍSICO DEL TUBO DE IMPEDANCIA	47
3. DISEÑO METODOLÓGICO	50
3.1 FASE 1: PRELIMINARES	51
3.1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	51
3.1.2 ACOPIO DE MATERIALES	51
3.1.3 TRITURADO DE LA ESCORIA	53
3.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	53
3.2 FASE 2: FABRICACIÓN DE LAS MUESTRAS	54
3.2.1 DISEÑO DE MEZCLA	54
3.2.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD	55
3.2.3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE TUBO DE IMPEDANCIA	57
3.3 FASE 3: ENSAYOS PREVIOS AL ATAQUE QUÍMICO	58
3.3.1 MASA UNITARIA	58
3.3.2 DENSIDAD Y ABSORCIÓN INICIAL DE AGUA	59
3.3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIN ATAQUES QUÍMICOS	59
3.4 FASE 4: ESTUDIO DE LA SULFATACIÓN DEL CONCRETO	60
3.5 FASE 5: ESTUDIO DE LA REACCIÓN ALCALI-AGREGADO	62
3.6 FASE 6: ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO	64
3.6.1 ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA	64
3.6.2 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	68
3.6.3 MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN	69
3.7 FASE 7: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS	69
3.7.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	70
3.7.2 ENSAYO ACÚSTICO POR MEDIO DEL TUBO DE IMPEDANCIA	71
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	75
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	75

4.2 DISEÑO DE MEZCLA	79
4.3 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE PROBETAS DE CONCRETO	80
4.4 ENSAYO ACELERADO DE ATAQUE POR SULFATOS	82
4.5 ENSAYO DE ACELERACIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO	85
4.6 ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA	87
4.7 ENSAYO ACÚSTICO POR EL MÉTODO DE TUBO DE IMPEDANCIA	91
4.8 PROPUESTA DE ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN	93
5. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	96
6. RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland	23
Tabla 2. Principales tipos de cemento Portland y sus características	24
Tabla 3. Condiciones de la cámara para la carbonatación del concreto.	66
Tabla 4. Flujos de CO ₂ y aire para garantizar una concentración del 70%.	67
Tabla 5. Resultados de gravedad específica y peso unitario de los agregados.	75
Tabla 6. Dosificación de la mezcla y relación agua/cemento según el método ACI.	79
Tabla 7. Cantidades de material para una probeta cilíndrica.	79
Tabla 8. Resultados de masa unitaria de las probetas de concreto recién mezclado.	80
Tabla 9. Resultados de densidad para doce muestras de concreto	80
Tabla 10. Resultados de absorción inicial de agua para doce muestras de concreto	81
Tabla 11. Resultados de medición de la profundidad de carbonatación.	88
Tabla 12. Elementos arquitectónicos absorbentes y sus valores típicos del índice de reducción de ruido. Espesores y densidades.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Difusión del dióxido de carbono en el concreto.	29
Figura 2. Fases de la reacción álcali-agregado.	30
Figura 3. Esquema del ataque por sulfatos al concreto.	32
Figura 4. Clasificación simplificada de las escorias más utilizadas en la construcción.	34
Figura 5. Algunas sustancias aprovechadas como adiciones de cemento.	37
Figura 6. Apariencia de la escoria de horno de cubilote.	39
Figura 7. Representación de la máxima y mínima amplitud en un tubo de impedancia.	48
Figura 8. Diagrama de la metodología de la investigación.	50
Figura 9. Proceso de curado de 3 muestras del mismo porcentaje de sustitución.	57
Figura 10. Discos de concreto utilizados en el ensayo de tubo de impedancia.	58
Figura 11. Inmersión de probetas en la solución de sulfato de sodio anhidro.	61
Figura 12. Inmersión de probetas en agua a 80°C.	63
Figura 13. Partes de la cámara de carbonatación	65
Figura 14. Cámara de carbonatación en operación.	68
Figura 15. Tubo de impedancia.	70
Figura 16. Detalle del sistema móvil varilla-micrófono.	70

Figura 17. Detalle del baffle con soporte de acrílico.	71
Figura 18. Esquema de tubo de Kundt (a) y perfil de la onda estacionaria formada en su interior (b). Sistema de micrófono móvil externo.	72
Figura 19. Desarrollo del ensayo acústico por el método del tubo de impedancia.	73
Figura 20. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 1	78
Figura 21. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 3	78
Figura 22. Cristalización de sales en una probeta con sustitución del 20% escoria/arena.	83
Figura 23. Daño generado en una probeta con sustitución del 20% escoria/arena.	83
Figura 24. Profundidades de carbonatación para el 0, 10, 15 y 20% de sustitución.	88
Figura 25. Paneles prefabricados de hormigón.	93
Figura 26. Losetas de cemento para pisos.	94
Figura 27. Caja de inspección eléctrica.	95
Figura 28. Adoquines para pavimentos.	95

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Concentración anual de dióxido de carbono desde 1959 hasta 2011	27
Gráfica 2. Curva granulométrica de la arena.	76
Gráfica 3. Curva granulométrica de la escoria de horno de cubilote triturada.	77
Gráfica 4. Absorción inicial de agua vs % de sustitución e/a (promedio).	81
Gráfica 5. Resultados del ensayo de compresión simple.	82
Gráfica 6. Variación de la masa húmeda de las probetas sometidas a sulfatación.	82
Gráfica 7. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión (sulfatos).	84
Gráfica 8. Variación de la masa húmeda. Ensayo de aceleración de la RAA.	85
Gráfica 9. Porcentaje de variación de la masa respecto al porcentaje de sustitución (RAA).	86
Gráfica 10. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión (RAA).	87
Gráfica 11. Tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC.	89
Gráfica 12. Resistencia máxima a la tracción indirecta de probetas carbonatadas.	90
Gráfica 13. Coeficiente de absorción acústico medido a distintas frecuencias.	91
Gráfica 14. Índice de reducción de ruido para diferentes sustituciones e/a.	91

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.	105
1. DENSIDAD DEL CEMENTO	105
2. ANÁLISIS FISCOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA SUMINISTRADO POR EL AMB.	106
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	106
4. GRANULOMETRÍA Y MÓDULO DE FINURA DEL AGREGADO FINO.	110
5. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA MEDIANTE ANÁLISIS DE ENERGÍA DISPERSIVA - ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X (EDX).	112
ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN EL MÉTODO ACI	115
ANEXO C. MEMORIAS DEL ENSAYO DE ATAQUE POR SULFATOS	117
ANEXO D. MEMORIAS DEL ENSAYO DE ACELERACIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO.	120
ANEXO E. MEMORIAS DEL ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA.	122
ANEXO F. MEMORIAS DEL ENSAYO ACÚSTICO DEL TUBO DE IMPEDANCIA.	123

RESUMEN

TÍTULO: PROPUESTA DE CONCRETO CON AGREGADO FINO DE ESCORIA DE CUBILOTE COMO APORTE AL ESTUDIO DE LA DURABILIDAD Y PROPIEDADES ACÚSTICAS. *

AUTOR: CARLOS MAURICIO PICO CORTÉS. **

PALABRAS CLAVES: concreto, durabilidad, sonido, escoria de horno de cubilote (EHC), escoria por arena (e/a), sulfatación, carbonatación, reacción álcali-agregado (RAA), absorción acústica, tubo de impedancia.

Se presenta el comportamiento del concreto modificado con EHC en sustituciones (e/a) del 0%, 10%, 15% y 20%, sometido a ataques químicos acelerados de carbonatación, sulfatación y RAA. Se determinan las características de absorción del sonido del material por medio de coeficientes de absorción acústica (α), e índices de reducción de ruido (NRC). La carbonatación se evalúa por medio de una cámara cerrada con 70% de concentración de dióxido de carbono y condiciones de humedad relativa entre el 50% y el 70%. Los resultados indican que la profundidad penetración de CO₂ es mayor en porcentajes bajos de sustitución e/a. Para acelerar el ataque por sulfatos, se sumergen probetas en solución acuosa de sulfato de sodio anhidro (Na₂SO₄) 1N con ciclos de humedecimiento y secado. Se determina que el deterioro presentado en la pasta de concreto es directamente proporcional al porcentaje de sustitución e/a. La aceleración de la RAA se realiza en solución acuosa de hidróxido de Sodio (NaOH) a 16 días. Se concluye que la inclusión de EHC no es favorable por RAA. La medición del coeficiente de absorción acústica se realiza con el método de tubo de impedancia, relacionando valores máximos y mínimos de amplitud de onda estacionaria. Los resultados muestran que concretos de EHC con mayores sustituciones e/a son favorables para la absorción de ruidos en las edificaciones. A partir del comportamiento del material respecto a los ensayos realizados, se proponen elementos de construcción no estructurales en los que puede ser utilizado. Estos son paneles de absorción acústica, losetas para pisos, cajas de inspección eléctrica y adoquines.

* TRABAJO DE GRADO.

** FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS. ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL.
Director: PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector: Ing, Ludwing Pérez Bustos.

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL OF CONCRETE WITH SLAG OF CUPOLA FURNANCE AS FINE AGGREGATE: A CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DURABILITY AND ACOUSTIC PROPERTIES. *

AUTHOR: CARLOS MAURICIO PICO CORTÉS. **

KEYWORDS: concrete, durability, sound, slag of cupola furnace (SCF), sand replacement, sulfation, carbonation, alkali-aggregate reaction (AAR), acoustic absorption, impedance tube.

This thesis presents the performance of concrete modified with SCF as sand replacement of 0%, 10%, 15% and 20%, subjected to chemical attacks accelerated: carbonation, sulfation and AAR. The sound absorption characteristics of the material are determined through sound absorption coefficients (α), and noise reduction coefficients (NRC). Carbonation is evaluated through a camera closed with concentration 70% of carbon dioxide and conditions of relative humidity between 50% and 70%. The results indicate that the penetration depth of CO₂ is higher in low percentages of sand replacement. To accelerate the attack by sulfates, specimens are immersed in aqueous solution of sodium sulfate anhydrous (Na₂SO₄) 1N with cycles of wetting and drying. It is determined that the impairment presented in concrete paste is directly proportional to the percentage of sand replacement. The acceleration of the AAR is carried out in aqueous solution of sodium hydroxide (NaOH) to 16 days. The test concludes that the inclusion of SCF is not favorable for AAR. The measurement of sound absorption coefficient is made with the method of tube of impedance, relating minimum and maximum values of stationary wave amplitude. The results show that SCF with higher sand replacement are favorable for the absorption of noise in buildings. Non-structural building elements that can be used are proposed from the behavior of the material with respect to the tests carried out. These are panels of acoustic absorption, tiles for floors, boxes of electrical inspection and pavers.

* RESEARCH WORK

** FACULTY OF PHYSICAL-MECHANICAL ENGINEERINGS, CIVIL ENGINEERING SCHOOL.
Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, PhD. Codirector: Ludwing Pérez Bustos, BSc.

INTRODUCCIÓN

A través de la historia, el ser humano se ha esmerado en la investigación de materiales que permitan la construcción de estructuras funcionales, seguras y confortables. Materiales cerámicos, metálicos, poliméricos y compuestos hacen parte de la gran variedad de alternativas con las cuales se busca cumplir este propósito. El concreto u hormigón sigue siendo el material de construcción por excelencia, su uso generalizado ha significado un aporte invaluable para el desarrollo de las civilizaciones modernas. Su bajo costo y la garantía de la experiencia adquirida a través del tiempo, lo ubican, aún en el siglo XXI como un factor esencial para el desarrollo de infraestructuras.

La tecnología del concreto ha avanzado hacia la optimización de diversas propiedades. Por ejemplo, en cuanto a la funcionalidad, se ha estudiado la fluidez del concreto para poder mejorar su manejabilidad sin disminuir la relación agua/cemento [1]; respecto a la seguridad, cada día se realizan nuevos estudios para aumentar la resistencia o la durabilidad [2]; y con relación al confort, se ha hecho indispensable el estudio de factores como la acústica [3] y la temperatura en espacios cerrados.

Existe una gran diversidad de aditivos, que contribuyen a optimizar las propiedades básicas del concreto. Generalmente se trata de productos capaces de disolverse en agua. Sin embargo, en los últimos años se han adelantado investigaciones con residuos de otras industrias como sustitutos en el concreto en forma de agregado. Las razones por las cuales se han planteado estas soluciones tienen que ver con la contaminación que se genera al no realizarse una correcta gestión de los residuos. La escoria derivada de la industria metalúrgica es uno de los materiales de mayor accesibilidad para su aplicación como agregado.

El concreto con sustituciones de residuos puede verse afectado de manera diferente que los concretos convencionales ante ataques químicos, causados por factores externos presentes en el ambiente de servicio. Mediante la presente investigación se pretende contribuir al estudio de la durabilidad en concretos con escoria triturada de horno de cubilote (EHC) como agregado fino, en diferentes porcentajes de sustitución escoria por arena (e/a), sometidos a ataques de sulfatos, carbonatación y reacción álcali-agregado. Además, se pretende hacer un aporte al confort acústico de las edificaciones a través del análisis del coeficiente de absorción de sonido y el índice de reducción de ruido en los diferentes tipos de concretos estudiados.

Este documento presenta inicialmente, el estado del arte, el cual reseña algunos de los estudios que se han realizado hasta el momento en cuanto a la tecnología del concreto, la durabilidad de las estructuras sometidas a ataques químicos, el uso de escorias de distintos tipos de hornos en el concreto y la medición de la absorción acústica de un material por el método del tubo de impedancia. Seguidamente, se muestra el diseño de la metodología empleada: las ocho fases del proyecto, cada una con sus etapas y la descripción en detalle de las actividades realizadas. Se incluyen los ensayos realizados para determinar el comportamiento del material. El capítulo cuatro presenta el informe de resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados, sustentado con tablas o gráficas, además de su discusión y análisis. Posteriormente, se presentan las conclusiones obtenidas, con el fin de proponer elementos para la construcción que se comporten adecuadamente en las condiciones evaluadas. Además, se hacen recomendaciones para tener en cuenta si se requieren plantear nuevas alternativas. Adicionalmente, en los anexos del documento, se encuentra información detallada correspondiente a la caracterización de los materiales y el diseño de mezcla, así como las memorias con los datos de todos los ensayos realizados.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La reducción de la contaminación por medio de la reutilización de residuos de producción se ha convertido en una prioridad en el siglo XXI. La escoria es uno de los residuos que más interés despierta por su proveniencia y alta disponibilidad. En los últimos años se han realizado diversos estudios a la escoria como componente del concreto con distintos propósitos como aumentar la resistencia, aligerar el concreto, contribuir a la durabilidad del material y otras aplicaciones, pero siempre con el propósito fundamental de contribuir al mejoramiento de las condiciones del medio ambiente.

Los usos industriales que se le dan a las escorias varían según el tipo de horno y del proceso de enfriamiento que se lleva a cabo, cada escoria tiene distinto comportamiento fisicoquímico. La escoria de alto horno, por ejemplo, es reconocida por su buen comportamiento como materia prima para la elaboración del cemento [4], sin embargo, las escorias de otros hornos han sido estudiadas en menor medida. El horno de cubilote moderno posee una eficiencia de fusión alta comparada con la de otros hornos [5], y es por esta razón que en el mundo aún se utiliza este sistema como alternativa en la industria metalúrgica. Será de gran utilidad proporcionar una base de información respecto al comportamiento que presenta el concreto con aditivos de escoria de horno de cubilote, en términos de durabilidad puesto que se trata de un derivado de la industria siderúrgica con contenido metálico. Este concreto puede verse afectado de forma diferente que el concreto normal por ataques químicos.

Esta investigación se enfoca en el estudio de concretos con escoria triturada de horno de cubilote, con porcentajes de sustitución del agregado fino del 0, 10, 15 y 20%. Se pretende realizar un aporte significativo a la caracterización en términos de durabilidad por medio de ensayos que evalúen si el material es reactivo a ataques por carbonatación, sulfatación y reacción álcali-agregado.

No solamente las caracterizaciones físico-mecánicas y de durabilidad en el material son trascendentes. El estudio de las propiedades acústicas del concreto también es muy importante. Cada día más se trabaja por establecer condiciones necesarias para realizar actividades cómodamente y el adecuado control del sonido dentro de las edificaciones, razón por la cual es importante el estudio de este factor en el concreto. Se desea evaluar el comportamiento acústico con las mismas sustituciones de agregado fino, utilizando el método del tubo de impedancia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Proponer el uso de concreto elaborado con sustitución del agregado fino por escoria, evaluando la durabilidad respecto a la carbonatación, sulfatación y reacción álcali-agregado, y las propiedades de aislamiento acústico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar el comportamiento del concreto modificado con sustitución de escoria de horno de cubilote por agregado fino, sometido a ataques químicos de carbonatación, sulfatación y reacción álcali-agregado.
- Evaluar las propiedades acústicas del concreto modificado por medio del método del tubo de impedancia.
- Proponer elementos para la construcción que se comporten adecuadamente en las condiciones evaluadas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

El concreto, también llamado hormigón, es un material compuesto por un aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), materiales de relleno, como lo son el agregado fino y el agregado grueso, agua y eventualmente aditivos. El concreto se ha convertido en el material de construcción más utilizado a nivel mundial, gracias a la versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener, las propiedades físico-mecánicas al ser usado como elemento estructural y, su economía [6].

El concreto tiene tres estados diferentes: fresco, fraguado y endurecido. En cada estado, el concreto tiene propiedades diferentes. En el estado fresco, es blando, tiene aspecto de “masa” y puede ser trabajado o moldeado en diferentes formas. El estado fraguado tiene lugar después de la compactación, comienza a ponerse rígido, y aunque puede ser colocado, es difícil darle acabados. Después de cierto tiempo el concreto ha fraguado, empieza a ganar resistencia y se endurece. Las propiedades del concreto endurecido son resistencia (principalmente a la compresión) y durabilidad [7].

La dosificación para el diseño de un concreto se basa en la capacidad de cumplir equilibradamente con las propiedades de manejabilidad en estado fresco, versus las propiedades de resistencia y estabilidad de volumen (masa unitaria) en estado endurecido. Los agregados constituyen aproximadamente entre el 60% al 75% del volumen total del concreto, razón por la cual deben ser seleccionados conforme a su buena resistencia mecánica y condiciones de exposición, sin embargo, la

calidad del concreto no depende exclusivamente de los agregados, sino también de la pasta y de la unión entre ellas. [8]

La pasta es la mezcla entre el cemento, el agua y el aire naturalmente atrapado en la mezcla. Según la Ley de Abrams, la relación agua/cemento también influye significativamente en la calidad del concreto [7]. Existen diferentes métodos para dosificar los componentes del concreto. Uno de los más utilizados es el método estandarizado por el Instituto Americano del Concreto (ACI), el cual se basa en la selección del asentamiento de acuerdo al tipo de construcción, la resistencia promedio de diseño, el tamaño máximo del agregado, la relación agua/cemento y el módulo de finura de la arena. Es posible emplear cualquiera de los dos procedimientos siguientes: por peso o por volumen absoluto. [9]

Cemento Portland: Es importante conocer la estructura química del concreto para realizar una descripción apropiada de los efectos que ocasionan las reacciones químicas que se generan a partir de sustancias presentes en el medio de servicio o en el interior de la mezcla. A continuación se describen los principales componentes del cemento Portland:

COMPONENTE	FÓRMULA	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicato Bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland

La hidratación del cemento es el proceso por medio del cual el cemento reacciona con el agua, liberando una cierta cantidad de calor y endureciendo la pasta de cemento. Ocurren gran cantidad de reacciones químicas, siendo las más importantes las siguientes:



Los aluminatos se hidratan más rápido que los silicatos, la reacción del aluminato tricálcico con el agua es inmediata y libera mucho calor, el yeso se usa para retrasar la velocidad de esta reacción produciendo iones de sulfato. El balance entre el aluminato y sulfato determina la velocidad de fraguado, el silicato tricálcico se hidrata más rápido que el silicato dicálcico, contribuyendo al tiempo de fraguado final y la ganancia de resistencia inicial [10]. Existen principalmente cinco tipos de Cemento Portland, cada uno con distintos comportamientos, según el ataque externo al que se ha previsto someter [11]:

PRINCIPALES TIPOS DE CEMENTO PORTLAND		
TIPO	Nombre	Características
I, IA	Normal	Cualquiera de los no considerados en otros tipos
II, IIA	Resistencia moderada a los sulfatos	C3A<8%, SiO2>20%, Al2O3<6% Fe2O3<6%
III, IIIA	Alta resistencia Inicial	Finura Blaine > 450 m2/Kg Resistencia>19Mpa (1d); >30Mpa (3d)
IV	Bajo calor de Hidratación	Bajo contenido de C3A Bajo contenido de C3S
V	Alta resistencia a los sulfatos	C3A<5%, SO3<2,3% Si es tipo LA: % Álcalis < 0,6%

Tabla 2. Principales tipos de cemento Portland y sus características [11]

Los cementos con la denominación A corresponden a cementos con inclusión de un aditivo que incorpora aire en ellos. El cemento Portland tipo I es el más utilizado en el mercado para obras civiles en general.

2.2 CONCEPTO DE DURABILIDAD

Las estructuras de concreto se han diseñado, a través de la historia, en base a su resistencia a la compresión. La premisa indicaba que si el concreto era suficientemente resistente como para soportar las cargas diseñadas, también tendría un comportamiento favorable en todos los demás aspectos. Cuando se identificaban determinados mecanismos de destrucción, por ejemplos: el ataque hielo-deshielo, ataque por sulfatos, reacción álcali-agregado, corrosión por cloruros, etcétera, se tenían en cuenta a través de limitaciones en la composición química del cemento o en la relación agua/cemento. [12]

El término *durabilidad* se refiere a la habilidad del concreto para resistir la acción del medio ambiente, los ataques químicos, la abrasión y otras condiciones de servicio de tal manera que sus características y propiedades se mantengan a lo largo de su vida útil. [13].

El concreto tiene la tendencia de ser durable por sí mismo, sin embargo, muchas estructuras modernas de concreto no duran tanto, como lo pone en evidencia la continua necesidad de reparar y rehabilitar infraestructuras de concreto. Desde luego, esto tiene que ver con las exigencias, mucho más severas, que se fijan a los concretos modernos, los entornos especiales en los que se espera que el material cumpla sus funciones, y la complejidad creciente de los sistemas cementantes en sí mismos [12]. Por otra parte, mucho de esto se debe a una selección inapropiada de materiales, a prácticas constructivas pobres, a falta de entendimiento por parte de los ingenieros que construyen en ambientes potencialmente destructivos y una creciente tendencia a “hacer recortes”, con el fin de ahorrar algún dinero.

2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

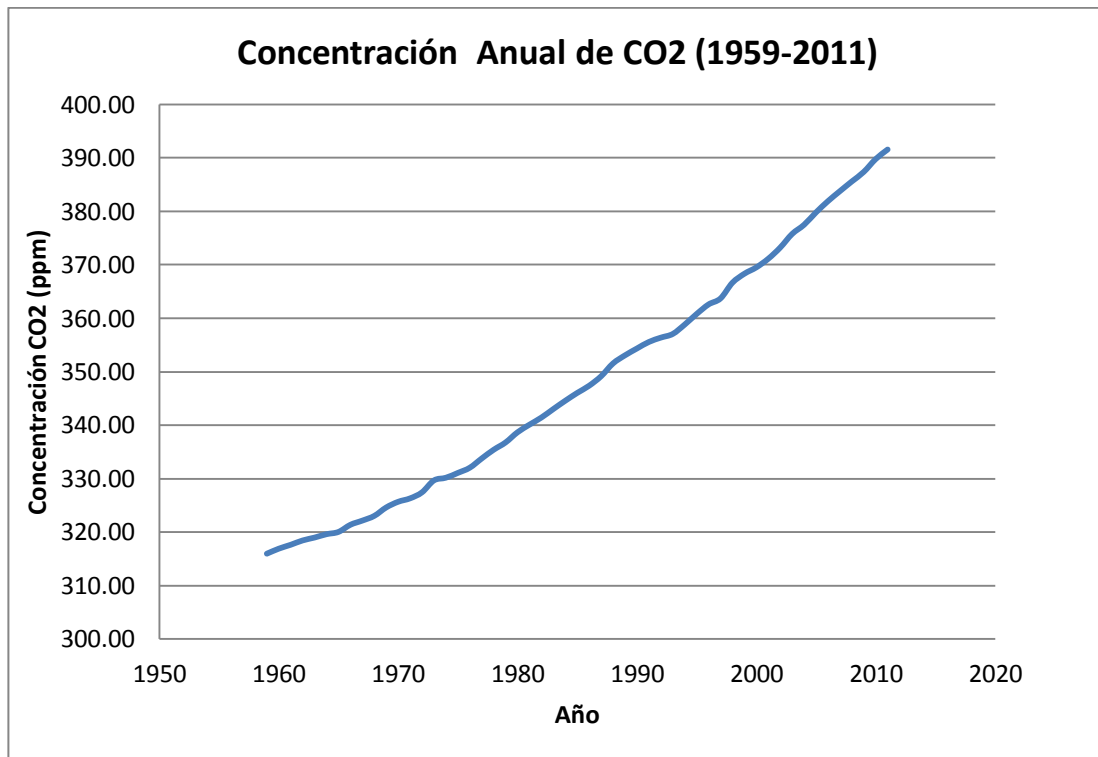
2.3.1 Carbonatación

2.3.1.1 Concentración de CO₂ en la atmósfera

El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono (IV), gas carbónico y anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Se encarga de permitir que la Tierra tenga una temperatura tolerable para la biomasa, es decir, sin él, el planeta sería demasiado frío para albergar vida. Sin embargo, forma parte de los denominados gases de efecto invernadero, a los cuales se atribuye en gran parte, el agudizado calentamiento global y los desórdenes climáticos a nivel mundial.

La situación actual del planeta, en cuanto a su contaminación es cada vez más delicada. Por más que se adelantan campañas ambientales en contra de la emisión de gases tóxicos por parte de las diferentes industrias, ésta, en lugar de descender, asciende de manera acelerada con tendencia exponencial a través del tiempo (Ver Gráfica 1).

El valor registrado para la emisión mundial de dióxido de carbono a diciembre de 2011 muestra una concentración de 391.80 ppm [14], una cifra alarmante, si se tienen en cuenta las caóticas consecuencias que el efecto invernadero podría causar en un futuro cercano [15], si se continúa con esta tendencia.



Gráfica 1. Concentración anual de dióxido de carbono desde 1959 hasta 2011.
Fuente: NOAA – ESRL. Observatorio mundial de Mauna Loa, Hawaii. [14]

2.3.1.2 Carbonatación del concreto

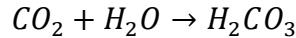
No sólo los seres vivos se ven afectados por los altos niveles de CO₂ atmosférico. Las estructuras de concreto también llegan a sufrir efectos negativos en presencia del gas con el paso del tiempo. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el CO₂ atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo. La corrosión uniforme, inducida por carbonatación, acelera la formación de grietas si las condiciones adecuadas de temperatura y humedad están presentes. [16]

La profundidad de carbonatación es controlada por el ingreso del CO₂ en el sistema de poros del hormigón, por la difusión debido a un gradiente de concentración que actúa como la fuerza impulsora. El tipo de cemento, su cantidad en el hormigón y la relación A/C son factores que pueden afectar el índice de difusión del CO₂. [17]

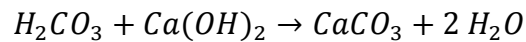
Los niveles mayores de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera despreciable. Si la humedad relativa es mayor de 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO₂. [18].

Las reacciones que se presentan en la carbonatación son las siguientes [19]:

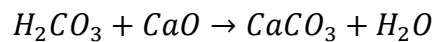
- a) Formación de ácido carbónico



- b) Neutralización del hidróxido de calcio



- c) Liberación del óxido de calcio



Mecanismo de difusión del CO₂ en el concreto:

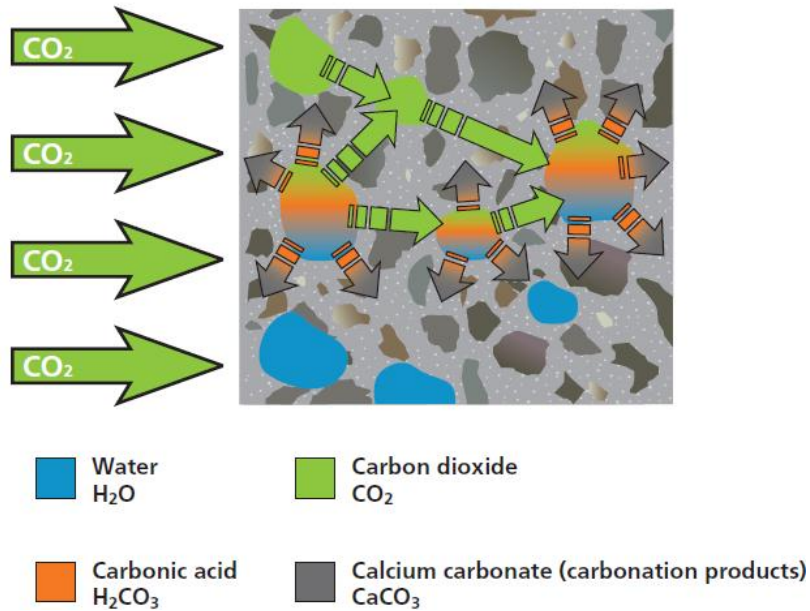


Figura 1. Difusión del dióxido de carbono en el concreto. [20].

El modelo matemático del proceso de carbonatación se describe en el numeral 2.6, como base de la descripción del ensayo acelerado de carbonatación.

2.3.2 Reacción Álcali-Agregado

La reacción álcali-agregado se produce cuando interactúan agregados que contienen minerales silicatados potencialmente reactivos, con los álcalis del cemento. Esta reactividad lleva consigo la formación de geles que en presencia de humedad se expanden, manifestándose en agrietamientos y/o movimientos diferenciales, y con ello, una disminución drástica de la durabilidad. [21]

La expansión provocada por esta reacción ha sido encontrada mayormente en las zonas húmedas del hormigón, siendo las estructuras más deterioradas aquellas que están en contacto con el agua como puentes, carreteras, presas y muelles.

[22] El proceso viene determinado en gran medida con la humedad relativa del ambiente y la tensión mecánica a la cual está sometido cada elemento estructural.

Fases de la reacción:

- 1) Neutralización de los radicales Si-OH a través de una reacción tipo ácido-base: Aquí las cargas terminales son equilibradas por iones Na^+ , teniendo en cuenta que el acceso de los OH^- y el Na^+ está limitado por la dimensión de estas zonas y por lo separadas que se encuentren de la superficie de la partícula.
- 2) Ataque de los puentes siloxano (Si-O-Si) por parte de los iones OH^- : Reacción que lleva implícita una progresiva desintegración de la estructura química del concreto.

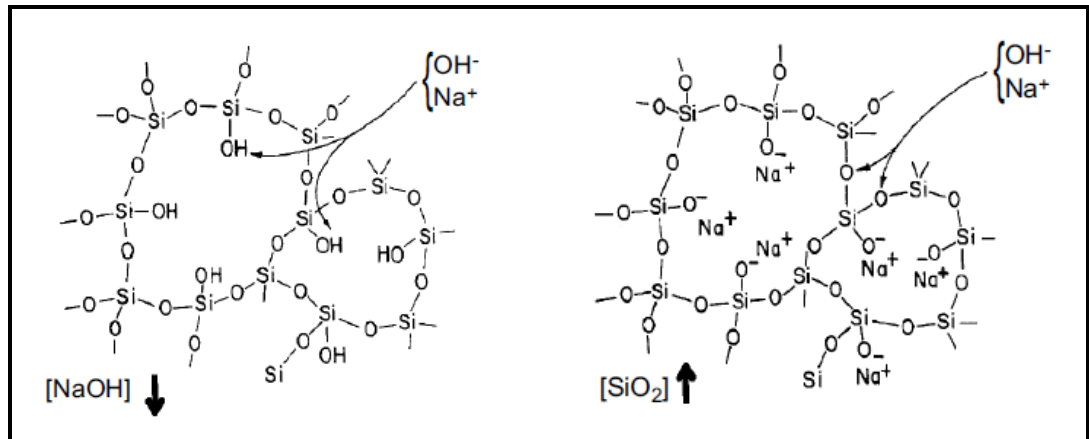


Figura 2. Fases de la reacción álcali-agregado. Fuente: [21].

2.3.3 Ataque por sulfatos

En el ambiente, a menudo se encuentran diversidad de sulfatos (de sodio, potasio, calcio o magnesio), que se presentan naturalmente en el suelo o disueltos en el agua que corre por el suelo. El sulfato puede estar presente en los efluentes y desechos industriales tales como los de las industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio y en la minería. El agua empleada en las torres de enfriamiento también puede contener sulfatos debido a la acumulación gradual de sulfatos provenientes de la evaporación. [23]

El ataque por sulfatos se da generalmente a través de medios acuosos. Si el sulfato no está disuelto en agua, es muy difícil que haya una penetración considerable en los poros de concreto [24], así mismo, existe una gran influencia en la relación agua/cemento.

Generalmente, se menciona que el ataque por sulfatación es un ataque físico, referido a la cristalización de sales, sin embargo, esta afirmación no se considerará correcta, pues este proceso, similar a la formación de compuestos expansivos como la etringita se basa en una reacción química, aunque sí puede conllevar a daños físicos de la estructura del concreto.

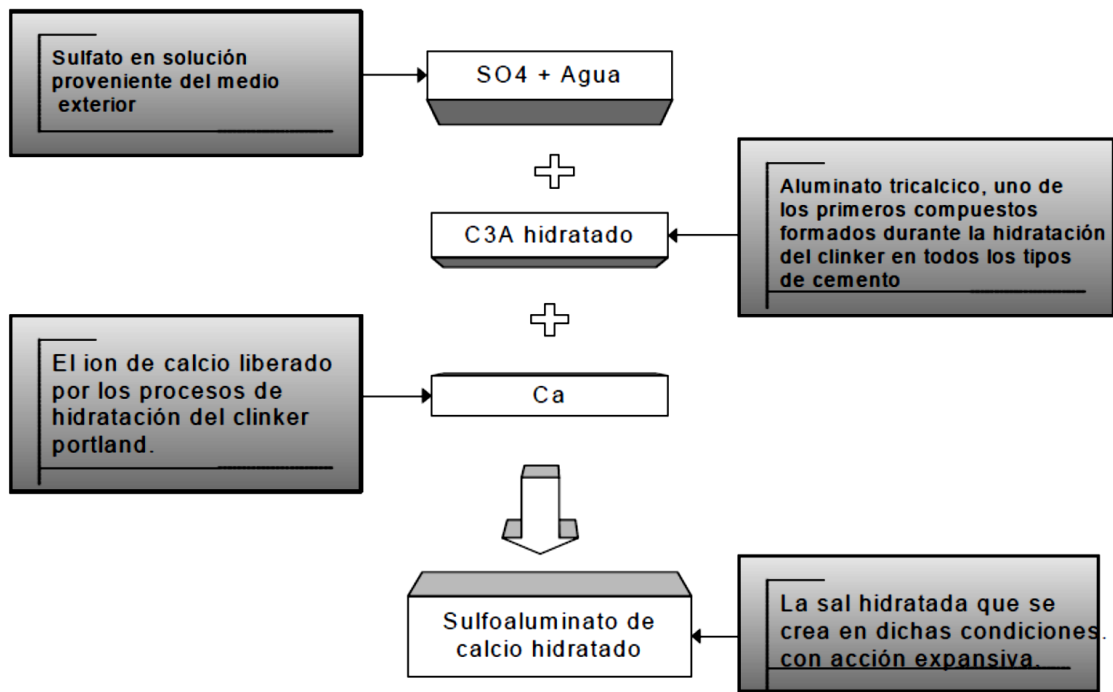


Figura 3. Esquema del ataque por sulfatos al concreto. Fuente: [24].

Los ataques acelerados de sulfatos se dan a través de ciclos de humedecimiento y secado, es decir, en zonas donde hay presencia de agua con sulfatos de manera intermitente, el ataque es mucho mayor. Además, existe una relación considerable entre la cantidad de hidróxido de calcio presente en la hidratación del concreto, y la susceptibilidad a la acción de los sulfatos. En el agua de mar, además de sulfatos, existe la presencia de otros iones como el cloruro, por lo que el ataque se acelera aún más.

2.4 LA ESCORIA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

2.4.1 Clasificación de las escorias

Escoria es el nombre que se da al material fundido formado por las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del metal.

Las escorias pueden resultar de diversos procesos metalúrgicos como la producción de hierro, acero, níquel, manganeso, cromo, cobre etc. Los diversos tipos de escorias tienen funciones metalúrgicas semejantes pero varían extensamente en sus propiedades físicas y químicas. Las escorias más utilizadas en el campo de la construcción son las de la fabricación del hierro y del acero. [25]. Existen dos tipos de clasificación de las escorias (ver figura 4):

- Según su procedencia (Tipo de horno y materia prima)
- Según el tipo de enfriamiento

El hierro es el metal duro más usado, con el 95% de la producción de metal en el mundo y su aplicación más importante es la elaboración de matrices para formar productos de otros compuestos siderúrgicos. Los dos tipos de horno más utilizados para la fabricación de hierro son el alto horno y el horno de cubilote, siendo más estudiada la escoria de alto horno, y en menor medida la escoria de horno de cubilote o cúpula.

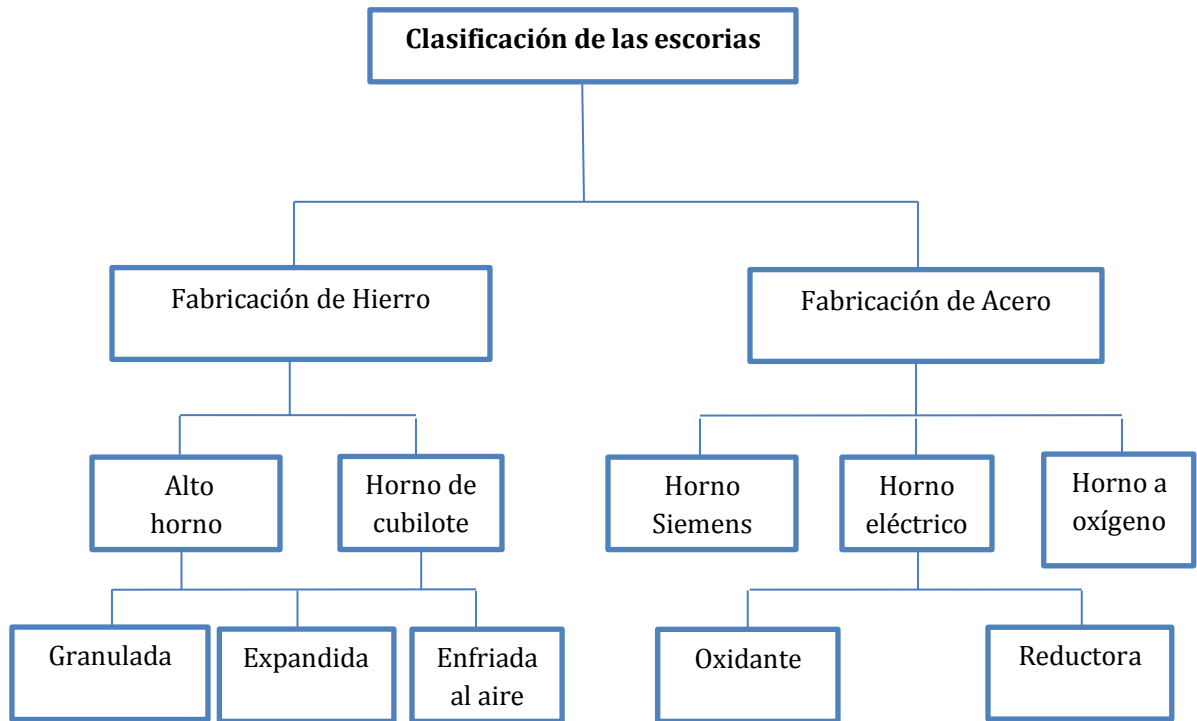


Figura 4. Clasificación simplificada de las escorias más utilizadas en la construcción. Fuente: [25].

2.4.2 Diferentes aplicaciones de la escoria como material de construcción

El uso de escoria como material de construcción se hace cada vez más frecuente, motivado por la reducción de la contaminación a través de la adecuada gestión de residuos industriales. Los principales usos que se le dan a las escorias como material de construcción son:

Escoria como reemplazo del cemento Se utiliza generalmente la escoria molida de alto horno EAH. El reemplazo de cemento Portland por EAH, debe estar precedido por un proceso de activación, el cual permite incrementar la velocidad de reacción de la escoria con el agua, facilitando el rompimiento de la estructura vítrea de la escoria y precipitando los productos cementosos. Este proceso se

realiza por medio de un agente alcalino que puede ser cualquiera de los siguientes: NaOH, Na₂SiO₃, Ca(OH)₂, Na₂CO₃, Na₂SO₄ o una mezcla de ellos [26]. Económicamente, la fabricación de cementos de escorias activadas alcalinamente presentan, frente al proceso de clinkerización del cemento portland, una reducción de hasta un 80% en los costos de producción [27].

Escoria como agregado grueso Las escorias de horno eléctrico, se pueden clasificar según el proceso metalúrgico del que provienen, si es fusión se producen escorias oxidantes o negras, y si es afino se producen escorias reductoras o blancas (ver figura 4). Las escorias negras han sido ensayadas, respecto a la resistencia a la compresión con mayor éxito que las escorias blancas, además de ser menos expansivas por lo que se recomienda su uso como agregado grueso, según [28].

Otro tipo de escoria que puede ser utilizada como agregado grueso es la escoria de cobre, sin embargo, la alta densidad es un factor que se debe tener en cuenta [29]. La EAH enfriada al aire y la escoria de horno a oxígeno enfriada instantáneamente también puede ser utilizada como agregado grueso [22].

Escoria como agregado fino La escoria blanca de horno eléctrico, la EAH granulada o expandida, la escoria de horno a oxígeno son algunas de las escorias que, después de ser trituradas a la granulometría apropiada, pueden ser utilizadas como sustitutos de la arena. De hecho, un estudio realizado en la India por el científico Binod Kumar [30] indica que el porcentaje del 80% de sustitución de arena por escoria de alto horno es la sustitución más adecuada para resistir esfuerzos a la compresión. Se estudiará la posibilidad de que la escoria de horno de cubilote pueda ser utilizada como agregado fino, con diversos porcentajes de sustitución de arena.

Escoria para la fabricación de ladrillos La norma técnica colombiana NTC 922 (Ladrillos sílico calcáreos) se ha basado en diversos estudios que plantean la posibilidad de un uso de la escoria para la fabricación de elementos de mampostería. Se ha podido establecer que ladrillos fabricados a partir de EAH de Acerías Paz del Río han entregado resultados satisfactorios en cuanto a la resistencia a la compresión, por lo que se ha propuesto su uso como elementos de mampostería estructural [31].

La diversidad de usos de escoria EAH está sujeta al control de calidad que la norma técnica colombiana especifica en la NTC 4018. Sin embargo esta norma se limita únicamente a las escorias que han sido enfriadas por medio de un proceso rápido de inmersión en agua [32].

2.4.3 Escorias y otras adiciones que favorecen la durabilidad

Los aditivos del concreto son productos capaces de integrarse física y/o químicamente en la mezcla de concreto con propósitos que van desde el aumento de la resistencia a la compresión, hasta el aumento de la durabilidad de las estructuras. Hasta el momento se han encontrado los principales avances hacia la durabilidad por medio de adiciones al cemento.

Alrededor del mundo se han realizado diversas investigaciones para prevenir ataques de naturaleza química como el ataque por sulfatos, la carbonatación, el ataque por ion cloruro en agua de mar, la reacción álcali-agregado, la corrosión del acero de refuerzo, ataque por hielo-deshielo, etcétera. Como alternativas de solución han aparecido diversos tipos de adiciones al cemento:



Figura 5. Algunas sustancias aprovechadas como adiciones de cemento. Fuente: [33].

En España, por ejemplo, se han analizado escorias EAH activadas alcalinamente [34], con resultados que favorecen la durabilidad en cuanto a los siguientes aspectos:

- Menor calor de hidratación del cemento.
- Mejor impermeabilidad.
- Mejor comportamiento frente a la carbonatación.
- Mayor resistencia al hielo-deshielo.
- Mayor resistencia a altas temperaturas.
- Mayor resistencia al ataque químico.
- Mayor resistencia de la interfaz agregado-matriz.
- Mayor protección de las armaduras metálicas.
- Resistencia bacteriológica y biocida.

En cuanto a la resistencia a la carbonatación, sulfatación y al ion cloruro presente en el agua de mar se destacan los cementos con alto contenido de metacaolín y humo de sílice [35], [36], teniendo en cuenta la búsqueda del porcentaje de sustitución más adecuado, según el medio al que se va a exponer.

Cabe destacar las conclusiones a las que llegó Scott [37], en su esfuerzo por disminuir la reacción álcali-agregado. Verificó que únicamente el cemento de bajo contenido en álcalis, 55% de escorias de alto-horno, 25% de cenizas volantes o 100% de nitro de litio, fueron efectivos en la mitigación de la reacción expansiva.

2.5 LA ESCORIA DE HORNO DE CUBILOTE

El horno de cubilote, también llamado cúpula, es un horno utilizado para la fundición de chatarra de acero, productos de hierro fundido y aleaciones de hierro. Su principal fuente de energía es el carbón de coque y puede producir alrededor de 100 Toneladas de hierro fundido por hora [38].

Es uno de los más antiguos métodos de producción de hierro fundido, y sigue siendo uno de los más utilizados. Comenzando el siglo, en 2001, el 66% del hierro a nivel mundial se producía en hornos de cubilote, y se ha mantenido durante los últimos años gracias a la modernización de los hornos [39]. Este horno posee ciertas ventajas únicas como los bajos costos en la inversión inicial, comparados con otros equipos de fusión como el horno de inducción. Los costos de operación también son bajos, aunque su mayor desventaja es la dificultad para controlar las condiciones de operación. En un horno de cubilote, la evacuación de escoria es automática y requiere poca atención y ningún esfuerzo. En el horno de inducción, por el contrario, debe ser extraída y es un trabajo que consume tiempo y puede resultar costoso a largo plazo.



Figura 6. Apariencia de la escoria de horno de cubilote. Fuente: [El autor].

Los componentes básicos de la escoria de horno de cubilote EHC son: CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂ y los minoritarios FeO, MnO, TiO₂ y S. Aunque estos compuestos se pueden tomar como referencia, no se puede asumir que toda escoria posee estos componentes, pues las escorias pueden resultar básicas o ácidas. El índice de basicidad es $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2$ para las ácidas y $[\text{CaO} + \text{MgO}] / [\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3]$ para las básicas [40]. Se hará un análisis de los componentes de la escoria a utilizar en la investigación, por medio del método EDX (Energía dispersiva de espectroscopia de rayos X).

Un método rápido para analizar la viabilidad de la escoria es por su color. Una escoria sólida, vítrea y de color verde indica una buena fusión. Si es amarillenta quiere decir hay demasiado manganeso, se forma lana de vidrio y se funde muy caliente, pero hay riesgos de oxidación. Un color marrón oscuro tendiendo a negro indica un exceso de FeO, mientras que si es espumoso y negruzco hay oxidación. También se puede concluir la desulfuración o separación de azufre por el color [40]. Una escoria gris y fluida desulfurará bien, pero si es blanca y pulverulenta será desulfurante pero poco fluida, mientras que si es negra y vítrea no desulfurará.

2.6 ENSAYOS DE DURABILIDAD

Algunos autores [12], [41] han hecho observaciones acerca de la manera como la mayoría de las normas internacionales, al emitir especificaciones para ensayos, evalúan la durabilidad de las estructuras de manera insuficiente. Existen diferentes métodos para la evaluación, y van desde los métodos destructivos tradicionales y la observación microscópica, hasta los métodos más avanzados como la difracción de rayos x o la velocidad de pulso ultrasónico.

Lo cuestionable de los ensayos no tiene que ver con que arrojen resultados erróneos o planteen condiciones imposibles en el medio para realizarlos. Lo que es realmente preocupante es que todos los métodos evalúan las propiedades del concreto en un único momento, y es imposible determinar con certeza el comportamiento de la estructura en servicio. Muy pocas fórmulas buscan hallar el tiempo de vida de una estructura, y no se sabe si en el futuro el concreto podría ser adecuadamente reparado. La solución no consistiría en un monitoreo constante, desde el momento en que es fabricado el concreto y que continúe durante toda la vida de la estructura, pues esto conllevaría un importante sobre costo teniendo en cuenta, además, que todas las estructuras se comportan diferente en servicio. Al parecer, un avance significativo sería proponer ensayos que consideren la totalidad de los ataques que podría sufrir una estructura, complementándose con modelos matemáticos que realmente alcancen a simular los procesos de deterioro [2].

Mientras se plantean soluciones acerca de la manera correcta de evaluar la durabilidad, es preciso comenzar a tratar de representar el comportamiento de la estructura por medio de ensayos que planteen las condiciones en servicio y que tomen el factor tiempo como referencia indispensable para alcanzar resultados óptimos. A continuación se describen cada uno de los ensayos, tanto destructivos como no destructivos, que se realizaron al concreto de escoria de horno de

cubilote para contribuir a determinar su durabilidad; sin embargo en el diseño metodológico se realizará una descripción más detallada.

2.6.1 Ensayo acelerado de ataque por sulfatos

Los métodos ASTM C-1012 y ASTM C-452 (corresponde a INV 329 e ICONTEC 397), basados en la inmersión de mortero en solución de sulfato de sodio anhidro, evalúan el cambio de longitud del mortero expuesto. Como se ha mencionado anteriormente, se pretende optimizar la evaluación de los daños que puede sufrir una estructura en estado de servicio. Por esta razón, se decidió tomar como referencia estos métodos para adaptarlos a concretos que se encuentren en condiciones extremas del ataque por sulfatos. En consecuencia, el ensayo modificado plantea la inmersión de probetas de concreto en solución acuosa de sulfato de sodio anhidro intermitentemente, tal como lo propone el ensayo Duggan [22], [42].

Se propone un ensayo acelerado a 14 días con ciclos de humedecimiento y secado a una concentración mayor que las condiciones de servicio. Durante todo el ensayo se debe medir la variación de la masa, realizar una inspección visual y al final evaluar la resistencia a la compresión de la probeta.

2.6.2 Ensayo de aceleración de la reacción álcali-agregado

El método sudafricano de reactividad potencial (ASTM C1260) es ampliamente utilizado para medir la reactividad de los agregados por causa de los álcalis presentes en la mezcla. Sin embargo, por tratarse de barras de mortero no considera las alteraciones que puede presentar el comportamiento del concreto a partir de las características del agregado grueso [43]. Autores como Gress y Kozikowski [44] proponen modificaciones al ensayo, en el concreto, empleo de temperatura más elevada y diferentes condiciones de humedad con las probetas sellados en vacuo en un plástico con agua. Otros como Scott [37] recomiendan la

utilización del ensayo ASTM C 1260 con alteraciones que consistieron en la sustitución de la barra de mortero por prismas de hormigón utilizados en el ensayo ASTM C 1293, pero utilizando las condiciones del ensayo ASTM C 1260, puesto que las condiciones de la ASTM C 1293 son no aceleradas y se limita a una relación a/c entre 0.42 y 0.45. Teniendo en cuenta las dos normas, la presente investigación propone un ensayo modificado, que consiste en sumergir las probetas durante 16 días en una solución acuosa de soda cáustica (NaOH, 1N) a una temperatura elevada (80°) para garantizar la aceleración de la reacción. Previamente se deben sumergir las probetas en agua a 80°C, 12h con el fin de que no haya diferencia de temperatura al momento de sumergirlas en la solución. Evaluar periódicamente la variación de la masa, y al finalizar los 16 días, realizar un ensayo complementario de resistencia a la compresión. Además, tener en cuenta los cambios observados en las probetas mediante la inspección visual.

2.6.3 Ensayo de carbonatación acelerada

La velocidad de carbonatación puede ser modelada mediante una simplificación de la ley de la raíz cuadrada de tiempo, con base en la Ley de Fick [45]:

$$X = K\sqrt{t} \quad (1)$$

Donde: X es el espesor de la capa carbonatada, t es el tiempo de exposición (o la edad de la estructura) y K es el coeficiente de carbonatación, también conocido como velocidad de carbonatación, que se define:

$$K = \left[\frac{2DC_s}{M} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Donde D es el coeficiente de difusión efectiva del CO₂, C_s es la concentración de CO₂ sobre la superficie externa del concreto (en moles por unidad de volumen de

aire), y M es el número de moles de CO₂ necesarios para carbonatar un volumen unitario de concreto.

Cuando un elemento es sometido primero a un ambiente de una concentración C_{s1}, y luego esta concentración cambia a C_{s2}, la ecuación (1) predice:

$$(Xc_2^2 - Xc_1^2) = K^2(t_2 - t_1) \quad (3)$$

El ensayo acelerado de carbonatación mediante cámara saturada de CO₂ es ampliamente utilizado para determinar el coeficiente de carbonatación en concretos [16], [46]-[48]. Consiste en someter probetas a ambientes con altas concentraciones de CO₂ y con condiciones de humedad relativa donde se presente carbonatación (50% - 75%) [18] con el fin de determinar coeficientes de carbonatación, por medio de la profundidad de carbonatación, teniendo en cuenta el tiempo de exposición. La profundidad de carbonatación será medida de acuerdo al criterio de la RILEM – 88 [49], utilizando un indicador de basicidad como la fenolftaleína al 1% en solución etílica. Se mide la distancia que ha penetrado el CO₂ en el concreto desde el borde hacia el centro, donde no se presente cambio de color, puesto que el CO₂ es un compuesto ácido que no reacciona a la fenolftaleína. Si se presenta un color fucsia, quiere decir que en esa zona no penetró el CO₂ y que el concreto permanece con su pH básico.

El modelo matemático del proceso de carbonatación, con base en (1) y (3) deriva en una correlación, demostrada en [47], entre dos concentraciones diferentes de CO₂ y sus respectivos tiempos de exposición:

$$T_1 = T_2 \frac{C_{s2}}{C_{s1}} \quad (4)$$

Donde T_1 es el tiempo de exposición al que se ha sometido el concreto con una concentración Cs_1 y T_2 es el tiempo de exposición al que se ha sometido el concreto con una concentración Cs_2 .

2.6.4 Ensayos complementarios

Como se ha mencionado, para los ensayos de ataque por sulfatos y reacción álcali-agregado (RAA) se utiliza como complemento el ensayo de resistencia a la compresión, basado en las normas NTC 673, INV 410 y ASTM C 39.

El ensayo a tracción indirecta (NTC 722 - ASTM C 496) se utiliza como ensayo complementario para la evaluación de carbonatación acelerada, pues el sentido longitudinal de la falla, permite evaluar la profundidad de carbonatación alrededor del núcleo de concreto. Además, se tomará la resistencia a tracción indirecta como punto de comparación entre los diferentes porcentajes de sustitución de arena por escoria de horno de cubilote EHC.

La variación de la masa es una importante medida de comparación del comportamiento de los diferentes tipos de concreto, sobre todo en los ensayos de sulfatación y RAA, pues en ellos las probetas se sumergen en cámaras húmedas. Sin embargo, también en el ensayo de carbonatación se toman medidas de variación de la masa como complemento. Las diferentes variaciones de masa entre muestras pueden describir las diferencias de porosidad, expansión, deterioro por pérdida de concreto u otras. Es fundamental encontrar la causa por medio de otro ensayo complementario como lo es la inspección visual.

Como ensayo complementario, cabe destacar el análisis químico que se realizó a la escoria EHC, previo a su trituración. La técnica utilizada fue la de análisis de Energía Dispersiva espectroscópica de rayos X (EDX). Esta es una técnica

utilizada para la caracterización química de una muestra, por medio de la investigación de la interacción de alguna fuente de rayos X de excitación y de una muestra. (Ver 3.1.4)

2.7 AISLAMIENTO ACÚSTICO DEL CONCRETO

Las propiedades acústicas del concreto modificado con EHC son el segundo eje de estudio de esta investigación. Para familiarizar al lector con el tema, se definen los siguientes conceptos [3]:

Sonido: Todo fenómeno que denote una alteración física, o de presión, capaz de ser registrada por un oído normal.

Frecuencia: Número de ciclos realizados dentro de una onda sonora. Debido a que las partículas de aire siguen el mismo movimiento que el cuerpo vibratorio, tendrán las mismas frecuencias que él. Por ejemplo, si una fuente de vibración vibra 100 veces por cada segundo, la frecuencia del sonido será 100 ciclos por segundo (Hz).

Amplitud: Es una medida de la variación máxima de la presión (para onda acústica) que varía periódica o cuasi-periódicamente en el tiempo. Es la distancia máxima entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

Absorción del sonido: Habilidad que tiene un material para absorber la energía de las ondas sonoras que llegan a su superficie, en tal forma que la energía reflejada sea la menor posible.

2.7.1 Coeficiente de absorción del sonido e índice de reducción de ruido

La energía acústica total que choca contra una pared, una parte se refleja, otra parte, es absorbida en la propia pared y la otra parte, transmitida al espacio detrás de la pared [50]. Así, los fragmentos de energía se pueden representar mediante:

El coeficiente de reflexión de energía $|r|^2$

El coeficiente de absorción α

El coeficiente de transmisión de energía $|t|^2$ y, aplicando la ley de la conservación de energía se tiene:

$$|r|^2 + \alpha + |t|^2 = 1 \quad (5)$$

Si una onda plana con movimiento armónico choca contra una superficie, en dirección perpendicular, será reflejada con una intensidad disminuida debido a la absorción del material. Si la presión de la onda de sonido incidente y reflejada se denominan P_i y P_r respectivamente, y el coeficiente de reflexión r a un punto, es definido como:

$$r = \frac{P_r}{P_i} \quad (6)$$

Si la fracción de energía que traspasa la muestra es muy pequeña comparada con la absorbida, se desprecia, y el coeficiente de transmisión es cero, por lo que el coeficiente de absorción se convierte en:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (7)$$

El índice de absorción del sonido es el valor que indica qué tanto sonido absorbe determinado material. Se define como el valor medio de los coeficientes de absorción del material a las frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz. Aunque también puede ser calculado mediante la obtención de datos de bandas de tercio de octava entre estas frecuencias, tales como 630, 800 1000, 1250 y 1600 Hz.

$$NRC = \frac{\sum \alpha}{n} \quad (8)$$

2.7.2 Fundamento físico del tubo de impedancia

El tubo de impedancia tiene distintas aplicaciones, entre las más importantes, comprobar la velocidad del sonido y medir las propiedades acústicas de los materiales. Por medio de muestras ubicadas a un extremo del tubo cerrado es posible determinar el coeficiente de absorción. Este es un método sencillo y tiene una precisión admisible (95% [51]). El tubo está provisto de un parlante que se encuentra en el extremo opuesto a la muestra, el cual produce ondas acústicas, las cuales viajan dentro del tubo y son reflejadas por el material. La onda incidente y la onda reflejada se presentan por medio de la formación de un patrón de ondas estacionarias dentro del tubo. Cuando la totalidad de la onda incidente es reflejada, la onda incidente y la onda reflejada tienen la misma amplitud; los nodos en el tubo tienen presión cero y los antinodos el doble de presión.

Cuando una parte de la energía incidente es absorbida por la muestra, la onda incidente y la onda reflejada tienen diferente amplitud. En este caso los nodos no son muy largos y cuentan con una presión nula. La magnitud de la presión en los nodos y antinodos es medida con un micrófono de prueba, el cual se desliza dentro del tubo. La relación entre la presión máxima (antinodo) y la presión mínima

(nodo) es llamada Standing Wave Ratio (SWR), esta relación es mayor o igual a uno y se usa para determinar el coeficiente de amplitud reflejada $|r|^2$ de la muestra y el coeficiente de absorción del material α .

La amplitud en un antinodo de presión (máxima presión) es:

$$P_{\text{máx}} = (A + B)\cos(\omega t) \quad (9)$$

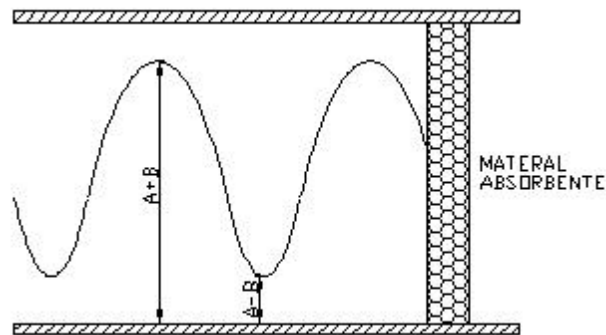


Figura 7. Representación de la máxima y mínima amplitud en un tubo de impedancia. [50]

La amplitud en un antinodo de presión (mínima presión) es:

$$P_{\text{mín}} = (A - B)\cos(\omega t) \quad (10)$$

No es posible medir A o B directamente pero se puede medir (A+B) y (A-B), los cuales son valores de amplitud medida en unidades de voltaje. La medición se logra al resonar la onda en el tubo, formándose de esta manera ondas estacionarias. Se puede definir la relación de presión máxima a presión mínima como SWR (standing wave ratio), mediante la siguiente ecuación:

$$SWR = \frac{P_{\text{máx}}}{P_{\text{mín}}} \quad (11), \quad \text{así que:} \quad SWR = \frac{A+B}{A-B} \quad (12)$$

La ecuación de conservación de la energía, puede ser manipulada para determinar el coeficiente de reflexión del sonido:

$$|r| = \frac{B}{A} = \frac{SWR-1}{SWR+1} \quad (13)$$

Como se ha definido previamente en la ecuación 7, la energía absorbida es proporcional al cuadrado de las relaciones de amplitud de las ondas:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (7)$$

3. DISEÑO METODOLÓGICO

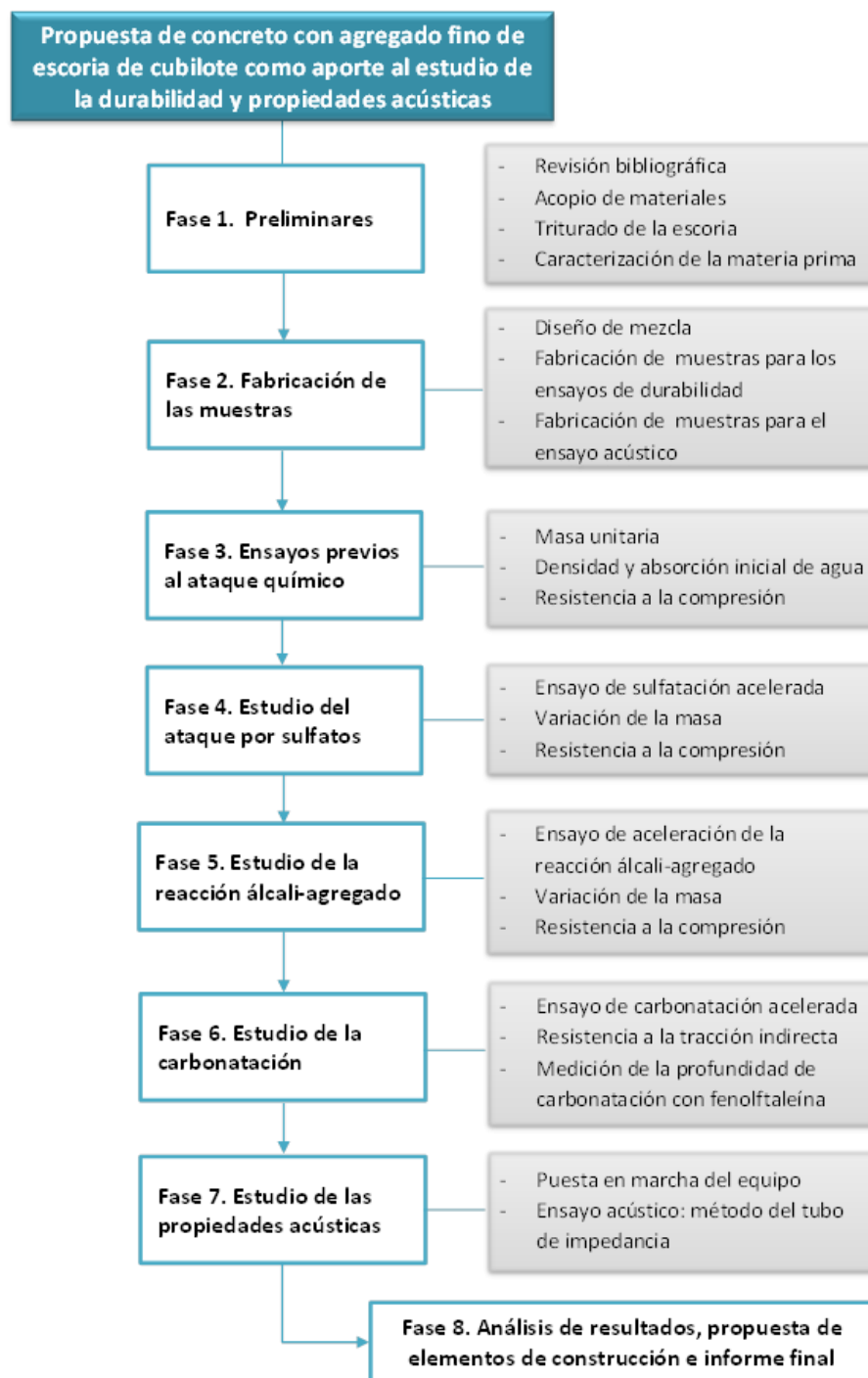


Figura 8. Diagrama de la metodología de la investigación. Fuente: [Autor]

A continuación se presenta una descripción detallada de cada una de las fases que forman parte de la investigación.

3.1 FASE 1: PRELIMINARES

3.1.1 Revisión bibliográfica

Consistió en recopilar la información requerida para abordar los temas de durabilidad y propiedades acústicas del concreto. La consulta teórica de los temas a tratar y la revisión de investigaciones que se han realizado hasta el momento fue una constante a lo largo de todo el período de investigación. La consulta de la normatividad existente referida a los ensayos para evaluar la sulfatación, RAA, carbonatación y propiedades acústicas en el concreto, así como las modificaciones de los mismos, propuestas por distintos autores, también fue prioridad.

El primer tema que se consultó fue el de generalidades del concreto, haciendo énfasis en: sus estados, el método de dosificación ACI, el cemento Portland, sus componentes químicos y sus diferentes tipos; seguidamente, se estudió el concepto de durabilidad del concreto y los factores que la afectan, realizando descripción detallada de cada uno de los ataques.

Al incluirse un nuevo componente del concreto, además de los tradicionales, se debía consultar su proveniencia, clasificación y utilidad. Por esta razón se indagó, no sólo acerca de la escoria de horno de cubilote (EHC), sino de los distintos tipos de escoria que en la actualidad sirven como material de construcción, y las formas en que lo hacen.

Los fundamentos físicos sobre los cuales se basa el estudio de las propiedades acústicas de los materiales, específicamente por medio del tubo de Kundt o tubo de impedancia, fueron analizados a profundidad, así como las condiciones del ensayo.

Por último se realizó la capacitación de uso de los equipos utilizados en las pruebas de carbonatación y tubo de impedancia, gracias a la información descrita por investigaciones previas, manuales y normas; y a la colaboración de personas con mayor experiencia en el manejo de estos equipos.

3.1.2 Acopio de materiales

La escoria de horno de cubilote que ha sido utilizada como agregado fino para modificar el concreto normal, ha sido traída de Industrias Lavco Ltda., la cual es una empresa manufacturera ubicada en la ciudad de Bucaramanga que pertenece al sector metalmeccánico dedicada a la producción y comercialización de camisas y pistones en fundición de hierro gris por medio de hornos de cubilote o cúpula. La escoria (sin triturar) se ha traído para su almacenamiento al edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander.

El agregado (tanto fino como grueso) usado para la fabricación de las probetas se ha traído del río Chicamocha. El cemento a utilizar en la mezcla es Portland Tipo I, existente en el mercado, seleccionado para presentar una buena resistencia final, registrar tiempos de fraguado adecuados, permitiendo una buena manejabilidad, adherencia y comportamiento estable.

3.1.3 Triturado de la escoria

El proceso de triturado de la EHC se realizó en la máquina de los ángeles, la cual generalmente se utiliza para ensayos de desgaste de agregados. El tiempo de trituración fue de 15 minutos. Si este tiempo varía, se afecta la granulometría de la escoria como agregado fino. Los 15 minutos se determinaron realizando pruebas con diferentes tiempos de trituración para generar una granulometría deseable. Posteriormente, se tomaron varias muestras de escoria trituradas a 15 minutos arrojando una granulometría homogénea.

3.1.4 Caracterización de la materia prima

Cemento La caracterización del cemento está dada por las exigencias en cuanto a propiedades físico-mecánicas de la norma NTC 121 y en cuanto a propiedades químicas de la norma NTC 321, además de un análisis de densidad (Anexo A).

Agua Se garantizó, para el diseño de mezcla que se utilizara agua potable y libre de sustancias que eventualmente pudieran afectar la resistencia y/o la durabilidad del concreto. El análisis fisicoquímico y microbiológico suministrado por el acueducto metropolitano de Bucaramanga (Ver Anexo A) nos proporciona esta información.

Agregado y escoria EHC Tanto el agregado grueso como el agregado fino y la escoria EHC triturada se caracterizaron por medio del cálculo de peso unitario (suelto y compactado), la gravedad específica, el porcentaje de absorción y el porcentaje de vacíos, según NTC 92, NTC 176, y NTC 237. Además se determinó la granulometría de arena y escoria, y el módulo de finura mediante las especificaciones de la norma NTC 77. (Ver Anexo A)

Caracterización química de la EHC mediante análisis EDX Dentro de la caracterización de la materia prima, se han realizado análisis de Energía Dispersiva espectroscópica de rayos X (EDX) a tres muestras al azar de escoria EHC, previo a su trituración. Esta es una técnica básica utilizada para la caracterización química de una muestra, por medio de la investigación de la interacción de alguna fuente de rayos X de excitación y de una muestra. Sus capacidades de caracterización se deben en gran parte al principio fundamental de que cada elemento tiene una única estructura atómica que permite único conjunto de picos en el espectro de rayos X [52].

Los resultados que arroja este análisis por elemento presente en la muestra son principalmente: porcentajes en peso y porcentajes atómicos, siendo el 100% el peso total de la muestra o la masa atómica total de la muestra, según el caso. (Ver Anexo A).

3.2 FASE 2: FABRICACIÓN DE LAS MUESTRAS

3.2.1 Diseño de Mezcla

La segunda fase de esta investigación comenzó con el diseño de la mezcla a utilizar, para cada tipo de concreto EHC, según el porcentaje de la sustitución de agregado fino (arena) por escoria. Estos porcentajes son: 0, 10, 15 y 20%.

La dosificación para el diseño de mezcla se realizó por el método estandarizado por el Instituto Americano del Concreto (ACI 211) [6], el cual se basa en la selección del asentamiento de acuerdo al tipo de construcción, la resistencia promedio de diseño, el tamaño máximo del agregado, la relación agua/cemento y el módulo de finura de la arena. Se ha seleccionado la dosificación por volumen.

La base de la dosificación es la resistencia de diseño de 2000 psi, puesto que no es el objetivo de esta investigación proponer un concreto de alta resistencia, sino verificar las propiedades de durabilidad y acústicas del concreto EHC, con el fin de proponer elementos de construcción que se comporten adecuadamente en las condiciones de servicio, los cuales no necesariamente deben ser estructurales. Otra razón por la que se seleccionó esta resistencia es que para los ensayos de durabilidad se requiere una relación agua/cemento considerablemente alta si se quiere lograr una aceleración de los ataques, que de otra manera, requerirían años para su observación. Además se emplea esta resistencia teniendo en cuenta que, generalmente, los elementos divisorios de una estructura son no estructurales y que se estudian las propiedades acústicas de un concreto que podría utilizarse para la construcción de estos elementos.

El anexo B presenta en detalle el diseño de la mezcla, incluyendo el cálculo de la relación agua/cemento, la cual resultó ser de 0.68 para todos los reemplazos de arena por escoria. Obviamente, las cantidades de escoria triturada y agregado fino son distintas para cada porcentaje de sustitución.

3.2.2 Preparación de las muestras para las pruebas de durabilidad

La preparación de las probetas de concreto se realizó teniendo en cuenta la cantidad de muestras necesarias para tener resultados representativos. Por medio del método de muestreo por selección intencionada [58], se determinó que 3 muestras por cada sustitución de e/a (0, 10, 15 y 20%), es decir, 12 probetas por cada ensayo arrojaban los datos necesarios para un análisis adecuado de las características de durabilidad. (Ver anexo B).

Por lo tanto, se fabricaron 12 probetas para cada uno de los tres ensayos principales de durabilidad, con un total de 36 probetas de dimensiones 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud., bajo las condiciones de la norma NTC 1377, teniendo especial cuidado en las cantidades de arena y EHC.

El procedimiento comenzó con el pesaje de los componentes del concreto en una balanza digital con precisión de 0.01 gramos. Se mezclaron el cemento con el agregado fino (tanto arena como escoria) en una bandeja metálica limpia y húmeda. Posteriormente se adiciona el agregado grueso hasta que esté uniformemente distribuido en la mezcla. Por último se agrega el agua, la cual ha sido medida con una probeta de medición de volumen líquido. Se realiza la mezcla de los componentes hasta que haya una consistencia adecuada.

Al estar lista la mezcla, se procedió a lubricar los moldes con aceite para facilitar el desmolde de las probetas. Luego, se introdujo la mezcla en los moldes en tres capas del mismo espesor. Cada capa fue compactada con 25 golpes de la varilla metálica, según la norma, con la precaución de no compactar una capa que ya ha sido compactada, además las paredes del molde se golpearon suavemente con un martillo de goma con el fin de extraer el aire atrapado en el concreto, evitando así, la disminución de la resistencia.

El desmolde de las probetas se realizó 24 horas después de su fabricación utilizando un compresor de aire Black & Decker a 50 psi para luego ser inmersas en la cámara húmeda donde se curaron por 28 días.



Figura 9. Proceso de curado de 3 muestras del mismo porcentaje de sustitución. Fuente: [Autor].

Al finalizar el tiempo de curado, se sacaron las probetas de la cámara húmeda para realizar un proceso de secado al ambiente, puesto que se requiere que no haya una humedad considerable que pueda alterar los resultados de las pruebas de durabilidad.

3.2.3 Preparación de las muestras para el ensayo del tubo de impedancia

Para estas muestras (3 de cada porcentaje de sustitución de arena por EHC) se realizó el mismo procedimiento de mezclado utilizado en la fabricación de las probetas de los ensayos de durabilidad.

La diferencia consistió en las dimensiones de las muestras. Se utilizaron moldes de PVC, forma de disco de 4 pulgadas de diámetro (según el diámetro del tubo de impedancia) y 2.5 cm de espesor. Se debe tener en cuenta que no todos los tubos de PVC tienen el mismo diámetro interno, éste deriva del tipo de aplicación y fabricante. Así, que se elige, un molde del mismo diámetro interno del tubo de impedancia para no tener inconvenientes al momento de realizar la prueba. El proceso de fraguado, desmolde, curado y secado fue el mismo utilizado en las probetas de los ensayos de durabilidad.



Figura 10. Discos de concreto utilizados en el ensayo de tubo de impedancia. Fuente [Autor]

3.3 FASE 3: ENSAYOS PREVIOS AL ATAQUE QUÍMICO

3.3.1 Masa Unitaria

El ensayo de masa unitaria se realizó, tomando como referencia la norma NTC 4022, y se aplicó para el concreto recién mezclado. La masa unitaria del concreto se determinó de la siguiente manera:

Antes del llenado, se determinaron la masa y el volumen de cada molde de cilindro. Se pesaron los cilindros recién moldeados y se calculó la masa neta del concreto en cada uno, restando la masa del molde. La masa por metro cúbico recién mezclada, se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F = W_t / V \quad (14)$$

Donde: F es la masa unitaria en estado fresco (kg/m^3)
 W_t es la masa del concreto recién mezclado en el cilindro (kg), y
 V es el volumen del molde del cilindro (m^3)

3.3.2 Densidad y absorción inicial de agua

Este ensayo se basó en la norma NTC 176 con el fin de calcular la densidad aparente del concreto mediante la siguiente fórmula:

$$D = A / [B - C] \quad (15)$$

Mediante un cálculo adicional, se determinó el porcentaje de absorción inicial de agua de las probetas de la siguiente manera:

$$\%Absorción = ([B - A] / A) * 100 \quad (16)$$

Para (15) y (16):

A es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno (grs)

B es la masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca (grs)

C es la masa en el agua de la muestra de ensayo saturada (grs)

3.3.3 Resistencia a la compresión sin ataques químicos

Ocho probetas adicionales fueron fabricadas, utilizando la dosificación del anexo B, para de comprobar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de las probetas con diferentes porcentajes de sustitución de arena por escoria, sin ataque químico previo.

Tal como se menciona en el numeral 2.6.4, el ensayo de resistencia a la compresión se basa en la NTC 673. Consistió en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de concreto a una velocidad que se encuentra dentro de

un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de cada espécimen se calculó dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen.

Se utilizó el equipo de laboratorio para pruebas de compresión MTS 647 Hydraulic Wedge Grip, tanto para los ensayos complementarios de las probetas ensayadas por durabilidad, como para las que no fueron sometidas a ataque químico.

3.4 FASE 4: ESTUDIO DEL ATAQUE POR SULFATOS

El ensayo modificado que se planteó a partir de las referencias establecidas en el numeral 2.6.1, propuso la siguiente metodología para su desarrollo:

Preparación de la solución: Se preparó una solución acuosa de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) con una concentración de 80 gramos/Litro equivalente al 7.77% de concentración, teniendo en cuenta que la densidad del Na_2SO_4 es de 2.68 g/cm³. Este procedimiento se realizó con 48 horas de anticipación a la inmersión de las probetas.

Se utilizó esta concentración con el fin de acelerar el ataque de sulfatación del concreto con condiciones más críticas que las de servicio (Ataque muy fuerte). Se conoce que un ataque fuerte por sulfatos solubles en aguas se da cuando se superan los 10 g/L [54]. Tomando como referencia algunas investigaciones anteriores que siguen lo establecido por la ASTM C 1012, con solución de 50 g de Na_2SO_4 disueltas en 900 mL de agua, se observó que algunas mediciones que se pueden extender hasta los 12 meses. Por esta razón se propuso incrementar la concentración de la solución en 2.4%. Se utilizaron dos recipientes, cada uno con 1000 g de Na_2SO_4 disueltos en 12.5 litros de agua.

Pesaje de las probetas en estado seco. Se realizó la lectura del peso de las probetas pasados los 28 días del curado y los 30 días de secado por medio de una balanza digital.

La duración total del ensayo fue 14 días. Se efectuaron 7 ciclos de 48 horas. Cada ciclo compuesto por las etapas de inmersión, secado y enfriamiento, un nuevo ciclo comienza con una nueva inmersión. De la siguiente manera:

Inmersión de las probetas en la solución Durante 24 horas (cada ciclo). Se utilizó un recipiente con diferencias de nivel en su base, que garantizó la difusión del sulfato en la parte inferior de las probetas.

Secado al horno. Durante 8 horas a 105 °C.

Enfriamiento al ambiente: Durante 16 horas



Figura 11. Inmersión de probetas en la solución de sulfato de sodio anhidro. Fuente [Autor]

Nota: Sólo fueron sometidas al ataque de sulfatos 8 de las 12 probetas, pues 4 (una de cada porcentaje de sustitución e/a se dejó como probeta de control).

Variación de la masa Durante todo el ensayo se midió la variación de la masa de las probetas, tanto seca (al horno), como húmeda (s.s.s.). Además fue necesario realizar una inspección visual de los posibles cambios de aspecto exterior de las probetas.

Resistencia a la compresión Al final de los 14 días se evaluó la resistencia a la compresión de las probetas utilizando el equipo MTS 637 Hydraulic Wedge Grip.

3.5 FASE 5: ESTUDIO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

El procedimiento que se propuso para evaluar el comportamiento de las probetas de concreto a la aceleración del ataque de la reacción álcali-agregado consistió en:

Pesaje de las probetas en estado seco Se realizó la lectura del peso de las probetas pasados los 28 días del curado y 120 días de secado por medio de una balanza digital.

Sumergir las probetas en agua a 80 °C Se sumergieron las probetas en agua y con la ayuda de una resistencia eléctrica se calentó el agua con las probetas hasta alcanzar los 80° C. Las probetas permanecieron allí 12 horas a esa temperatura.



Figura 12. Inmersión de probetas en agua a 80°C. Fuente [Autor]

Preparar la solución de soda cáustica Con el fin de acelerar el ataque por RAA, se preparó una solución acuosa de soda cáustica (NaOH), también denominado hidróxido de sodio, con una concentración 1N (1 normal), equivalente a 40 g por cada 900 mL de agua. Previamente se calentó el agua (11.25 Litros de agua por cada recipiente) a 80°C y lentamente se introdujo el NaOH (500 g por cada recipiente). A medida que se iba introduciendo el NaOH, se iba revolviendo la solución. Se utilizó un recipiente con diferencias de nivel en su base, que garantizó la difusión de la soda cáustica en la parte inferior de las probetas.

Inmersión de las probetas en la solución La duración total de la inmersión fue de 16 días. Las probetas sólo se sacaron de la solución mientras se realizaba el control de variación de la masa y se volvían a sumergir.

Variación de la masa Se evaluó la variación de la masa de las probetas realizando el pesaje de las mismas por medio de una balanza digital, cada dos días en estado húmedo (s.s.s.). Además fue necesario realizar una inspección visual de los posibles cambios de aspecto exterior de las probetas.

Resistencia a la compresión Al final de los 16 días se evaluó la resistencia a la compresión de las probetas utilizando el equipo MTS 637 Hydraulic Wedge Grip.

3.6 FASE 6: ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN

Con el fin de estudiar la carbonatación del concreto de EHC y determinar su vida útil en función de la durabilidad, respecto a un potencial ataque por dióxido de carbono, se realizó un ensayo con condiciones aceleradas que simulan las encontradas en servicio, el cual tomó como base la teoría expresada en el numeral 2.6.3.

3.6.1 Ensayo de carbonatación acelerada

Para el establecimiento de las condiciones aceleradas de carbonatación se utilizó un equipo que incrementa artificialmente la velocidad de reacción por medio del aumento de la concentración de CO₂ en una atmósfera controlada. A continuación se realiza una descripción detallada del equipo utilizado.

Descripción del equipo utilizado La cámara de carbonatación es un sistema capaz de simular, mantener condiciones estables y constantes de temperatura, humedad relativa y concentración del gas [19].

La cámara prismática de acrílico tiene dimensiones: 1m de longitud, 0.5 m de ancho y 0.5 m de altura. Posee una tapa que evitar el escape de CO₂. Cuenta con un tablero de mando, en el que se incluyen los controladores de humedad y temperatura, los cuales están conectados al medidor de humedad relativa y termómetro, respectivamente; un ventilador que distribuye el gas que ingresa uniformemente en el interior de la cámara por medio de las sondas de transporte; un calentador de ambiente; un recipiente y una caja de acero inoxidable que hacen parte parte del sistema medidor de humedad; tres flujómetros, encargados de medir el caudal de entrada, tanto de CO₂, como de aire seco y aire húmedo.

Los flujos de estos tres parámetros se determinan según sea conveniente para mantener las condiciones de humedad relativa, temperatura y concentración de CO₂. Además, la cámara cuenta con dos orificios de 6 mm de diámetro, uno para la sonda de salida de los gases (debe llevarlos fuera del edificio) y el otro para introducir el instrumento medidor de concentración.

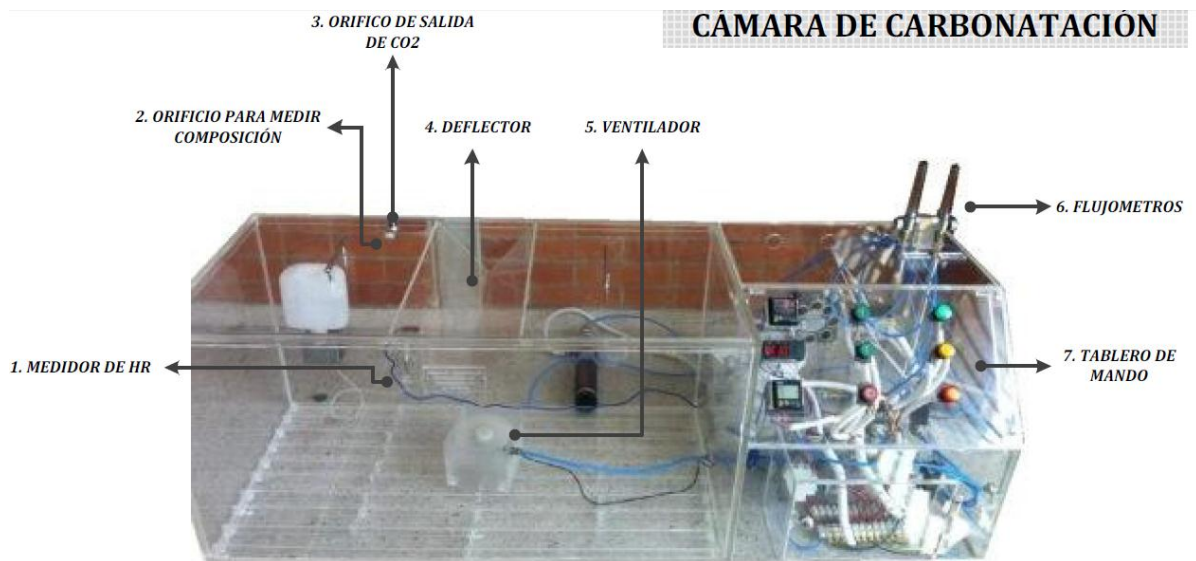


Figura 13. Partes de la cámara de carbonatación. Fuente [19]

Capacitación para el manejo de la cámara de carbonatación Fue indispensable tener una idea clara acerca del funcionamiento de cada uno de los componentes de la cámara y su manejo, razón por la cual se solicitó asesoría al fabricante, quien estableció condiciones de seguridad para el ensayo, así como instrucciones acerca del funcionamiento de los controladores de tiempo, temperatura y humedad relativa.

Puesta en marcha del equipo La cámara de carbonatación se encontraba en perfectas condiciones, sin embargo para su puesta en marcha requería de la

alimentación de CO₂, aire seco y aire húmedo. La fuente de CO₂ es un tanque comercial de 25 Kg, el cual se instaló con las respectivas condiciones de seguridad. Se abrió la válvula del tanque y marcó una presión de 500 psi, sin descenso, lo que indicó que el tanque tenía gas en su interior. El aire que ingresa a la cámara tiene como fuente el aire encuentra en la atmósfera, el cual es capturado por un compresor para aumentar la presión y dirigir el flujo. El compresor no se encontraba en condiciones adecuadas para su puesta en marcha, por lo que fue necesario su mantenimiento integral, el cual fue solicitado a la división de mantenimiento tecnológico de la universidad.

Exposición al dióxido de carbono El ensayo consistió en someter probetas de concreto secas al ambiente por 240 días, de diferentes porcentajes de sustitución e/a, a una alta concentración de dióxido de carbono en la cámara de carbonatación. Para ello se establecieron las siguientes condiciones de humedad, temperatura y concentración, según la teoría consultada [18].

Humedad relativa [%]	50-70
Temperatura [°C]	25
Concentración [%]	70
Tiempo del ensayo [hrs]	15

Tabla 3. Condiciones de la cámara para la carbonatación del concreto. Fuente: [Autor]

Establecidas las condiciones, se procedió a secar totalmente la cámara, se llenó de agua el recipiente que alimenta la caja de acero inoxidable para la correcta medición de humedad. Se ingresaron probetas y se colocó la tapa con peso de otras probetas sobre ella por seguridad. Se fijó el valor de la histéresis de humedad en 65% para que la humedad estuviera en el rango establecido.

La temperatura se fijó en 30°C mientras se alcanzaba el valor de la histéresis, luego sí se fijó en 25°C. El controlador de tiempo se fijó en 15 horas. La razón por la cual se elige este valor tiene que ver con la alta concentración utilizada, teniendo en cuenta investigaciones anteriores [46], [55], los resultados obtenidos en ellas y la ecuación (4).

A continuación, se energizó la cámara, teniendo la precaución de que todo estuviera debidamente conectado y se abrió la válvula del tanque de CO₂ a una presión de 250 psi, que garantizara el flujo constante.

Según investigaciones anteriores [19], para que esta cámara alcance una concentración del 70% se deben fijar los flujos de CO₂, aire seco y aire húmedo, con los siguientes valores:

Flujo de CO₂ [Lpm]	7.5
Flujo de aire seco [Lpm]	10
Flujo de aire húmedo [Lpm]	0

Tabla 4. Flujos de CO₂ y aire para garantizar una concentración del 70%. Fuente: [19]

Se recomienda permitir sólo el flujo de CO₂, sin entrada de aire a la cámara, mientras se alcanza el valor de histéresis, y luego si abrir el flujo de aire seco para su estabilización. Si desciende demasiado el valor de la humedad relativa, se debe abrir el flujo de aire húmedo, garantizando la operación de un humidificador.

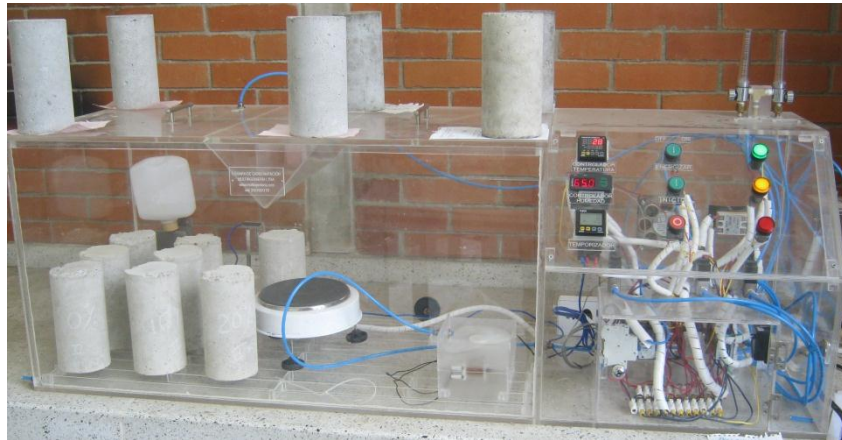


Figura 14. Cámara de carbonatación en operación. Fuente [Autor]

Al finalizar las 15 horas de carbonatación, se cerró el flujo de CO₂ y se dejó la cámara en operación por una hora más, sólo con flujo de aire seco para poder extraer las probetas de forma segura.

3.6.2 Ensayo de tracción indirecta

Este ensayo se realizó a las probetas que fueron sometidas a carbonatación acelerada, de acuerdo a las exigencias de la norma NTC 722. El equipo utilizado marca AMSLER, se encuentra en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander. El procedimiento consistió en la colocación de los listones de apoyo, la ubicación de la muestra y la aplicación de carga en dirección perpendicular a la longitud de la probeta. Se registró el máximo valor de carga aplicada indicado por el medidor de carga de la máquina en el momento de la falla para poder determinar el esfuerzo a tracción indirecta.

Este ensayo se utilizó como complemento del ensayo de carbonatación, pues el sentido longitudinal de la falla, permite evaluar la profundidad de carbonatación alrededor del centro de concreto, sin embargo, también se utilizó para comparar el

comportamiento de los concretos con distinta composición, ante una eventual exposición a cargas de tracción. Además, podemos obtener una idea acerca del comportamiento que tendría el concreto carbonatado respecto a la compresión, puesto que para algunos autores existe una relación de 1 a 3 [6] entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión.

3.6.3 Medición de la profundidad de carbonatación

Aprovechando la forma de la falla que proporciona el ensayo de tracción indirecta, se aplicó fenolftaleína al 1% en solución etílica para determinar las zonas con pH básico y ácido, según el color que presentaran.

En las zonas donde el concreto reaccionó a la fenolftaleína presentando un color fucsia no se presentó carbonatación, mientras que en las zonas que mantuvieron el color original del concreto sí hubo difusión de CO₂. La fenolftaleína es un indicador de sustancias básicas. Puesto que el CO₂ es un compuesto ácido no reacciona a la fenolftaleína.

Por probeta, se realizaron varias mediciones, se registraron los máximos y mínimos valores de profundidad de carbonatación X , con el fin de determinar el coeficiente de carbonatación K , de cada probeta.

3.7 FASE 7: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS

Se determinaron el coeficiente de absorción del sonido y el índice de reducción de ruido del concreto de EHC por medio del ensayo del tubo de impedancia efectuado a las muestras, cuya fabricación está descrita en el numeral 3.2.3.

3.7.1 Descripción del equipo

Se efectuó la readecuación del equipo para la realización del ensayo, el cual consiste en un tubo cerrado de PVC (puede ser de metal, madera o plástico) de 4 pulgadas de diámetro, con sección transversal circular uniforme de extremo a extremo. Está provisto de un parlante de 3 pulgadas que se encuentra en el extremo opuesto a la muestra, un sistema de micrófono móvil que puede ser externo, como se muestra en la figura 18, o interno como es el caso del tubo de impedancia utilizado. El micrófono es unidireccional y tiene 18 mm de diámetro.

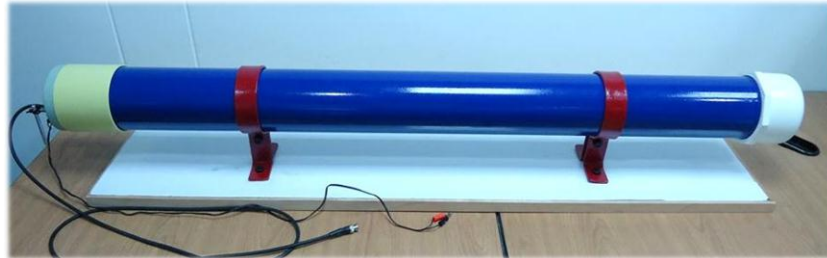


Figura 15. Tubo de impedancia. [Autor]

El sistema de micrófono móvil consiste en una varilla de acero inoxidable de longitud 1.3 m soldada a una platina de hierro con ruedas de caucho para el desplazamiento del sistema. El micrófono se ubica sobre el sistema móvil de manera que se coincida con el centro de la sección transversal del tubo. El cable del micrófono cuenta con un conector BNC en su otro extremo.



Figura 16. Detalle del sistema móvil varilla-micrófono. Fuente: [Autor]

Se utilizó un bafle de 3 pulgadas marca Tech de 32 ohmios y 5W. Se atornilló a una lámina acrílica para el soporte del bafle en el centro de la sección transversal del tubo y para el paso de la varilla y del cable del micrófono sin afectar el parlante. Se fijaron también conectores tipo “banana” hembra en la tapa del tubo para que el cable que conduce la señal del generador de funciones al bafle se conectaran en la tapa por medio de conectores tipo “banana” macho. (Ver figura 19).



Figura 17. Detalle del bafle con soporte de acrílico. Fuente: [Autor]

3.7.2 Ensayo acústico por el método del tubo de impedancia

El ensayo tiene como fundamento físico la teoría de ondas estacionarias en un tubo cerrado, descrita por el numeral 2.7.2. El límite superior de frecuencias a utilizar en el ensayo y el diámetro del tubo están relacionados por la siguiente desigualdad, según la norma ASTM C 384:

$$f < 0.586 \frac{v_s}{d} \quad (17)$$

Siendo f la frecuencia máxima permitida en el ensayo (Hz), v_s la velocidad del sonido (m/s), d el diámetro del tubo (m). Con esta expresión se definió f a partir de d (3.7.3).

Asumiendo $v_s = 343 \text{ m/s}$ y $d = 0.107 \text{ m}$ entonces: $f < 1878.5 \text{ Hz}$

Frecuencias a utilizar en el ensayo [Hz]:

250, 315, 400, 630, 800, 1000, 1250 y 1600 Hz < 1878.5 Hz

Sabiendo esto, $\lambda \geq 0.1826 \text{ m}$

La longitud del tubo también se restringe a la siguiente desigualdad que la relaciona con la longitud de onda y diámetro:

$$3\frac{\lambda}{4} < L - d \quad (18); \text{ es decir: } L > 0.24 \text{ m}$$

Donde L es la longitud del tubo (m) y λ es la longitud de onda (m). $L = 1.2 \text{ m}$. Se comprueba la viabilidad del ensayo.

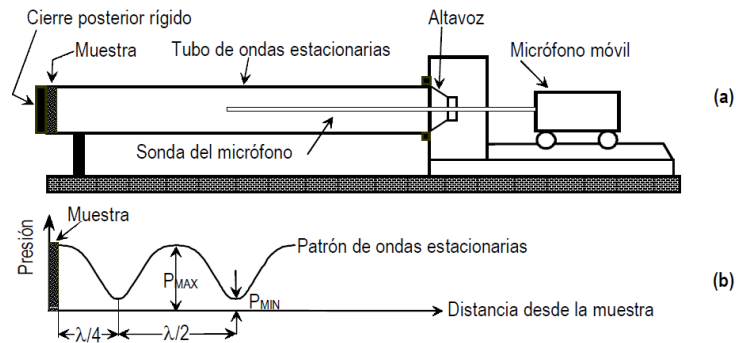


Figura 18. Esquema de tubo de Kundt (a) y perfil de la onda estacionaria formada en su interior (b). Sistema de micrófono móvil externo. Fuente [56]

El ensayo se realizó en el taller de electrónica de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander, con los parámetros que propone la norma ASTM C 384, utilizando el equipo descrito en el numeral 3.7.2, un osciloscopio marca Tektronic de referencia TDS 200 2B y un generador de señales marca

PROTEK de referencia 9205A. Tanto el osciloscopio, como el generador de señales, pertenecen a la Escuela de Física de la UIS.

Se colocó la primera muestra de concreto con EHC en un extremo del tubo de impedancia, el parlante con su soporte en el otro extremo y el micrófono desplazándose a lo largo del tubo por medio del sistema de varilla móvil. Se ubicó un apoyo en cada extremo del tubo (uno atrás del parlante y el otro después de la muestra) con el propósito de evitar la alteración de las mediciones. Se conectó el cable del micrófono directamente a la entrada del osciloscopio por medio de un conector BNC y el cable del parlante al generador de señales por medio de conectores tipo “banana”.

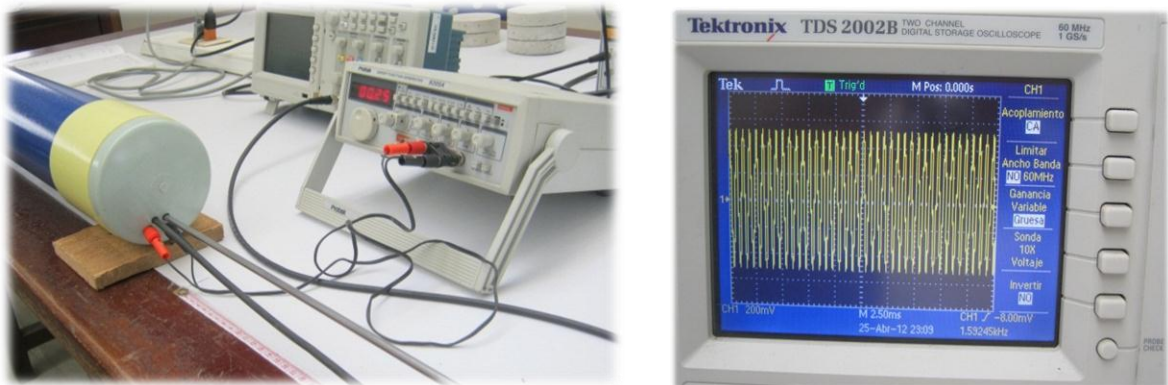


Figura 19 (a-b).Desarrollo del ensayo acústico por el método del tubo de impedancia Fuente [Autor]

Se generó una señal de 250 Hz. La magnitud de la presión en los nodos y antinodos fue medida con el micrófono de prueba. Se observó el osciloscopio para registrar los valores de amplitud, máximos (A+B) y mínimos (A-B) en milivoltios, a una distancia d igual a cero, es decir, con el micrófono a 1 mm de la muestra. Se desplazó el sistema móvil para ubicar el micrófono a una nueva distancia d , la cual registró el valor del nodo o antinodo adyacente al cero.

Se repitió el procedimiento buscando todos los valores máximos y mínimos de amplitud a diferentes distancias, con la ayuda de una cinta métrica hasta llegar al otro extremo del tubo. Al concluir con la medición en los 250 Hz, se aumentó la frecuencia hasta 315 Hz, y se repitió el procedimiento de medición. Así mismo para todas las frecuencias hasta alcanzar los 1600 Hz.

Finalizando la medición de amplitudes en todas las frecuencias se cambió la muestra de concreto y se recommenzó con la toma de datos a 250 Hz. Este procedimiento aplicó para las 12 muestras utilizadas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada y el análisis de los datos obtenidos de los ensayos. Se presentan la caracterización física de la materia prima, la identificación química de los elementos presentes en la escoria, la dosificación obtenida por el diseño de mezcla, la caracterización preliminar de las probetas previo a su exposición a ataques químicos y los resultados de los ensayos de durabilidad (ataque por sulfatos, RAA y carbonatación), así como la determinación de la absorción acústica de las muestras por medio del método del tubo de impedancia.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Gravedad específica y peso unitario de los agregados

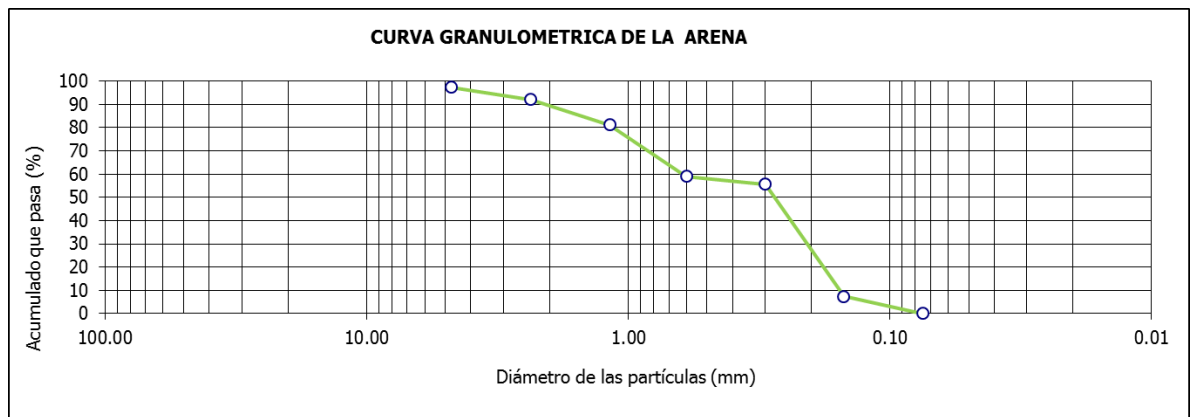
GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y PESOS UNITARIOS	Ag. Grueso	Arena	EHC
Gravedad especifica real [g/g]	2.72	2.71	2.40
Gravedad especifica aparente [g/g]	2.61	2.58	2.35
Gravedad especifica aparente S.S.S [g/g]	2.65	2.63	2.37
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado [Kg/m ³]	1477.79	1652.33	1727.43
Peso unitario del agregado S.S.S. suelto [Kg/m ³]	1345.56	1392.98	1437.94
Absorción [%]	1.56	1.87	0.85
Vacíos [%]	44.29	37.21	27.10
Humedad [%]	0.49	0.83	0.54

Tabla 5. Resultados de gravedad específica y peso unitario de los agregados. Fuente: [Autor]

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos para el peso unitario y el porcentaje de vacíos (NTC 92), asimismo la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado grueso (NTC 176), arena y escoria (NTC 237). El porcentaje de humedad se calcula según INV E - 122.

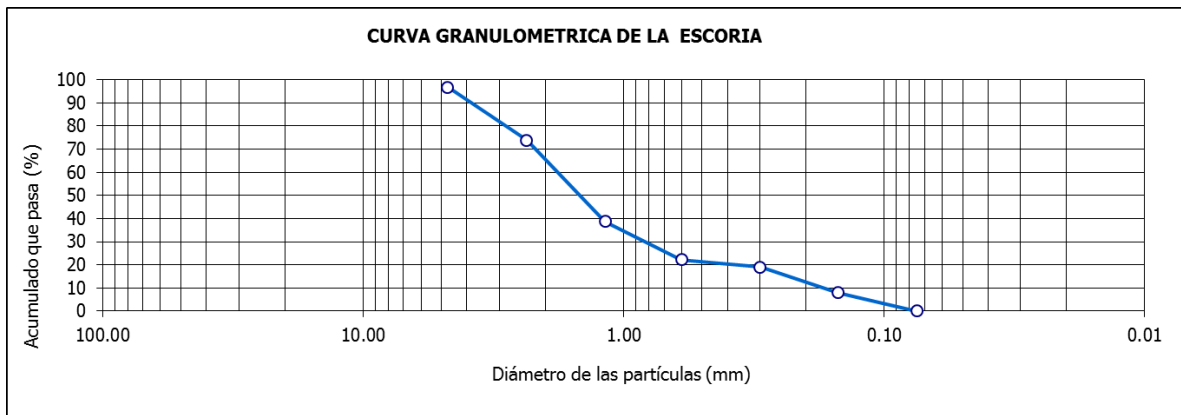
Granulometría del agregado fino

Se determinó la curva granulométrica del agregado fino, tanto arena como EHC y el módulo de finura por medio de la aplicación de la NTC 77.



Gráfica 2. Curva granulométrica de la arena. Fuente [Autor]

El sistema de clasificación unificada de suelos (USCS) indicó que la arena utilizada es de tipo SP: Arena MAL gradada. El módulo de finura de la arena según NTC 77 es de 2.073, se encuentra en el rango de “arenas finas”.



Gráfica 3. Curva granulométrica de la escoria de horno de cubilote triturada. Fuente [Autor]

Según el sistema de clasificación unificada de suelos (USCS), la escoria triturada utilizada es de tipo SW: Arena BIEN gradada, con grava, con pocos finos o sin ellos. El módulo de finura de la escoria triturada según NTC 77 es de 3.413, por lo que se concluye que se trata de una “arena gruesa”.

Caracterización química de la escoria

La caracterización química de la escoria se desarrolló mediante el método de análisis: Energía Dispersiva espectroscópica de rayos X (EDX), técnica descrita en el numeral 3.1.4. Se realizaron tres pruebas para distintas muestras de escoria. Los resultados de las dos primeras tienen la misma tendencia y se pueden visualizar en el espectro de rayos x mostrado en la figura 20.

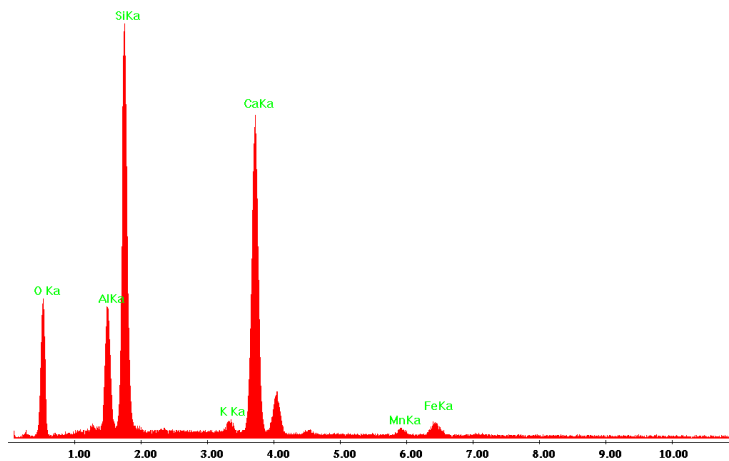


Figura 20. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 1. Fuente [Lavco Ltda.]

El espectro de rayos x de la muestra número 3 varió en su tendencia, respecto a las 2 anteriores, y se presenta en la figura 21:

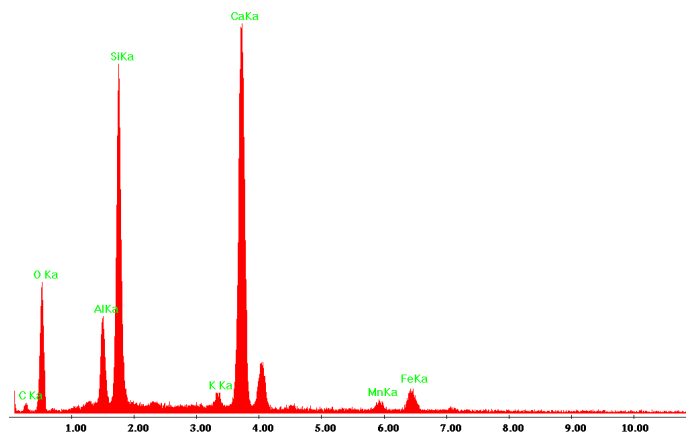


Figura 21. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 3. Fuente [Lavco Ltda.]

Se pueden identificar que los elementos que principalmente componen la EHC son Sílice y Calcio. A priori se asume que no hay elementos en la EHC que puedan generar imposibilidad del desarrollo de la investigación por alguna incompatibilidad con el concreto.

Es posible relacionar la escoria de horno de cubilote con los silicatos componentes del cemento: C_2S o silicato tricálcico ($3CaO \cdot SiO_2$) y C_3S o silicato bicálcico ($2CaO \cdot SiO_2$), pues ellos están compuestos también por sílice y calcio. Según la bibliografía consultada [10], el C_2S favorece a desarrollar la resistencia a corto plazo; el C_3S por su parte, contribuye a aumentar la resistencia a largo plazo. Sería muy útil realizar una investigación posterior que evalúe las características de un concreto que utilice EHC como componente del cemento.

4.2 DISEÑO DE MEZCLA

Se muestran los resultados para la dosificación de los componentes básicos del concreto, la cual se realizó a partir del Método ACI 211 en un concreto apto para ensayos acelerados de durabilidad de 2000 psi. Detalle en el anexo B:

CEMENTO	AG. FINO	AG. GRUESO	Relación a/c
1.0	2.8	3.1	0.68

Tabla 6. Dosificación de la mezcla y relación agua/cemento según el método ACI. Fuente: [Autor]

Además se presenta el cálculo de cantidades de material para una probeta de concreto utilizada en los ensayos de durabilidad.

CANTIDADES DE MATERIAL POR PROBETA (Φ 0,103x0,206) [Kg]				
Descripción	0%	10%	15%	20%
Cemento	0.55	0.55	0.55	0.55
Arena	1.53	1.37	1.30	1.22
Triturado	1.70	1.70	1.70	1.70
Agua	0.44	0.44	0.44	0.44
Escoria	0.00	0.15	0.23	0.31

Tabla 7. Cantidades de material para una probeta cilíndrica. Fuente: [Autor]

4.3 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LAS PROBETAS DE CONCRETO CON EHC

Masa unitaria

Se realizó el cálculo de la masa unitaria de las probetas de concreto recién mezclado descrito en el numeral 3.3.1 con los siguientes resultados:

MASA UNITARIA SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN [Kg/m ³]				
Muestra	0%	10%	15%	20%
1	2289.02	2277.96	2291.94	2293.10
2	2290.19	2304.75	2290.19	2293.69
3	2314.08	2288.44	2277.37	2285.53
Media	2297.76	2290.38	2286.50	2290.77
σ	14.14	13.51	7.95	4.55

Tabla 8. Resultados de masa unitaria de las probetas de concreto recién mezclado. Fuente: [Autor]

Densidad y absorción inicial de agua

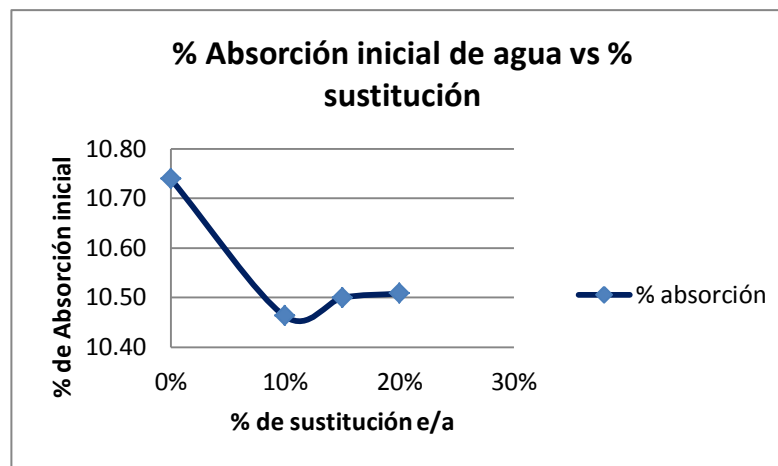
De la misma manera que se calculó la densidad y la absorción inicial de agua en los agregados, se realizó en las probetas de concreto con los siguientes resultados:

DENSIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN [Kg/m ³]				
Muestra	0%	10%	15%	20%
1	2062.56	2069.91	2061.28	2066.12
2	2068.26	2052.63	2069.31	2069.04
3	2058.65	2062.03	2061.52	2064.85
Media	2063.16	2061.53	2064.03	2066.67
σ	4.83	8.65	4.57	2.15

Tabla 9. Resultados de densidad para doce muestras de concreto. Fuente: [Autor]

ABSORCIÓN INICIAL DE AGUA [%]				
Muestra	0%	10%	15%	20%
1	11.09	10.77	10.75	10.81
2	10.55	10.37	10.39	10.38
3	10.58	10.25	10.36	10.33
Media	10.74	10.46	10.50	10.51
σ	0.303	0.271	0.219	0.265

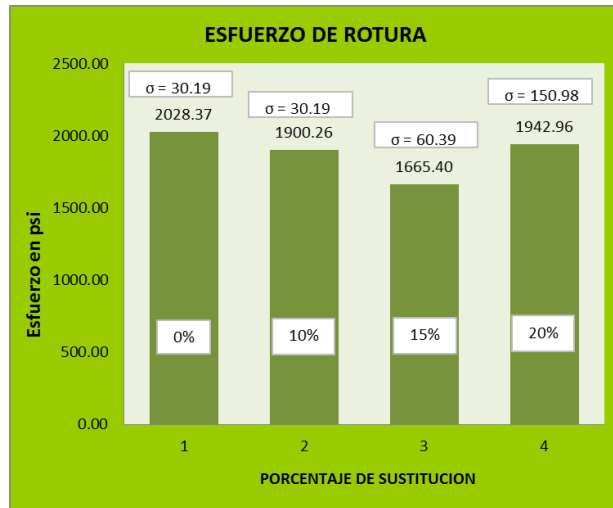
Tabla 10. Resultados de absorción inicial de agua para doce muestras de concreto. Fuente: [Autor]



Gráfica 4. Tendencia central de la absorción inicial de agua vs % de sustitución e/a (media). Fuente: [Autor]

Resistencia a la compresión

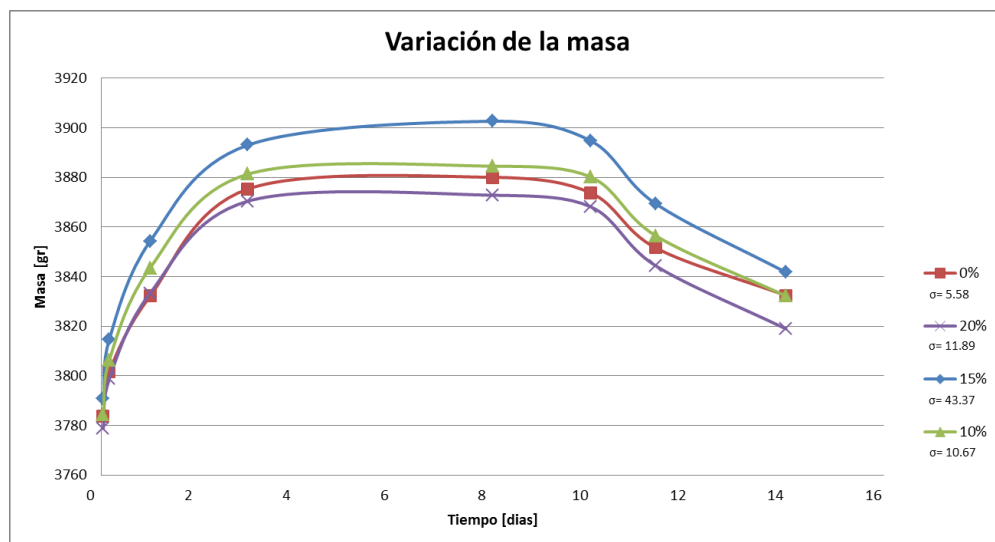
Al realizarse el ensayo de compresión simple a probetas de concreto (curado 28 días) con diferentes sustituciones e/a que no fueron sometidas a ataques químicos se obtuvieron los siguientes resultados respecto a la carga de rotura:



Gráfica 5. Resultados del ensayo de compresión simple. Fuente: [Autor]

Se observa que la mayor resistencia se presentó en las probetas correspondientes al 0% y al 20% de sustitución de arena por EHC. Los resultados para la sustitución del 20% no son concluyentes, debido a la desviación estándar de las muestras.

4.4 ENSAYO ACELERADO DE ATAQUE POR SULFATOS

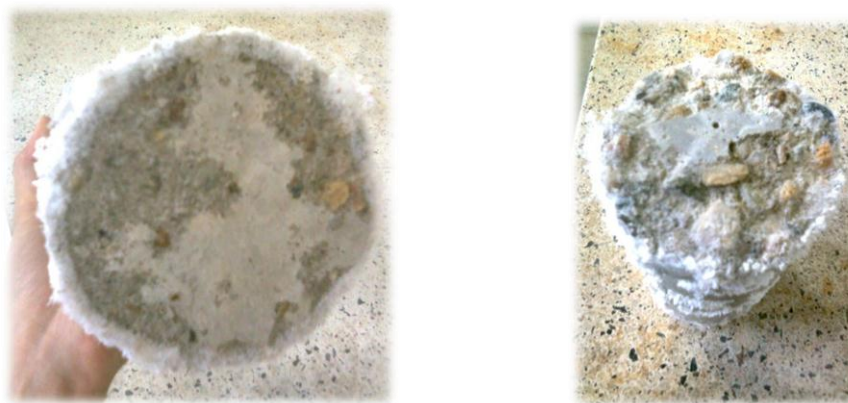


Gráfica 6. Variación de la masa húmeda de las probetas sometidas a sulfatación. Fuente: [Autor]

La gráfica 6 genera una conclusión muy importante respecto a la evaluación del comportamiento del concreto de EHC sometido al ataque por sulfatos, puesto que evidencia el deterioro descrito por la inspección visual, en el cual, las probetas del 20% sufrieron un daño mayor que las demás con desprendimiento de material, por esta razón perdieron más masa los últimos ciclos. La probeta que menor pérdida de material presentó fue la de sustitución e/a de 0%, concreto normal, lo cual indica que se vio afectada en menor medida por la cristalización de sales.

Inspección visual

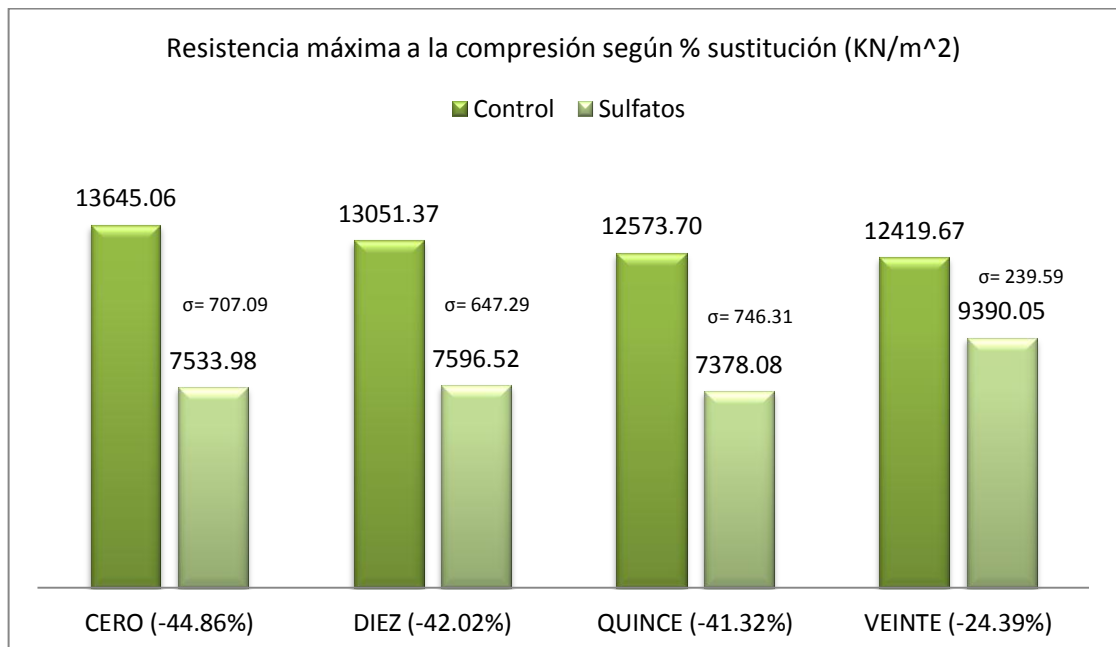
Los últimos ciclos de humedecimiento y secado presentaron un cambio brusco en la apariencia de las probetas, pues no sólo se presentó desprendimiento de material, sino que también surgió una capa de sulfato solidificado alrededor de las probetas. La razón por la cual se presentó esta capa fue el ascenso del sulfato hacia la superficie por acciones capilares y en consecuencia la cristalización de sales por evaporación. Esta acción fue la principal generadora del daño. Se recomienda ver la secuencia fotográfica del anexo C.



Figuras 22-23. Cristalización de sales y daño generado en una probeta con sustitución del 20% escoria/arena. Fuente [Autor].

Resistencia a la compresión posterior a la sulfatación

Al finalizar el ensayo de ataque acelerado por sulfatos se realizó un ensayo complementario de resistencia a la compresión, con el propósito de establecer un punto de comparación adicional, no sólo entre porcentajes de sustitución de arena por escoria, sino también con las probetas de control que no fueron sumergidas a la solución, las cuales no sufrieron sulfatación. Se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 7. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión. Sulfatos. Fuente: [Autor]

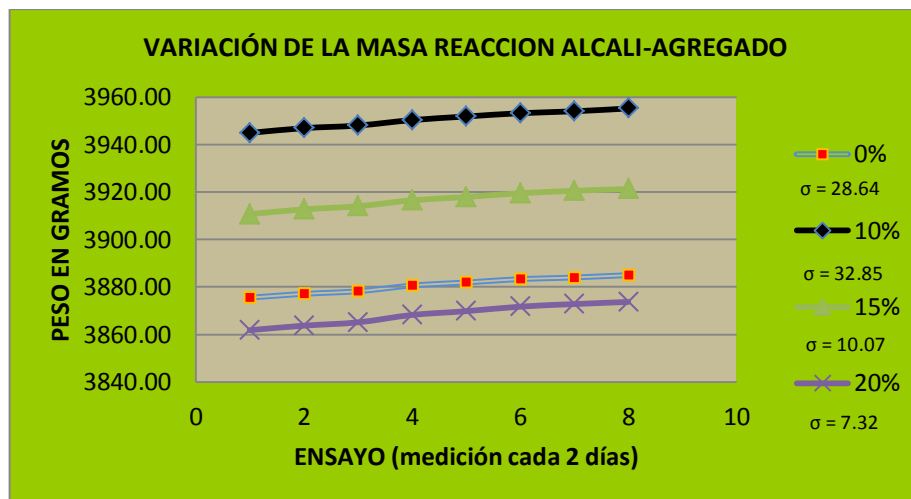
La gráfica 7 muestra la disminución del valor de resistencia máxima para las probetas sumergidas (verde claro), respecto a las probetas de control que no fueron sumergidas (verde oscuro). Se observa que la mayor disminución se presentó en la sustitución al 0%, mientras que la menor disminución se presentó al 20%. Este comportamiento podría atribuirse a la acción activadora de la solución sobre la EHC para que desarrolle un comportamiento aglomerante, por lo que se recomienda realizar estudios posteriores sobre este tema.

4.5 ENSAYO DE ACELERACIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

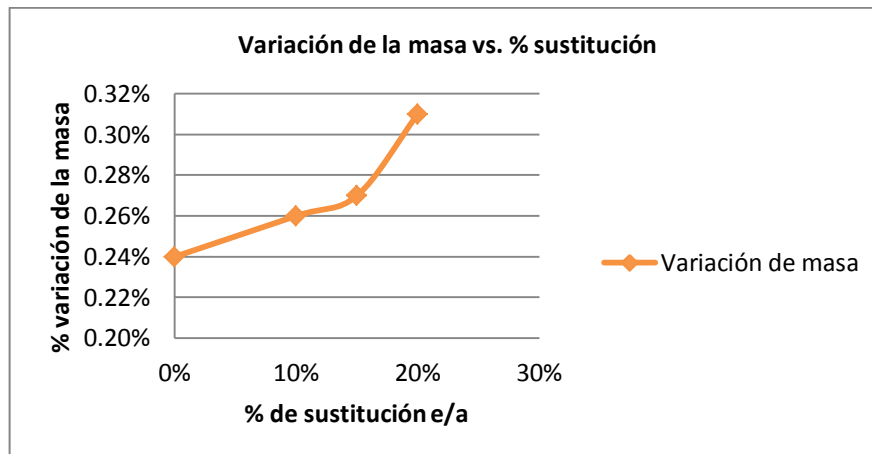
Se realizó el procedimiento descrito por el numeral 3.5 obteniendo resultados para la variación de la masa, resistencia a la compresión e inspección visual.

Variación de la masa

En este ensayo no se establecieron etapas de secado por lo que la variación de la masa siempre fue en aumento. No se presentó una variación considerable, aparte del aumento lógico por saturación de los poros. Sin embargo se pudo determinar que la probeta del 20% de sustitución tuvo el mayor porcentaje de aumento de masa, como lo muestran las gráficas 8 y 9. Las desviaciones estándar de grupos de datos indican una confiabilidad aceptable en cuanto a resultados concluyentes.



Gráfica 8. Variación de la masa húmeda. Ensayo de aceleración de la RAA. Fuente: [Autor]



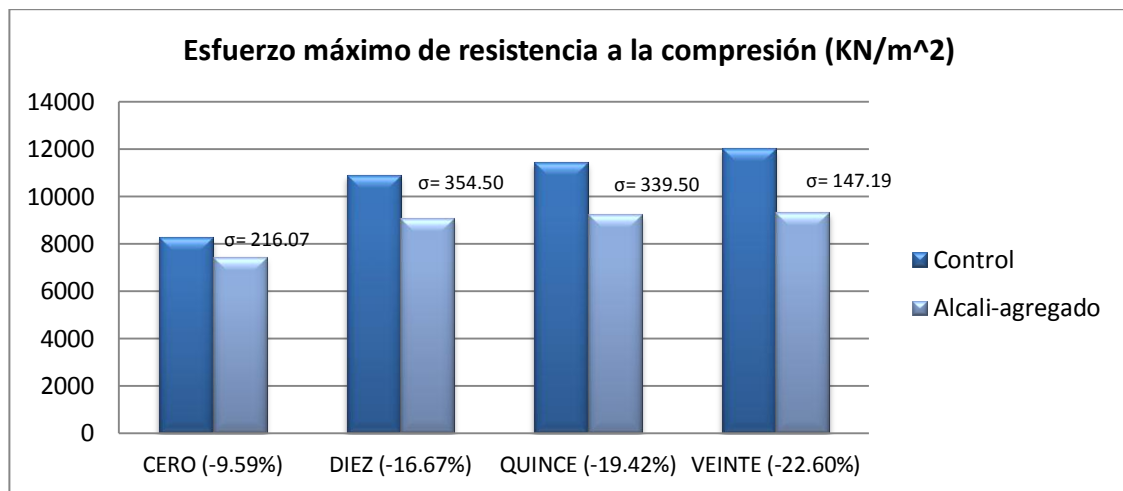
Gráfica 9. Porcentaje de variación de la masa respecto al porcentaje de sustitución. Fuente: [Autor]

El comportamiento mostrado en la gráfica 9, indica que hay mayor difusión de la solución de soda cáustica en el concreto a mayor reemplazo e/a. Este fenómeno se debe a la reacción entre los álcalis del cemento y los agregados, sobre todo el agregado fino de EHC por su alto contenido de sílice, ya que la reacción induce a una expansión de la estructura del concreto, con posibles agrietamientos internos.

Inspección visual

Todas las probetas mostraron algunos cambios en la textura de la superficie, la cual se caracterizó por ser resbaladiza. En las probetas que tenían 20% de sustitución e/a los cambios fueron más notorios, pues en ellas se presentaron capas de soda cáustica densificada de color blanco (ver anexo D). Según esta inspección no se puede determinar si la EHC favorece o no a la disminución de los efectos de la RAA.

Resistencia a la compresión



Gráfica 10. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión. RAA. Fuente: [Autor]

Los resultados del ensayo complementario de resistencia a la compresión proveen mayor claridad acerca del comportamiento de las probetas ante la aceleración de la RAA. Se observa que el porcentaje de sustitución que presentó mayor disminución de la resistencia fue el del 20%, lo que nos indica que hubo una afectación mayor que en los otros porcentajes a partir de la inmersión en la solución acuosa de soda cáustica. Se asume que esta disminución se debió a la reacción álcali-agregado-escoria.

4.6 ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir del procedimiento descrito en 3.6, el cual se refiere a la medición de la profundidad de penetración por medio del análisis de pH y al ensayo complementario de tracción indirecta.

Profundidad de carbonatación



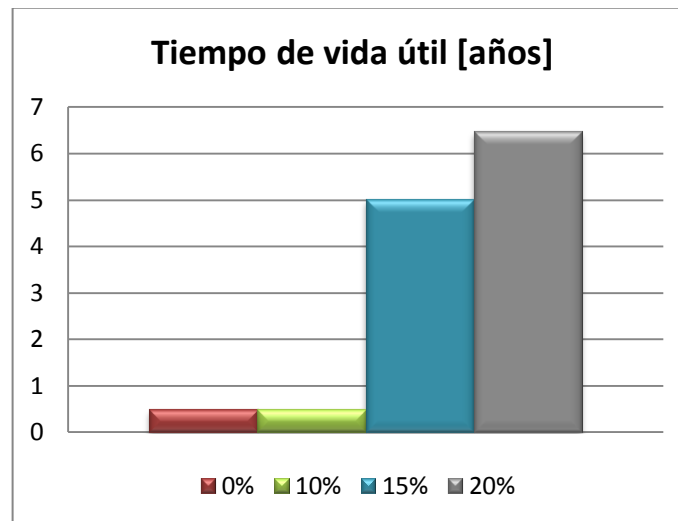
Figura 24. Profundidades de carbonatación para el 0, 10, 15 y 20% de sustitución Fuente: [Autor]

% Sustitución	Profundidad de carbonatación	Media [mm]	Desviación Estándar	Observaciones
0%	Completa	Completa	-	Sin color
10%	Completa	Completa	-	Color muy atenuado
15%	De 21 a 39 mm	31.25	3.15	3 puntos de control por probeta
20%	De 19 a 32 mm	27.5	2.93	3 puntos de control por probeta

Tabla 11. Resultados de medición de la profundidad de carbonatación. Fuente: [Autor]

Para las probetas con 0% de escoria se determinó una carbonatación completa a partir de que no se presentó cambio de color ante la presencia de la fenolftaleína, es decir, el CO₂ se difundió en todo el interior de las probetas. Lo mismo sucedió en las probetas con 10% sustitución, aunque con un color muy atenuado uniformemente distribuido, lo que indica que el CO₂ se difundió en toda la probeta, pero no con la misma intensidad que en las probetas sin sustitución. Para las probetas del 15 y 20% de sustitución se determinó que el núcleo permanecía con el pH básico previo al ataque químico, aunque alrededor de él si se había producido carbonatación en proporciones distintas para ambas sustituciones.

Por medio de las ecuaciones (1) y (4) se determinaron el coeficiente de carbonatación y el tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC a 2000 psi para los diferentes porcentajes de sustitución. Los cálculos se consignan en el anexo E.



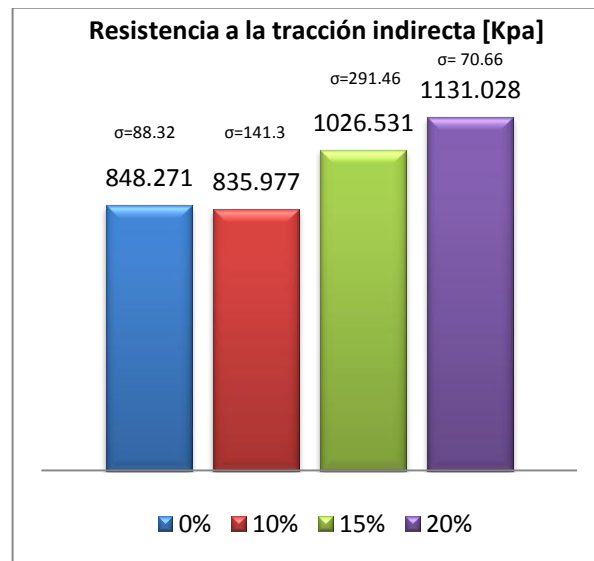
Gráfica 11. Tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC. Fuente: [Autor]

Nota: Se tomó el tiempo de vida útil como el tiempo que tarda el CO₂ del ambiente en difundirse hasta llegar a un acero de refuerzo. Se asumió X (profundidad) para este cálculo de acuerdo a un recubrimiento del refuerzo de 40 mm. Ver anexo E.

De la gráfica 11 se puede observar el beneficio que la escoria de horno de cubilote como agregado fino provee a la durabilidad de las estructuras por carbonatación, pues las probetas de mayor porcentaje de sustitución tuvieron menor difusión de CO₂ en su interior. Los valores bajos de tiempo de vida útil podrían deberse a que el concreto es de 2000 psi. Se recomienda realizar un ensayo de carbonatación acelerada con concreto de EHC de mayor resistencia esperada.

Resistencia a la Tracción Indirecta

Con el fin de fallar la probeta longitudinalmente se realizó el ensayo de tracción indirecta, el cual reveló los resultados que describe la gráfica 12:

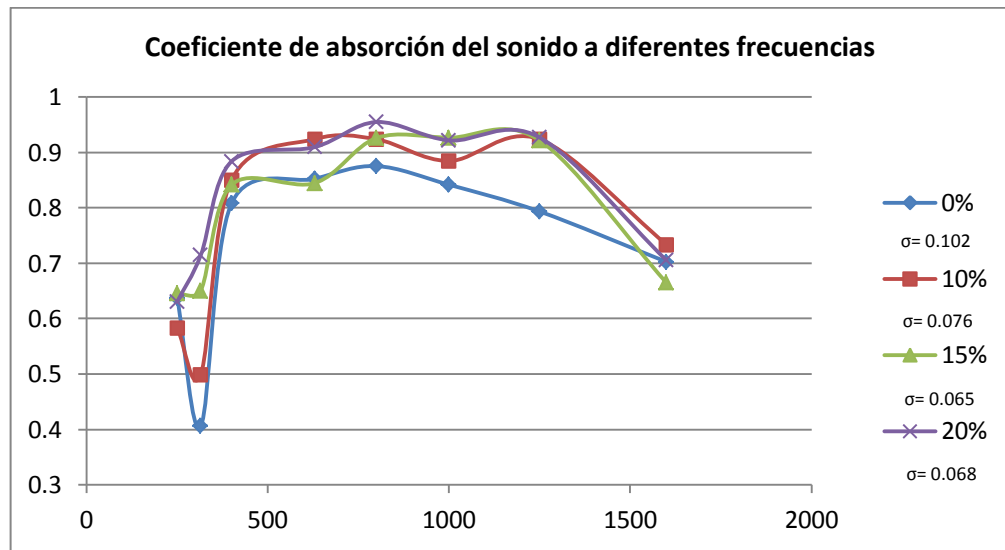


Gráfica 12. Resistencia máxima a la tracción indirecta de probetas carbonatadas. Fuente: [Autor]

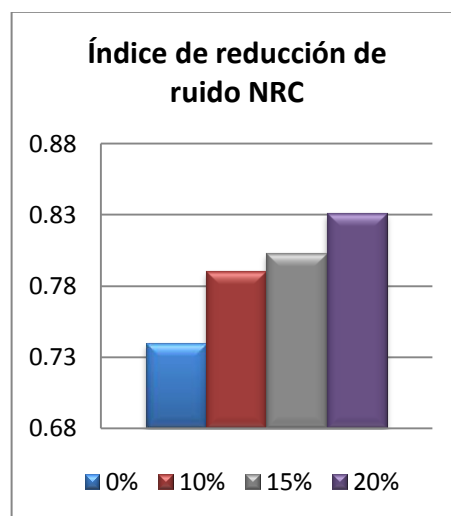
Aunque este es un ensayo complementario, sirve como punto de comparación del comportamiento de las probetas con distinta sustitución e/a. Se deduce el mejor desempeño de las probetas con mayor % sustitución ante la carbonatación, aunque estos resultados no son concluyentes para el 10%, debido a la desviación estándar. Cabe resaltar que algunos autores [6] presentan una relación aproximada de 1 a 3 entre la resistencia a tracción indirecta y la resistencia a la compresión para un concreto normal.

4.7 ENSAYO ACÚSTICO POR EL MÉTODO DEL TUBO DE IMPEDANCIA

Se realizó el procedimiento descrito en el numeral 3.7 con el fin de determinar el coeficiente de absorción acústica y el índice de reducción de ruido del concreto de EHC. A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la síntesis de los datos registrados en el anexo F.



Gráfica 13. Coeficiente de absorción acústico medido a distintas frecuencias. Fuente: [Autor]



Gráfica 14. Índice de reducción de ruido para diferentes sustituciones e/a. Fuente: [Autor]

Las gráficas 13 y 14 indican que escoria de horno de cubilote como agregado fino contribuye a la absorción acústica del concreto, pues los mayores valores de absorción acústica corresponden a los mayores porcentajes de sustitución e/a.

Los resultados para los coeficientes de absorción son concluyentes, pues se tomaron suficientes datos de amplitud para cada probeta (anexo F), que garantizan una desviación estándar admisible.

A continuación se presenta una tabla con los rangos de valores típicos del índice de reducción de ruido, de acuerdo a los tipos de elementos arquitectónicos que se utilizan como absorbentes de sonido [57].

ABSORBENTE	ESPESOR (PULG.)	DENSIDAD (LB/PIE³)	NRC
Paneles de fibra de vidrio o minerales	½ - 4	½ - 6	0.45 – 0.95
Losetas, paneles o tabletas moldeadas	½ - 1 1/8	8 - 25	0.45 – 0.90
Repello (poroso)	3/8 – 3/4	20 - 30	0.25 – 0.40
Fibras y aglutinantes rociados	3/8 – 1 1/8	15 - 30	0.25 – 0.75
Espumas, plásticos de celda abierta, elastómeros, etc.	½ - 2	1 - 3	0.35 – 0.90
Alfombras	Varía con ondulaciones, textura, respaldo, bajo-alfombras, etc.		0.30 – 0.60
Cortinas	Varía con pliegues, textura, peso, tejido abierto		0.10 – 0.60

Tabla 12. Elementos arquitectónicos absorbentes y sus valores típicos del índice de reducción de ruido. Espesores y densidades. Fuente: [57]

Analizando los resultados obtenidos y la tabla, teniendo en cuenta que se utilizó un espesor de muestra de 2.5 cm, podemos verificar que el concreto de EHC presenta valores de NRC que están en los rangos de elementos como paneles, losetas o tabletas. Además, se comprueba que el equipo de pruebas ofrece una alta confiabilidad para la determinación de las propiedades acústicas de los materiales.

4.8 PROPUESTA DE ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación del concreto, respecto a la durabilidad y propiedades acústicas, se proponen elementos no estructurales que pueden contribuir principalmente a la absorción acústica de las edificaciones y a disminuir la carbonatación en presencia de CO₂. Estos no deben estar expuestos a suelos o soluciones con altas concentraciones de sulfatos. Se debe evitar la humedad, pues el alto contenido de sílice de la escoria, en contacto con el agua, puede causar la aceleración de la reacción álcali-agregado.

Paneles absorbentes



Figura 25. Paneles prefabricados de hormigón. Fuente: [lascasasprefabricadas.com]

Se propone el uso del concreto de EHC como componente de paneles prefabricados con fines divisorios. Los paneles poseen varias capas, cada una de un material distinto. El espesor de la capa de concreto de EHC mínimo debe ser 1

pg., según las propiedades de absorción acústica y el espesor de las probetas ensayadas en el tubo de impedancia. (Tabla 12). Las dimensiones de los paneles dependen de las propiedades físico-mecánicas del conjunto de capas y sus materiales. El espesor total de un panel varía entre 12 y 25 cm.

Losetas para pisos



Figura 26. Losetas de cemento para pisos. Fuente: [alfa.com.co]

En función de la contribución de la escoria a la durabilidad ante el ataque por dióxido de carbono, se proponen losetas para pisos exteriores (sobre mortero de nivelación). Dimensiones propuestas, según losas comerciales: 0.40 m * 0.40 m.

Con respecto a las características acústicas, se propone utilizar baldosas de concreto para su uso al interior de las edificaciones, con espesor de 1pg, con el fin de obtener mayor absorción acústica. Dimensiones 0.25m * 0.25m.

Cajas de inspección eléctrica



Figura 27. Caja de inspección eléctrica. Fuente: [konstruir.es.tl]

Se propone esta aplicación con el fin de proteger las redes eléctricas de la carbonatación. Se restringe el contacto con suelos sulfatados. Dimensiones externas: 0.55 x 0.55 x 0.60 m, internas: 0.50 x 0.50 x 0.60 m

Adoquines



Figura 28. Adoquines para pavimentos. Fuente: [Alessio Damato]

Aplicación para el uso en pavimentos peatonales, se deben usar en zonas libres de sulfatos. Dimensiones propuestas según adoquines característicos: 20 cm de longitud * 15 cm de ancho * 10 cm de profundidad.

5. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

No es recomendable la utilización del concreto de escoria de horno de cubilote como agregado fino para someterse a medios húmedos con sulfatos, pues se determinó que con porcentaje de sustitución del 20% e/a ocurrió una pérdida de masa de 2.47%, contra un 1.07% de pérdida sin reemplazo. El desprendimiento de la pasta fue proporcional al porcentaje de sustitución, y fue causado por la cristalización de sales en la superficie de las probetas.

Los ciclos de humedecimiento (en soluciones de sulfatos) y secado, en condiciones de servicio, generan un incremento del daño en el concreto. Principalmente este evento se da en estructuras que están en contacto con agua de mar, pues las mareas generan cambios periódicos del nivel de agua.

Los resultados indican que hay mayor difusión de la solución de soda cáustica en el concreto a mayor reemplazo e/a (0.31% de aumento de masa para el 20%, versus 0.24% sin reemplazo). Este fenómeno se debe a la reacción entre los álcalis del cemento y el agregado fino de EHC por su alto contenido de sílice. La reacción induce una expansión de la estructura del concreto, con posibles agrietamientos internos.

Respecto a la carbonatación, el agregado fino de escoria de horno de cubilote favorece la disminución del ingreso de dióxido de carbono al concreto. Para las probetas con 20% de sustitución se presentó una edad de vida útil más de 10 veces mayor a las probetas sin escoria.

La escoria de horno de cubilote como agregado fino contribuye a la absorción acústica del concreto. A mayor porcentaje de sustitución de escoria por arena, mayor es el índice de reducción de ruido NRC. Se presentó un índice (sin

redondeo) de 0.83 para el 20% de sustitución, en comparación con un NRC igual a 0.74 sin reemplazo.

El tubo de impedancia con el cual se realizó el estudio de las propiedades acústicas ofreció resultados favorables al utilizar frecuencias de 250, 315, 400, 630, 800, 1000, 1250 y 1600 Hz para cada probeta, pues se determinaron índices de reducción de ruido NRC en base a los coeficiente de absorción, que comparados con valores teóricos, estaban dentro de los rangos típicos de reducción acústica de algunos elementos de construcción absorbentes.

En términos de durabilidad se proponen elementos de construcción no estructurales como losas para pisos (sobre mortero de nivelación), adoquines y cajas de inspección eléctrica utilizando el material estudiado. Los elementos propuestos tienen en cuenta que la resistencia esperada con la que se ha desarrollado el diseño de mezcla es de 2000 psi.

Los elementos que se proponen, en función de las propiedades acústicas están ubicados al interior de las edificaciones. Son éstos losetas y paneles de concreto con escoria de horno de cubilote.

6. RECOMENDACIONES

Realizar estudios posteriores sobre la posible acción activadora de la solución sobre la escoria para que desarrolle un comportamiento aglomerante, en razón al comportamiento favorable que presentó el concreto de escoria de horno de cubilote respecto a la resistencia a compresión (sólo disminuyó un 24.39% con reemplazo del 20% contra un 44.86% sin reemplazo) después del ataque por sulfatos.

Efectuar ensayos de caracterización química más detallada a la escoria de horno de cubilote a través de métodos avanzados como la difracción de rayos x.

Evaluar las características de un concreto que utilice escoria pulverizada como componente del cemento, según los resultados arrojados por el análisis químico, descrito en el numeral 4.1.

Realizar estudios con mayores porcentajes de sustitución de escoria por arena. Se propone estudiar el 30%, 40% y 50% de sustitución, con una dosificación en base a una mayor resistencia a la compresión esperada con el fin de evaluar el comportamiento físico-mecánico, acústico y de manejabilidad del concreto de escoria de horno de cubilote, considerando los resultados de la presente investigación, respecto a durabilidad y absorción acústica, e incrementando las alternativas de elementos constructivos.

Tomar mayores tiempos de curado para caracterizar el material desde el punto de vista físico-mecánico de manera completa. Se recomienda comprobar resistencia a la compresión sin ataques químicos a 7, 14, 28, 56, 120, 180, 240 y 360 días.

Proponer ensayos que consideren la totalidad de los ataques que podría sufrir una estructura en servicio, complementándose con modelos matemáticos que realmente simulen los procesos de deterioro.

Adecuar con tecnología actual el equipo para el ensayo tubo de impedancia, mediante la utilización de una tarjeta electrónica de adquisición de datos para PC. Referencia de la tarjeta recomendada: 100 MS/s PC Based USB Digital Storage Oscilloscope DSO 2090 (40 MHz).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAMIREZ, Gloria y SALAZAR, Lady. Hormigones de alto desempeño, caso de estudio: hormigón auto-compactante. Guayaquil, 2009, 8p. Artículo de Tesis de Grado. Escuela Superior POLITÉCNICA DEL LITORAL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.
- [2] MARCHAND, J. Modeling the Behavior of Unsaturated Cement Systems Exposed to Aggressive Chemical Environments, Materials and Structures. En: RILEM, Vol. 34, No. 230, (2001). P. 195-200.
- [3] El aislamiento acústico en las edificaciones. [Documento electrónico]. México D.F. NOVIDESA. Boletín Técnico N° 3. (Diciembre. 2007) <http://www.novidesa.com.mx/uploads/boletin_tecnico_3.pdf>
- [4] OSBORNE, Geoffrey. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. Luton, Inglaterra. En: Cement and Concrete Composites, 1998.
- [5] BAQUERO, Arnaldo. Diseño, operación y control del cubilote. Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones UIS, 2000. p. 2.
- [6] SANCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología y Propiedades. 2 ed. Bogotá: Instituto del Concreto, 1997. 215 p. (Colección básica del concreto; no. 1)
- [7] Conceptos Básicos del Concreto: Propiedades del Concreto. [Documento electrónico]. México D.F. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (Julio. 2004) <<http://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>>
- [8] KOSMATKA, Steven; KERKHOFF, Beatrix; PANARESE, William y TANESI, Jussara. Diseño y mezclas de concreto. Portland Cement Association. Illinois, EE.UU., p 1-15.
- [9] CANO, Jesús et al. Cómputo para diseño de mezclas de concreto normal. [Documento electrónico]. México D.F. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2003. <<http://www.imcyc.com/cyt/noviembre03/computo.htm>>
- [10] CACERES, Arsenio. Materiales de ingeniería civil: Cemento Portland. [Documento electrónico]. Mayagüez. Universidad de Puerto Rico. 2007. <http://www.acaceres.addr.com/student_access/portland.pdf>
- [11] GONZÁLES, Manuel. Características de los Cementos Portland en Norteamérica. [Documento electrónico]. Lima. Asociación de Productores de Cemento, 1997. <http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/cemento/MGC43_cementos_norteamerica.pdf>
- [12] BOYD, A.J.; MINDESS, S. y SKALNY, J. Designing concrete for durability. En: Materiales de Construcción. Vol. 51, no. 263-264. (2001). P. 37-53. ISSN
- [13] ACI COMMITTEE 116. Cement and Concrete Terminology. (116: 2000: Farmington Hills, Michigan) American Concrete Institute.
- [14] TANS, Pieter y KEELING, Ralph. Annual Mean Concentrations at the Mauna Loa Observatory. La Jolla CA, 2012. [Documento electrónico] National Oceanic & Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory / Scripps Institution of Oceanography <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>; <scrippsco2.ucsd.edu/>; <<http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now/noaa-mauna-loa-co2-data.html>>

- [15] SOLOMON, Susan et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. En: Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. Vol. 106, no. 6 (2009) P. 1-6. ISSN.
- [16] MORENO, Eric et al. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. En: Ingeniería Vol. 8, no. 2 (2004) P. 117-130. ISSN.
- [17] DE GUTIÉRREZ, R; DEL VASTO, S y TALERO, Rafael. Chloride binding capacity of blended mortars. En: LATINCORR 2000 (No. 4: 2000: Cartagena de Indias). Memorias del 7mo Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección y 4to Congreso NACE Latinoamericano de Corrosión. Revista de Metalúrgica CENIM Vol. 36. Madrid. (2000).
- [18] ACI COMMITTEE 201. Guide to Durable Concrete (201: 2001: Farmington Hills, Michigan), American Concrete Institute.
- [19] OSMA, Julio y VILLAMIZAR, Vivian. Evaluación del efecto de la carbonatación sobre la velocidad del pulso ultrasónico en concreto. Bucaramanga, (2011). 103 p. Trabajo de Grado. Universidad INDUSTRIAL DE SANTANDER. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.
- [20] FORMTEX CPF LINER. Carbonation of concrete. [Documento electrónico]
<<http://www.fibertex.com/SiteCollectionDocuments/Carbonation.pdf>>.
- [21] Gadea J. et al. Reactividad árido-álcali en áridos empleados para hormigón. En: Materiales de Construcción. Vol. 60 (2010). P. 69-78. ISSN.
- [22] AMARAL DE LIMA, Luciana. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental, Barcelona, España. 1999. 265 p. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [23] Conceptos Básicos del Concreto: Cemento y concreto resistentes a sulfatos. [Documento electrónico]. México D.F. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (Octubre. 2006).
<<http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf>>
- [24] BALSECA, Eduardo y CORONEL, Kléber. Ataque de los sulfatos a los hormigones de alto desempeño. Guayaquil, 2009, 48p. Tesis de Grado. Escuela Superior POLITÉCNICA DEL LITORAL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.
- [25] BERRIDI, Iokin. Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón. Barcelona, 2008. 88 p. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [26] ESPINOZA, L y ESCALANTE, I. Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Portland ordinario. En: Nexo. Vol. 21. No. 01 (2008) p. 11-18. ISSN.
- [27] FERNANDEZ, A. et al. Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno. En: MATERIALES DB CONSTRUCCIÓN, Vol. 46. No. 241. (1996) p. 23-37 ISSN.
- [28] BOZA, Maile. Utilización de las escorias de acería como material de construcción. En: Ciencia & Futuro. Vol. 1. No. 04 (2011) p. 31-40. ISSN.
- [29] NAZER, A. et al. Una revisión de los usos de las escorias de cobre. XI Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, IBEROMET & CONAMET/SAM. Viña del Mar. (2010)

- [30] KUMAR, Binod. Utilization of Copper Slag as Fine Aggregate in Cement Concrete. Central Road Research Institute. Nueva Delhi. (2002).
- [31] LEON, Nilson et al. Evaluación experimental de unidades sílico-calcáreas a partir de escoria de alto horno y cal hidráulica para mampostería. En: Dyna. Vol. 76. No.160. Medellín (2009) ISSN.
- [32] ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Documentación: Escoria de alto horno granulada y molida para uso en concretos y morteros. Bogotá : ICONTEC, 1995. 14 p. (NTC 4018)
- [33] NRMCA, National Ready Mixed Concrete Association – FIHP. Federación Iberoamericana de Hormigón Premezclado. Adiciones del Cemento. En: Concreto en la práctica, ¿qué?, ¿por qué? y ¿cómo? [Documento electrónico] <<http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP30es.pdf>>
- [34] PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual. En: Materiales de Construcción. Vol 45. No. 239. (1995) p. 53-64 ISSN.
- [35] MEJÍA, Ruby et al. Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros y perspectivas de futuro. En: Revista Facultad de Ingeniería Univ. Antioquia. No. 48. (2009) p. 55-64 ISSN.
- [36] TROCHEZ, Jenny et al. Desempeño de mezclas cementicias binarias y ternarias basadas en metacaolín y humo de sílice.. X Congreso Nacional de corrosión y protección. En: Avances. No. 12. Colombia (2010) p. 21-27 ISSN.
- [37] SCOTT, H. C. Mitigating alkali silicate reaction in recycled concrete, Master Thesis in Civil Engineering, University of New Hampshire, March.(2006).
- [38] LARSEN. E.D. et al. Intelligent Control of Cupola Melting, E.D. Larsen, En: Technologies Company. (1997)
- [39] PEREZ, Paula. Evaluación experimental de los perfiles de composición química del metal en un horno de cubilote y comparación con algunos modelos matemáticos. Medellín. (2007) Tesis de Grado. 125 p. Universidad DE ANTIOQUIA.
- [40] TARTERA, Jordi. La fundición, evolución en la globalización. X ENCUENTRO INTERNACIONAL SOBRE CUBILOTES MODERNOS. Santander, España. 2005. En Fundidores. Marzo. (2006). p. 35-46. ISSN
- [41] GONZALEZ, Manuel. Guía introductoria a la durabilidad del concreto. Asociación Peruana de Productores de Cemento. Lima. (2007) 10 p. [Documento electrónico]
<http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/concreto/MGC16_guia_concreto.pdf>
- [42] BUITRAGO, Carlos y ORTIZ, Douglas. Metodología para evaluar la susceptibilidad del concreto expuesto a soluciones de sulfatos. Tesis de Grado. Bucaramanga. (2002). 178 p. Universidad INDUSTRIAL DE SANTANDER.
- [43] BARRETO, Miguel et al. Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. En: Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 No2, Agosto de 2009. p. 141-152. ISSN.
- [44] GRESS D. L. y KOZIKOWSKI, R. L. Accelerated ASR testing of concrete prisms incorporating recycled concrete aggregate, Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Quebec City, QC, Canada, June, (2000), pp. 1139-1148.
- [45] TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Reseach Institute, Estocolmo (1982).

- [46] SILVA, C. et al. Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones. En: Revista de la construcción. Vol. 6. No. 1. Santiago, Chile (2007). p. 88-97. ISSN.
- [48] Moreno, E.I. "Carbonation of Blended Cement Concretes", PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa, (1999).
- [49] RILEM Recommendations CPC-18, "Measurement of hardened concrete carbonation depth", Materials and structures, (Francia) 21:1988, No. 126, p. 453-455.
- [50] CASTAÑEDA, Jaime y GONZÁLEZ Álvaro. Medición del coeficiente de absorción del sonido. En: Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto (2004). Universidad TECNOLÓGICA DE PEREIRA. ISSN.
- [51] CRUZ, R. BEGAMBRE, O. y CORREA, C. Efecto de las emulsiones asfálticas con estireno-butadieno sobre las propiedades acústicas del concreto. 1 ed. Bucaramanga, Publicaciones Universidad Industrial de Santander. (2008).
- [52] GOLDSTEIN, J. et al. Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis de rayos X. 3ª ed. Nueva York (2002).
- [53] DURÁN, Edwin y PEÑA, Deyci. Correlación entre el contenido de agua del concreto, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Tesis de grado. Universidad INDUSTRIAL DE SANTANDER. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.
- [54] MALANCA, Rodrigo. Diseño de un ensayo acelerado para la determinación del ataque por sulfatos a estructuras de hormigón y alternativa propuesta para el diseño de un contenedor. Tesis de grado.
- [55] MORENO E.I. et al. Desempeño de las pinturas vinil-acrílicas contra la carbonatación del concreto. En: Ingeniería Revista Académica. Vol. 12 No. 1. (2008) p. 31-39. ISSN.
- [56] RODRIGUEZ, Marcelo et al. Medida del coeficiente de absorción acústica. Estimación de la velocidad del sonido en el aire. Universidad de SEVILLA [Documento electrónico]
<http://huespedes.cica.es/huespedes/dfa/acu/MedidadeCoeficientesdeAbsorcio_03_04.pdf>
- [57] CATÁLOGO CHILENO DE LA CONSTRUCCIÓN. Mecanismos de aislación térmica y acústica en edificios. Cámara Chilena de la construcción (2007).
- [58] CASAL, Jordi y MATEU, Enric. Tipos de muestreo. En: Rev. Epidem. Med. Prev. Vol. 1. P. 3-7. Universidad AUTÓNOMA DE BARCELONA. [Documento electrónico] <<http://minnie.uab.es/~veteri/21216/TiposMuestreo1.pdf>>

NORMAS REFERENCIADAS

ASTM C-1012 (2003) Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. American Society for Testing and Materials.

ASTM C-452 (2003) Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate. American Society for Testing and Materials.

ASTM C-1260 (2001) Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). American Society for Testing and Materials.

ASTM C-1293 (2001) Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. American Society for Testing and Materials.

ASTM C 384 (2004) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method. American Society for Testing and Materials.

NTC 673. (2010) Concretos. Ensayo de Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTC 121 (1982) Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTC 92 (1995) Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas o agregados. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTC 176 (1995) Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTC 237 (1995) Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTC 77 (2007) Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTC 1377 (1994) Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

A1. DENSIDAD DEL CEMENTO

DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRAULICO (ARGOS T-1)		
PRUEBA No.1		
Peso de la muestra de cemento	65	grs
Volumen inicial (Vo)	0.7	ml
Volumen final (Vf)	23	ml
Volumen (V = Vf - Vo)	22.3	ml
Peso especifico (Pe = W / V)	2.915	g/ml

DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRAULICO (ARGOS T-1)		
PRUEBA No.2		
Peso de la muestra de cemento	65	grs
Volumen inicial (Vo)	0.3	ml
Volumen final (Vf)	21.7	ml
Volumen (V = Vf - Vo)	21.4	ml
Peso especifico (Pe = W / V)	3.037	g/ml

DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRAULICO (ARGOS T-1)		
PRUEBA No.3		
Peso de la muestra de cemento	65	grs
Volumen inicial (Vo)	0.4	ml
Volumen final (Vf)	21.35	ml
Volumen (V = Vf - Vo)	20.95	ml
Peso especifico (Pe = W / V)	3.103	g/ml

DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRAULICO (ARGOS T-1)		
PRUEBA No.4		
Peso de la muestra de cemento	65	grs
Volumen inicial (Vo)	0.2	ml
Volumen final (Vf)	22.5	ml
Volumen (V = Vf - Vo)	22.3	ml
Peso especifico (Pe = W / V)	2.915	g/ml

MEDIDA DE VOLUMEN EN EL FRASCO DE LECHATIER	
t (min)	V (ml)
0	0.4
3	0.3
6	0.3

MEDIDA DE VOLUMEN CON EL CEMENTO (PRUEBA 2)	
t (min)	V (ml)
0	21.8
3	21.7
6	21.7

MEDIDA DE VOLUMEN EN EL FRASCO DE LECHATIER	
t (min)	V (ml)
0	0.8
3	0.7
6	0.6
9	0.7
12	0.7

MEDIDA DE VOLUMEN CON EL CEMENTO (PRUEBA 1)	
t (min)	V (ml)
0	23.3
3	22.9
6	23
9	23

MEDIDA DE VOLUMEN EN EL FRASCO DE LECHATIER	
t (min)	V (ml)
0	0.4
3	0.3
6	0.2
9	0.2

MEDIDA DE VOLUMEN CON EL CEMENTO (PRUEBA 1)	
t (min)	V (ml)
0	22.8
3	22.5
6	22.5

A2. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA UTILIZADA EN LA MEZCLA, SUMINISTRADO POR EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA

No Aplica	CALIDAD FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCIÓN	
F CC 507-006		
Rev.:0		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS		

MUNICIPIO:	BUCARAMANGA	AÑO:	2011
------------	-------------	------	------

PARAMETRO MES	Parámetros Físicoquímicos													Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL	
	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente Unidades Pt-Co	pH	Unidades de pH	Olor y Sabor & Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales		Muestras positivas E. Coli
Enero	90	0,95	0,80	4,1	7,19	0	0,05	46,1	65,5	3,4	26,7	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,95	0,70	3,5	7,27	0	0,05	51,7	69,5	3,8	26,8	N.D	1,2	N.D	168	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,00	5,9	7,15	0	0,06	44,9	69,1	4,0	27,6	N.D	1,1	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Abril	87	0,93	0,87	5,0	7,14	0	0,04	44,6	69,1	2,4	34,4	N.D	1,2	N.D	174	0	100	0	100	0,00
Mayo	93	1,02	0,69	3,8	7,12	0	0,04	39,5	62,9	2,5	29,8	N.D	1,3	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Junio	90	1,10	0,86	5,0	7,09	0	0,04	41,1	65,0	2,8	27,8	N.D	1,2	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Julio	93	1,08	0,96	5,0	7,24	0	0,05	49,0	65,7	3,1	26,7	N.D	1,0	N.D	186	0	100	0	100	0,28
Agosto	93	1,01	0,79	4,5	7,20	0	0,05	49,6	72,6	3,3	29,5	N.D	1,2	N.D	186	0	100	0	100	0,45
Septiembre	90	0,96	0,80	4,0	7,14	0	0,05	44,1	68,2	2,7	27,5	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,15
Octubre	93	0,98	0,71	3,6	7,11	0	0,04	41,2	61,3	2,8	30,7	N.D	2,1	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Noviembre	90	0,95	0,99	5,7	7,07	0	0,04	39,7	62,9	2,8	26,8	N.D	2,1	N.D	180	0	100	0	100	0,72
Diciembre	90	1,00	0,84	2,8	7,13	0	0,03	40,5	59,2	2,7	25,3	N.D	2,1	N.D	180	0	100	0	100	0,10
PROMEDIO	91	0,99	0,83	4,4	7,15	0	0,05	44,3	65,9	3,0	28,3	N.D	1,4	N.D	181	0,0	100	0,0	100	0,14
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	5,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/día	0	100	0	100	0-5

Convenciones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad Unidades Pt-Co: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable
Nota:	El IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"

A3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Para los agregados gruesos y los agregados finos (arena y escoria de horno de cubilote) se determinaron las siguientes propiedades.

- Gravedades específicas
- Peso unitario
- % de absorción
- % de vacíos.

Tabla de cálculo se muestra a continuación:

AGREGADO GRUESO

GRAVEDADES ESPECIFICAS

A=	Peso de la muestra en condicion S.S.S, en el aire	5000	Gramos
Pa=	Peso de la canasta, sumergida en agua	1785	Gramos
Pb=	Peso de la canasta + muestra S.S.S, sumergida en agua	4900	Gramos
B=	Peso de la muestra en agua (Pb-Pa)	3115	Gramos
C=	Peso de la muestra secada en el horno	4923	Gramos

CALCULOS

Gravedad especifica real=	$C/(C-B)$	2.72	Adim	
Gravedad especifica aparente=	$C/(A-B)$	2.61	Adim	
Gravedad especifica aparente S.S.S=	$A/(A-B)$	2.65	Adim	D**

PESO UNITARIO

CALIBRACION DEL MEDIDOR

P1=	Peso del medidor + Vidrio	3007	Gramos
P2=	Peso del medidor + Vidrio + Agua	5843	Gramos
V=	Volumen del medidor	$(P2-P1)/1000$	dcm ³

DATOS

Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos	
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	6722	Gramos	
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6347	Gramos	
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado	$(Pc-Pm)/V$	1477.79	Ka/m ³	E**
Peso unitario del agregado S.S.S. suelto	$(Ps-Pm)/V$	1345.56	Ka/m ³	

% de Absorcion	$((A-C)X100)/C$	1.56	%
----------------	-----------------	------	---

% de Vacios	$(D*1000-E)/(D*10)$	44.29	%
-------------	---------------------	-------	---

% de Humedad

Peso de la tara (Wt)	343.8	grs
Peso de la muestra humeda (Wmh)	1000	grs
Peso de la tara + Peso muestra humeda (Wt + Wmh)	1343.8	grs
Peso de la tara + Peso muestra seca al horno (Wt + Wms)	1337.3	grs

% de humedad	$H=((Wt+Wmh)-(Wt+Wms))/((Wt+Wms)-Wt)$	0.65	%
--------------	---------------------------------------	------	---

AGREGADO FINO

GRAVEDADES ESPECIFICAS

A=	Peso del frasco + Agua hasta la marca, en el aire	654	Gramos
B=	Peso de la muestra en condicion S.S.S, en el aire	500	Gramos
C=	Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca, en el aire	964	Gramos
D=	Peso de la muestra seca al horno	490.8	Gramos

CALCULOS

Gravedad especifica real=	$D/(A-C+D)$	2.71	Adim	
Gravedad especifica aparente=	$D/(A+B-C)$	2.58	Adim	
Gravedad especifica aparente S.S.S=	$B/(A+B-C)$	2.63	Adim	E**

PESO UNITARIO

CALIBRACION DEL MEDIDOR

P1=	Peso del medidor + Vidrio	3007	Gramos
P2=	Peso del medidor + Vidrio + Agua	5843	Gramos
V=	Volumen del medidor	2.836	dcm ³

DATOS

Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos	
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7217	Gramos	
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6481.5	Gramos	
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado	$(Pc-Pm)/V$	1652.33	Ka/m ³	F**
Peso unitario del agregado S.S.S. suelto	$(Ps-Pm)/V$	1392.98	Ka/m ³	

% de Absorcion	$((B-D)X100)/D$	1.87	%
----------------	-----------------	-------------	---

% de Vacios	$(E*1000-F)/(E*10)$	37.21	%
-------------	---------------------	--------------	---

% de Humedad

Peso de la tara (Wt)	300.3	grs
Peso de la muestra humeda (Wmh)	500	grs
Peso de la tara + Peso muestra humeda (Wt + Wmh)	800.3	grs
Peso de la tara + Peso muestra seca al horno (Wt + Wms)	793.5	grs

% de humedad	$H=((Wt+Wmh)-(Wt+Wms))/((Wt+Wms)-Wt)$	1.38	%
--------------	---------------------------------------	-------------	---

ESCORIA

GRAVEDADES ESPECIFICAS

A=	Peso del frasco + Agua hasta la marca, en el aire	654	Gramos
B=	Peso de la muestra en condicion S.S.S, en el aire	500	Gramos
C=	Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca, en el ai	943	Gramos
D=	Peso de la muestra seca al horno	495.8	Gramos

CALCULOS

Gravedad especifica real=	$D/(A-C+D)$	2.40	Adim	
Gravedad especifica aparente=	$D/(A+B-C)$	2.35	Adim	
Gravedad especifica aparente S.S.S=	$B/(A+B-C)$	2.37	Adim	E**

PESO UNITARIO

CALIBRACION DEL MEDIDOR

P1=	Peso del medidor + Vidrio	3007	Gramos
P2=	Peso del medidor + Vidrio + Agua	5843	Gramos
V=	Volumen del medidor $(P2-P1)/1000$	2.836	dcm ³

DATOS

Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7430	Gramos
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6609	Gramos
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado	$(Pc-Pm)/V$	1727.43	Ka/m ³ F**
Peso unitario del agregado S.S.S. suelto	$(Ps-Pm)/V$	1437.94	Ka/m ³

% de Absorcion	$((B-D)X100)/D$	0.85	%
----------------	-----------------	-------------	---

% de Vacios	$(E*1000-F)/(E*10)$	27.10	%
-------------	---------------------	--------------	---

% de Humedad

Peso de la tara (Wt)	308.7	grs
Peso de la muestra humeda (Wmh)	500	grs
Peso de la tara + Peso muestra humeda (Wt + Wmh)	808.7	grs
Peso de la tara + Peso muestra seca al horno (Wt + Wms)	806	grs

% de humedad	$H=((Wt+Wmh)-(Wt+Wms))/((Wt+Wmh)-Wt)$	0.54	%
--------------	---------------------------------------	-------------	---

A4. GRANULOMETRÍA Y MÓDULO DE FINURA DEL AGREGADO FINO

ARENA				
TAMIZ	PESO RETENIDO (Grs)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	26.30	2.63	2.63	97.37
8	53.00	5.30	7.93	92.07
16	109.30	10.94	18.87	81.13
30	220.50	22.06	40.93	59.07
50	33.80	3.38	44.31	55.69
100	482.70	48.29	92.61	7.39
FONDO	73.90	7.39	100.00	0.00
TOTAL	999.50			

SEGÚN EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS:

% pasa nº 200 > 50% Suelo Grueso

% pasa nº 4 > 50% Arena

%pasa nº 200 < 5% Arena SW o SP

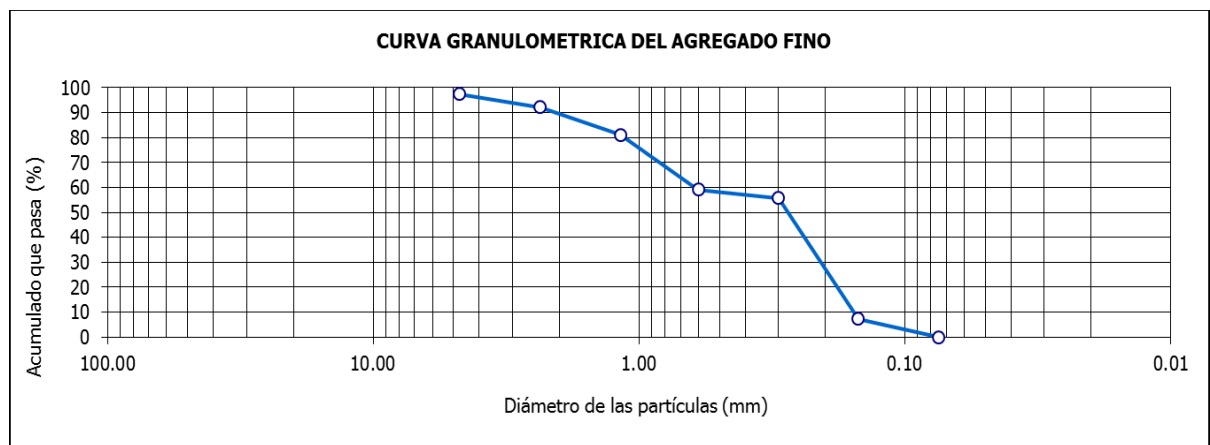
D60 = 0.63

D30 = 0.21

D10 = 0.16

$C_u = D_{60}/D_{10} = 3.75$ >4 NO

$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}) = 0.46$ Entre 1 y 3 NO



Conclusión: SP Arena MAL gradada, con grava, con pocos finos o sin ellos

ESCORIA TRITURADA				
TAMIZ	PESO RETENIDO (Grs)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	32.20	3.23	3.23	96.77
8	227.80	22.82	26.05	73.95
16	351.40	35.21	61.26	38.74
30	164.30	16.46	77.72	22.28
50	32.40	3.25	80.96	19.04
100	111.30	11.15	92.12	7.88
FONDO	78.70	7.88	100.00	0.00
TOTAL	998.10			

SEGÚN EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS:

% pasa nº 200 > 50% Suelo Grueso

% pasa nº 4 > 50% Arena

%pasa nº 200 < 5% Arena SW o SP

D60 = 1.8

D30 = 0.84

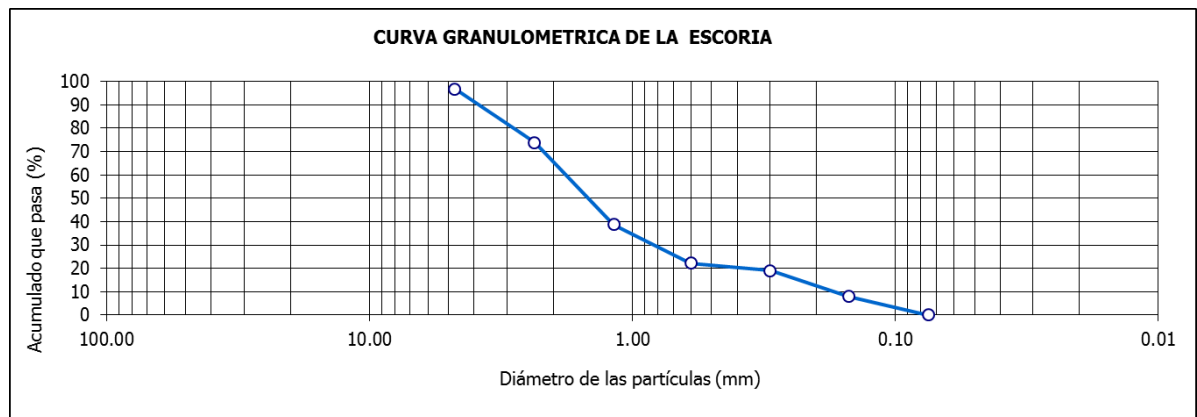
D10 = 0.172

$Cu = D60/D10 = 10.46$

>4 SI

$Cc = (D30)^2 / (D10 * D60) = 2.279$

Entre 1 y 3 SI

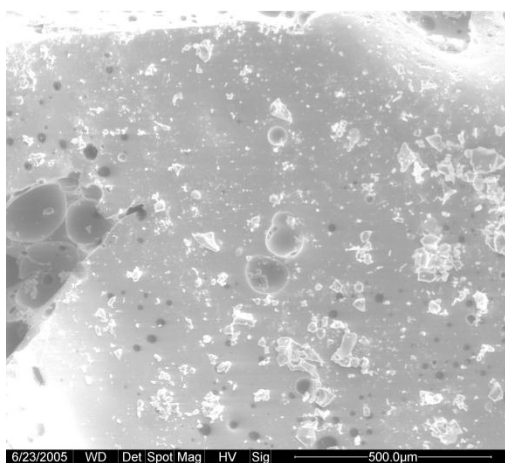


Conclusión: Escoria triturada tipo SW "Arenas BIEN gradadas", con grava, con pocos finos o sin ellos.

A5. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA MEDIANTE ANÁLISIS DE ENERGÍA DISPERSIVA - ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X (EDX)

MUESTRA 1

Weight % by Element								
Filename	O K	AlK	SiK	K K	CaK	TiK	MnK	FeK
Escoria1EDX.spc	42.99	8.15	26.29	0.65	19.03	0.35	0.73	1.82
Atomic % by Element								
Filename	O K	AlK	SiK	K K	CaK	TiK	MnK	FeK
Escoria1EDX.spc	60.11	6.76	20.94	0.37	10.62	0.16	0.3	0.73



FiguraA5.1. Muestra 1 de escoria de horno de cubilote al microscopio. Fuente [Lavco Ltda.]

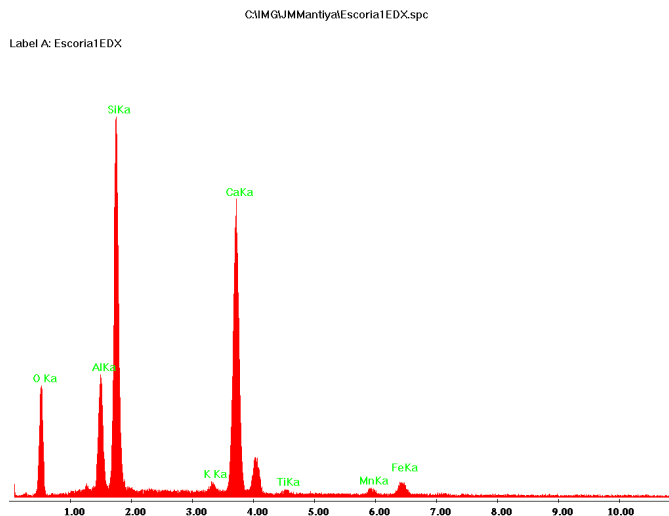


Figura A5.2. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 1. Fuente [Lavco Ltda.]

MUESTRA 2

Weight % by Element							
Filename	O K	AlK	SiK	K K	CaK	MnK	FeK
Escoria2EDX.spc	45.4	7.88	24.92	0.7	18.61	0.76	1.72
Atomic % by Element							
Filename	O K	AlK	SiK	K K	CaK	MnK	FeK
Escoria2EDX.spc	62.45	6.42	19.53	0.4	10.22	0.3	0.68

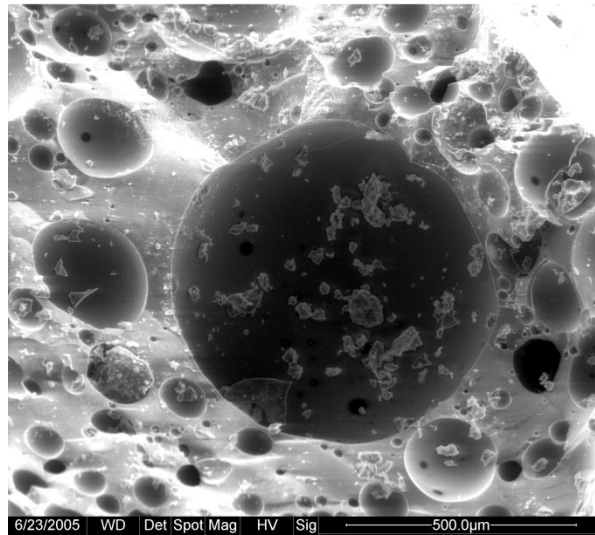


Figura A5.3. Muestra 2 de escoria de horno de cubilote al microscopio. Fuente [Lavco Ltda.]

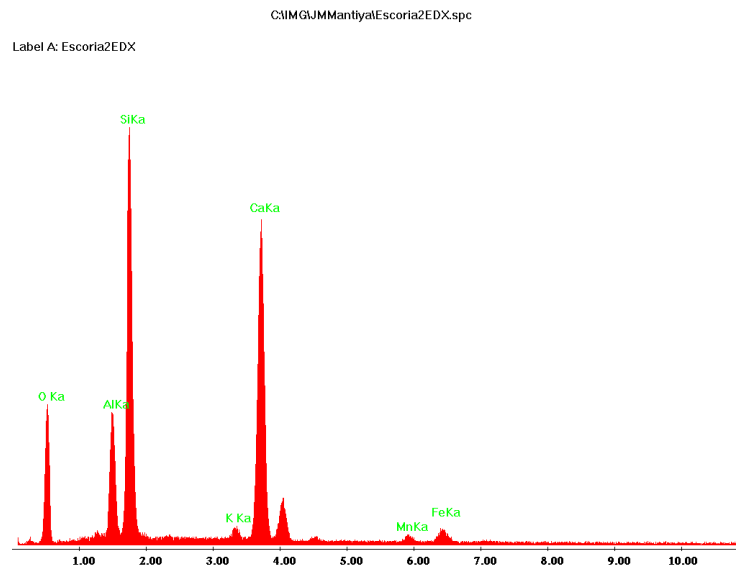


Figura A5.4. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 2. Fuente [Lavco Ltda.]

MUESTRA 3

Weight % by Element								
Filename	C K	O K	AlK	SiK	K K	CaK	MnK	FeK
Escoria3EDX.spc	4.68	43.11	5.79	20.43	0.85	21.58	0.99	2.57
Atomic % by Element								
Filename	C K	O K	AlK	SiK	K K	CaK	MnK	FeK
Escoria3EDX.spc	8.37	57.95	4.61	15.64	0.46	11.58	0.39	0.99

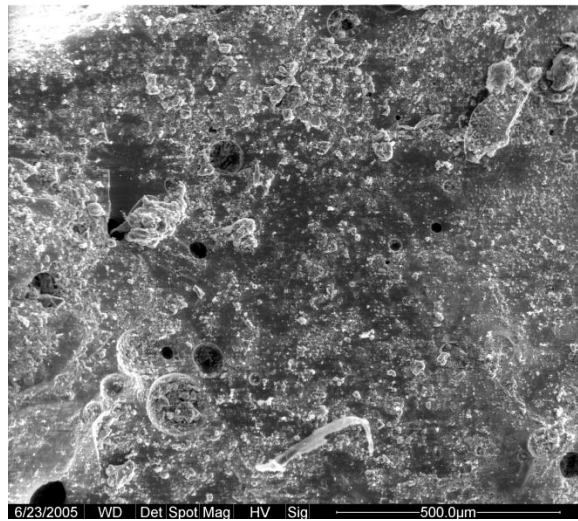


Figura A5.5. Muestra 3 de escoria de horno de cubilote al microscopio. Fuente [Lavco Ltda.]

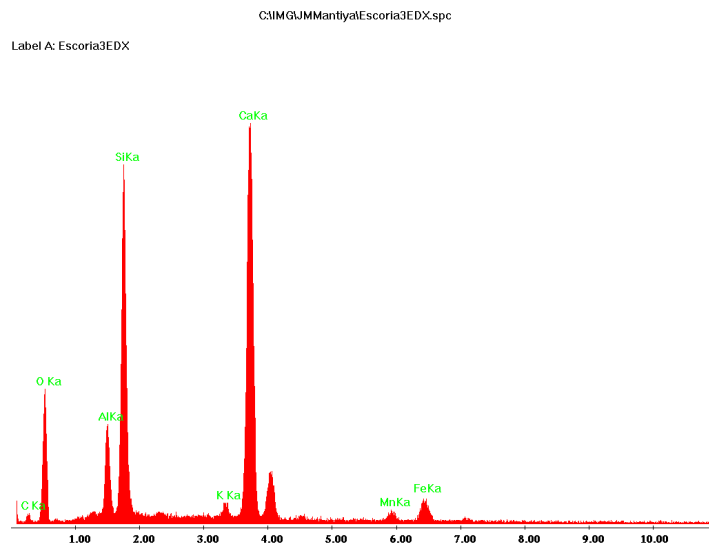


Figura A5.6. Espectro de rayos x (método EDX) de la muestra No. 3. Fuente [Lavco Ltda.]

ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN EL MÉTODO ACI

Sin reemplazo

RESISTENCIA A LOS 28 DIAS	2000.00	PSI	14	Mpa
DENSIDAD CEMENTO	3000.00	Kg/m3	3.00	g/m3

AGREGADO GRUESO	TAMAÑO MAXIMO	12.50	mm	0.492	Pulg
	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	12.50	mm	0.492	Pulg
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1479.23	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1347.18	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2610.00	Kg/m3		
	ABSORCION	1.56	%	0.0156	
	HUMEDAD NATURAL	0.49	%	0.0049	
	TEXTURA	Rugosa y forma redondeada			

AGREGADO FINO	MODULO DE FINURA (MF)	2.07			
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1650.00	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1391.02	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2580.00	Kg/m3		
	ABSORCION	1.87	%	0.0187	
	PORCENTAJE DE ARCILLA	0.00	%	0	
	ENSAYO COLORIMETRICO	2.00	-		
	HUMEDAD NATURAL	0.83	%	0.0083	

ASENTAMIENTO	4	cm		
CONTENIDO DE AIRE	2.5	%	0.025	
CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO	200	Lts	0.2	
REALACION (a/c)	0.6833	Adim		
CONTENIDO DE CEMENTO (C)	292.6972	Kg/m3	292.6972	Lts
VOLUMEN DE CEMENTO POR m3 DE CONCRETO (Vc)	0.098	m3/m3		
CONTENIDO DE GRAVA (b/bo), CONOCIENDO EL MF Y TMN .	0.630	Adim		
bo' (DATOS DEL AGREGADO GRUESO)	0.567	Adim		
VOLUMEN DE GRAVA POR m3 (B)	0.357	m3/m3		Vol. Diseño
CONTENIDO DE ARENA (Va)	0.320	m3/m3		0.975

PESO DE LOS MATERIALES				
DESCRIPCION	DENSIDAD	PESO	VOLUMEN	PROPORC
CEMENTO	3000.00	292.70	0.098	1.00
AIRE	0.00	0.00	0.025	
AGUA	1000.00	200.00	0.200	
GRAVA	2610.00	931.91	0.357	3.18
ARENA	2580.00	826.58	0.320	2.82
		TOTAL	1.000	

CEMENTO	ARENA	TRITURAD
1.0	2.8	3.2

Con reemplazo del 20%

RESISTENCIA A LOS 28 DIAS	2000.00	PSI	14	Mpa
DENSIDAD CEMENTO	3000.00	Kg/m3	3.00	g/m3

AGREGADO GRUESO	TAMAÑO MAXIMO	12.50	mm	0.492	Pulg
	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	12.50	mm	0.492	Pulg
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1479.23	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1347.18	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2610.00	Kg/m3		
	ABSORCION	1.56	%	0.0156	
	HUMEDAD NATURAL	0.49	%	0.0049	
	TEXTURA	Rugosa y forma redondeada			

AGREGADO FINO	MODULO DE FINURA (MF)	2.34			
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1665.40	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1401.80	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2534.00	Kg/m3		
	ABSORCION	1.67	%	0.01666	
	PORCENTAJE DE ARCILLA	0.00	%	0	
	ENSAYO COLORIMETRICO	2.00	-		
HUMEDAD NATURAL	0.77	%	0.00772		

ASENTAMIENTO	4	cm		
CONTENIDO DE AIRE	2.5	%	0.025	
CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO	200	Lts	0.2	
REALACION (a/c)	0.6833	Adim		
CONTENIDO DE CEMENTO (C)	292.6972	Kg/m3	292.6972	Lts
VOLUMEN DE CEMENTO POR m3 DE CONCRETO (Vc)	0.098	m3/m3		
CONTENIDO DE GRAVA (b/bo), CONOCIENDO EL MF Y TMN .	0.630	Adim		
bo' (DATOS DEL AGREGADO GRUESO)	0.567	Adim		
VOLUMEN DE GRAVA POR m3 (B)	0.357	m3/m3		Vol. Diseño
CONTENIDO DE ARENA (Va)	0.320	m3/m3		0.975
PESO DE LOS MATERIALES				
DESCRIPCION	DENSIDAD	PESO	VOLUMEN	PROPORC
CEMENTO	3000.00	292.70	0.098	1.00
AIRE	0.00	0.00	0.025	
AGUA	1000.00	200.00	0.200	
GRAVA	2610.00	931.91	0.357	3.18
ARENA	2534.00	811.84	0.320	2.77
TOTAL		1.000		

CEMENTO	Ag fino	TRITURAD
1.0	2.8	3.2

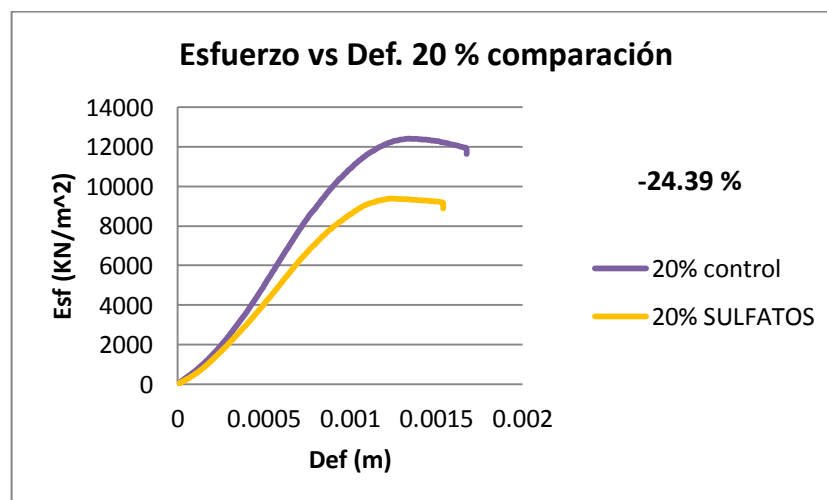
ANEXO C. MEMORIAS DEL ENSAYO DE ATAQUE POR SULFATOS

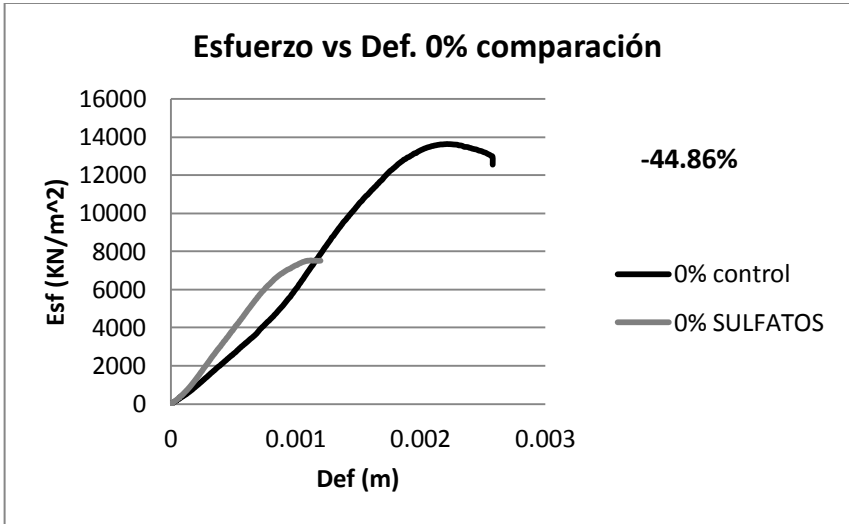
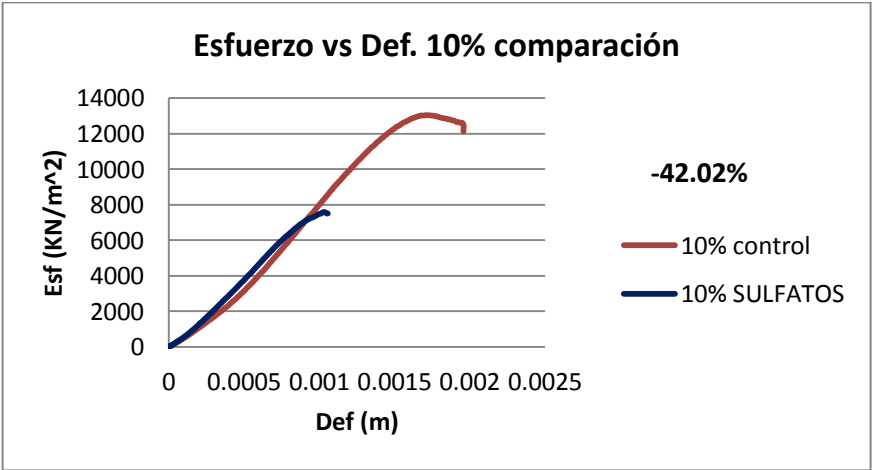
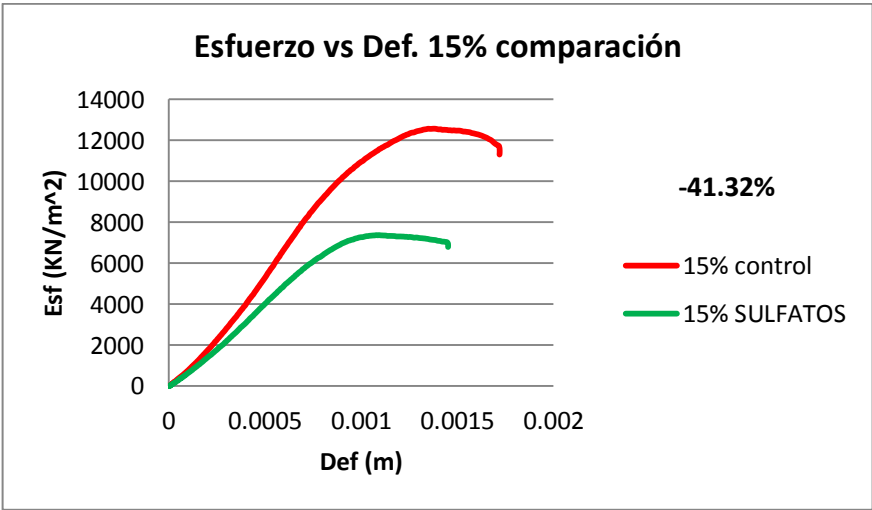
La tabla de variación de masa mostró los siguientes resultados:

Tiempo (días)	0% prom [gr]	10% prom [gr]	15% prom [gr]	20% prom [gr]
0	3755	3747.3	3622.1	3748.2
1/24	3783.8	3784.2	3767.5	3775.3
1/6	3801.6	3806.4	3696	3792.4
1	3832.1	3843.5	3738	3819.1
2	3774.5	3762.1	3659.7	3740
3	3875.3	3881.3	3775.7	3851.4
4	3814.4	3799.7	3660.3	3774.4
4.3333	3860	3868.5	3758.7	3838.9
7	3845.6	3845.4	3738.8	3822.2
8	3880	3884.5	3781.4	3857.6
9	3816.6	3802.7	3673.8	3790.6
10	3873.8	3880.2	3773.1	3900.3
11	3810.4	3784.8	3655.5	3782.96
11.3333	3851.6	3856.5	3742.1	3829.5
14	3832.4	3832.2	3713.2	3804.1
% variación	1.07%	1.24%	1.59%	2.47%

El % de variación presentado se calculó desde que comenzó a descender la masa húmeda.

Resistencia a la compresión:





Secuencia fotográfica del proceso de sulfatación:



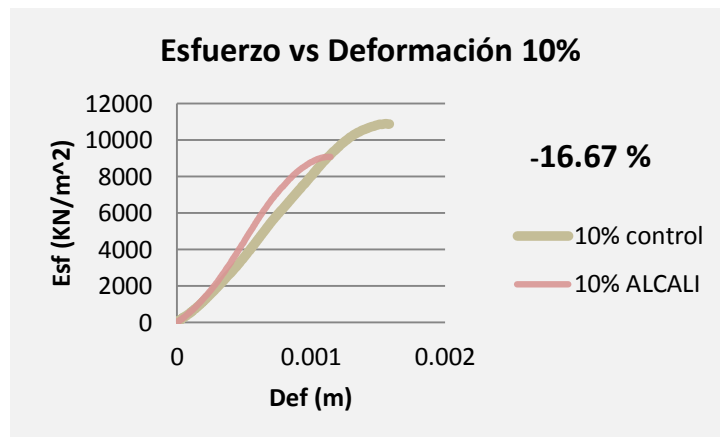
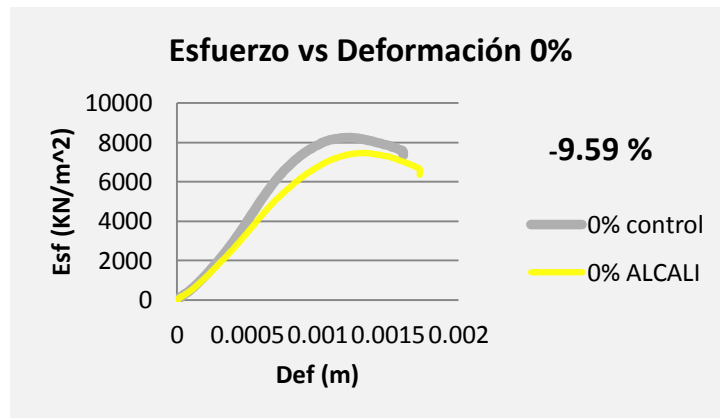
Figura C1 Secuencia fotográfica del proceso de sulfatación. Fuente [Autor]

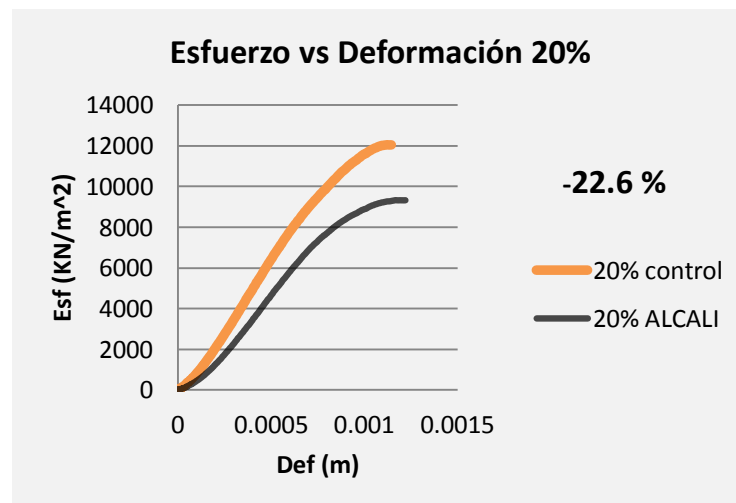
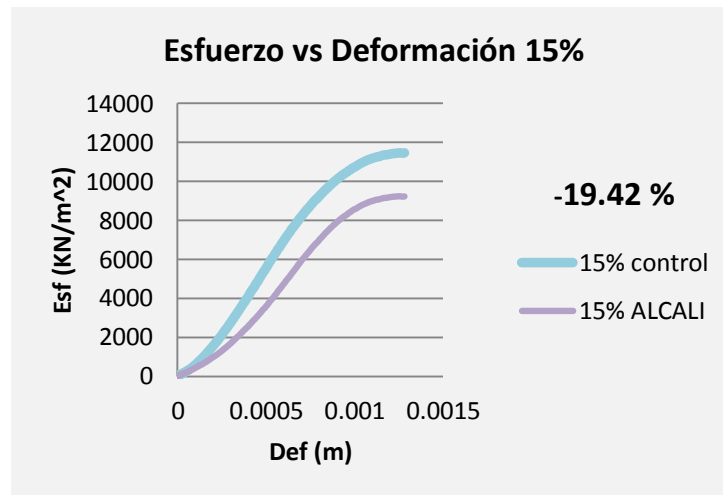
ANEXO D. MEMORIAS DEL ENSAYO DE ACELERACIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

La tabla de variación de masa mostró los siguientes resultados:

Soda caustica 40 grs por cada litro			Variación de la masa: Ensayo de aceleración de la Reacción Álcali-Agregado										
Fecha de inicio: Nov 29/2011													
Curado de probetas Julio 13/ 2011			Incremento	Dia No.0	Dia No.2	Dia No.4	Dia No.6	Dia No.8	Dia No.10	Dia No.12	Dia No.14	Dia No.16	Aumento
PROBETA	Peso seco	S.S.S	Inicial %	29-nov	30-nov	01-dic	02-dic	05-dic	07-dic	09-dic	12-dic	15-dic	%
0% Ic	3685.60	3896.80	5.73										
0% II	3652.20	3861.47		3861.47	3875.50	3877.10	3878.20	3880.60	3881.90	3883.30	3884.00	3885.00	0.25%
0% III	3693.40	3905.03		3905.03	3916.20	3917.60	3918.70	3921.10	3922.20	3923.80	3924.40	3925.60	0.24%
10% Ic	3721.80	3909.40	5.04	3909.40									
10% II	3753.40	3942.57		3942.57	3944.90	3946.90	3948.00	3950.30	3951.80	3953.20	3954.00	3955.20	0.26%
10% III	3692.00	3878.08		3878.08	3898.60	3900.30	3901.60	3903.60	3905.20	3906.70	3907.80	3908.90	0.26%
15% Ic	3722.10	3904.50	4.90	3904.50									
15% II	3711.20	3893.05		3893.05	3910.70	3912.70	3914.00	3916.50	3917.90	3919.50	3920.50	3921.30	0.27%
15% III	3736.00	3919.06		3919.06	3925.10	3927.00	3928.20	3930.60	3932.72	3933.60	3934.50	3935.30	0.26%
20% Ic	3716.00	3896.30	4.85	3896.30									
20% II	3639.70	3816.23		3816.23	3851.50	3853.70	3854.80	3857.90	3859.50	3861.40	3862.10	3863.10	0.30%
20% III	3650.60	3827.65		3827.65	3861.80	3863.70	3865.10	3868.20	3869.80	3871.70	3872.80	3873.70	0.31%

Resistencia a la compresión





Inspección visual:



Figura D1 Aspecto de la probeta del 20% posterior al ensayo. Fuente [Autor]

ANEXO E. MEMORIAS DEL ENSAYO DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Profundidad de penetración:

Muestra	Penetración (cm)			
0% - II	Completa (Sin color fucsia)			
0% - III	Completa (Sin color fucsia)			
10% - II	Completa (Levemente pigmentada)			
10% - III	Completa (Levemente pigmentada)			
15% - II	Min	2.1	Máx.	3.2
15% - III	Min	3.3	Máx.	3.9
20% - II	Min	1.9	Máx.	3.1
20% - III	Min	2.8	Máx.	3.2

Resistencia a la tracción indirecta:

Muestra	Carga Kg	Media (Kg)	Desv. Estándar
0% - 1	3200	3450	353.55
0% - 2	3700		
10% - 1	3000	3400	565.69
10% - 2	3800		
15% - 1	3350	4175	1166.73
15% - 2	5000		
20% - 1	4800	4600	282.84
20% - 2	4400		

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times l \times d}$$

% Sustitución	Resistencia a la Tracción indirecta (Kpa)
0%	848.271
10%	835.977
15%	1026.531
20%	1131.028

Cálculo de la edad de vida útil:

$$K = \frac{X}{\sqrt{t}} \quad T_1 = T_2 \frac{C_{s2}}{C_{s1}}$$

$C_{s2} = 70\%$ Ensayo

$C_{s1} = 0.03918\%$ Servicio

% Sustitución	Penetración [mm]	Desv. Estándar	t exposición [hr]	K (mm/hr ^{0.5})	K (mm/año ^{0.5})	T vida útil (años) Cs=70%	T vida útil (años) Cs=0.03918%
0%	100	0	15	25.81988897	2416.609195	0.000273973	0.489361628
10%	99	1	15	25.56169008	2392.443103	0.000279535	0.499297651
15%	31.25	3.75	15	8.068715305	755.1903733	0.002805479	5.011063068
20%	27.5	2.958039892	15	7.100469468	664.5675285	0.003622778	6.470897557

Nota: Se asumió un recubrimiento de 4 cm

ANEXO F. MEMORIAS DEL ENSAYO ACÚSTICO DEL TUBO DE IMPEDANCIA

Mediciones de amplitud de onda en función de la distancia d (de muestra a micrófono):
0%

Prob. 0% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 0% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	139.8	F=1000	0	140
	2.3	159.6		6.2	180
Max	3.5	134.4	Max	13.4	120
456	6.5	96	190	21.8	180
	13.6	180		31	110
Min	29.5	108.6	Min	38.8	180
72	30.4	186	85	47.4	110
	48	138		56.8	185
	51.5	456		64.5	120
	68	110.4		75.2	180
	96	72		84.7	110
F = 315 Hz	0	160		91.5	190
	20.7	320		101.5	85
	21.2	350		109.3	180
Max	27	80	F=1250	0	70
700	37.4	80	Max	11.3	70
	41.2	320	70	22.6	50
Min	58.5	80		45.7	70
80	61.6	325	Min	55.5	50
	100.2	480	40	86.5	70
	94.5	150		94.2	45
	100	700		97.2	65
	107.5	160		103	60
F=400 Hz	0	360		105	40
	18.1	420	F=1600	0	140
Max	31.5	270	Max	5.9	120
510	46.4	480	320	9.8	290
	49.9	510		15.4	110
Min	72.8	300	Min	20.9	290
160	102.8	300	100	25.9	110
	86.3	440		30.6	290
	104	240		36.4	105
F=630 Hz	0	80		41.2	300
Max	10.1	120		47.3	100
240	26.6	160		53	300
Min	74	140		63.8	305
80	87	180		69.3	120
	91	180		74.8	300
F=800 Hz	0	95		80.5	120
Max	28	100		86	300
120	36	60		92	120
	46.1	105		96.8	320
Min	63.2	60		101.5	120
60	87.8	120			
	99.7	60			

Prob. 0% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 0% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	180	F= 1000 Hz	0	105
Max	8.8	270	Max	6.7	125
320	30.1	150	145	12	100
	52.7	320		22.3	130
Min	59.8	150	Min	32.4	100
90	90.4	240	80	39.2	140
	96.3	90		49.5	100
F= 315 Hz	0	180		57.8	145
Max	12.7	160		67.2	100
300	21	260		76.7	130
	22.4	120		86.5	95
Min	23.6	100		94.1	140
80	41	220		101	80
	61.2	80	F=1250 Hz	0	110
	71.8	200	Max	10.5	95
	97.5	140	140	17.3	140
	99.5	300		24	95
F=400 Hz	0	400	Min	31.2	120
Max	13.2	350	80	36.7	80
520	18	430		44	135
	33.3	360		66.8	95
Min	43.7	470		74	122
350	56.2	390		79.5	100
	69.8	500		89.2	122
	56.4	508		95.7	85
	86.4	520	F= 1600 Hz	0	590
	103.9	370	Max	3.9	200
F= 630 Hz	0	160	600	11	550
Max	21	160		19.8	230
280	26.9	240	Min	22.4	580
	40.4	150	200	25.4	270
Min	41.3	280		27.8	520
150	45.2	180		30.2	240
	55.3	260		33.5	600
	68.5	180		36.5	300
	84.3	240		44.4	590
	97.8	170		48.1	320
F= 800 Hz	0	95		50.2	550
Max	11.5	80		53.4	230
102	25	100		56.8	590
	38	80		64.1	230
Min	48.6	100		68	580
80	58.6	80		76.8	230
	77.6	100		78.8	570
	86.2	80		86.2	200
	93.2	102		97.8	560

10%

Prob. 10% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 10% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	200	F=1000	0	140
Max	23	230	Max	5.8	240
470	30	100	240	14.6	140
	32.3	215		22.4	240
Min	52	470	Min	33.1	140
70	96	70	105	44.8	230
	108.8	190		48.2	120
F = 315 Hz	0	130		57.3	210
Max	20.9	220		70.8	125
320	34.8	160		76	190
	40.4	240		85.1	115
Min	40.8	320		92.3	200
35	42.3	180		102.4	105
	60.5	35	F=1250	0	60
	101	320	Max	16.6	80
	111	160	80	27	60
F = 400 Hz	0	290		31.4	80
Max	5.5	400	Min	35.6	55
500	19.6	320	55	44.5	80
	42.6	280		50.5	55
Min	35.4	400		72.5	65
240	52.2	240		80.2	55
	69	500		86.5	75
	72.3	280		94.7	55
	86.3	440		101.8	75
	103.7	270	F=1600	0	130
	109	430	Max	4.6	80
F = 630 Hz	0	165	140	10	140
Max	14.6	160		15.4	80
200	28.3	190	Min	20.8	140
	33.5	160	75	25.2	80
Min	54.7	200		31.8	140
140	66	150		36.9	75
	68.3	140		43.9	140
	87	180		47.8	75
F = 800 Hz	0	80		57.8	80
Max	10.5	70		64.7	140
105	44	100		69.8	80
	51.3	60		65.3	140
Min	62.2	100		81	90
60	64	70		86.7	140
	75.5	105		92.7	90
	86.3	60		96.5	140
	90.5	105		103.3	85
	101	60			

Prob. 10% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 10% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	180	F = 1000 Hz	0	115
Max	9.5	210	Max	5	140
230	28.4	180	160	15.2	100
	51.5	230		24.3	160
Min	61.2	165	Min	34.9	90
140	93.2	220	80	39.5	150
	97.4	140		46.6	80
F = 315 Hz	0	160		56.2	150
Max	4	140		65.6	100
310	20.4	230		76.2	155
	36.5	140		83.6	100
Min	52.8	200		91.5	155
75	61.2	75		101.2	80
	75.5	250	F=1250 Hz	0	60
	95.5	140	Max	10.9	50
	100	310	62	31.2	60
F = 400 Hz	0	370		38.5	45
Max	13.6	320	Min	45.4	62
550	19	390	40	52.8	45
	31.2	300		58.8	58
Min	49.8	550		63.6	45
250	52.7	340		72.5	55
	69.2	410		80.2	45
	77.6	300		85.6	60
	94.2	420		95.7	40
	104.8	250		99.7	50
F = 630 Hz	0	220	F = 1600 Hz	0	225
Max	10.1	160	Max	3.7	520
250	30.6	220	560	9.1	140
	40.4	135		13.8	560
Min	55.6	220	Min	19.8	130
135	72.5	180	125	24.5	520
	82.3	220		31.5	140
	96	180		35.5	520
	106.2	250		40.8	130
F = 800 Hz	0	95		47	500
Max	25	100		53.2	130
110	35.8	85		59.2	500
	48.4	100		63.8	130
Min	59.8	80		69.2	500
65	61.6	105		75.5	135
	71.3	85		80.8	480
	75.2	110		85.8	130
	84.4	75		91.5	480
	88.3	110		96.2	125
	99.5	65		102	440

Prob. 10% - 3	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 10% - 3	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	110	F= 1000 Hz	0	140
Max	6.7	200	Max	5.8	180
390	9.6	110	180	12.9	110
	13.2	260		21.4	180
Min	21	180	Min	31.1	110
70	29.3	140	100	40.8	180
	30	70		47.8	100
	52.2	390		58	170
	73	80		66.7	100
	74	200		84.7	100
	97.4	80		76	165
F=315	0	190		91.8	165
Max	7.5	160		102.2	100
340	17.8	280	F= 1250 Hz	0	60
	20.7	320	Max	3.9	70
Min	28.7	100	80	36.9	50
80	61.5	80		29.5	75
	80.4	340	Min	37.4	35
	86.6	160	35	44.9	75
	102	280		76.5	80
F= 400 Hz	0	320		64.4	50
Max	15.3	260		87.5	80
500	18.9	440	F= 1600 Hz	0	180
	32	220	Max	4	100
Min	37.5	480	305	9.5	220
200	39.7	500		14.7	100
	71.8	310	Min	20.9	230
	102	440	100	26.6	110
	104.5	200		31.5	270
	111.2	490		37.5	105
F= 630 Hz	0	140		42.1	300
Max	9.9	120		47.4	105
240	30.2	180		53.8	305
	38.9	220		58.6	110
Min	54.8	240		64.2	305
120	43.9	140		69.2	120
	72.1	140			
	114.5	220			
F= 800 Hz	0	85			
Max	25.6	65			
120	47.4	100			
	51.2	70			
Min	61.2	120			
65	81.8	65			
	89.9	110			
	101.6	65			

15%

Prob. 15% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 15% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	180	F=1000	0	140
Max	6.7	120	Max	5.3	180
400	9.6	300	180	14.8	120
	30.1	115		24.4	180
Min	50.8	400	Min	33	115
115	73.7	125	105	38.9	180
	108.8	180		46.5	105
F=315 Hz	0	170		57.8	180
Max	24.3	120		66.8	115
410	19.3	230		75.7	170
	64.7	215		84.8	115
Min	82	170		91.5	180
120	100.8	400		99.5	115
	108	170	F=1250	0	60
F = 400 Hz	0	410	Max	4.6	75
Max	15.3	340	80	7.5	55
520	50.3	520		18.3	80
	54.2	360	Min	23.4	50
Min	69.8	500	40	29.2	70
240	75.3	355		36.4	40
	96.2	450		45.7	80
	105	250		53	55
	114.3	240		59	70
F=630 Hz	0	200		64	50
Max	12.9	85		87	80
260	14.9	200		93.6	60
	39.3	260		100.2	45
Min	42.2	140	F=1600	0	290
85	54.7	250	Max	4	120
	52.8	140	560	9.2	390
	57.5	230		14.9	135
	64	170	Min	20.8	440
	86.5	240	120	26.3	140
	95.8	160		31.3	520
	100.5	260		37.2	145
Max	11.6	70		47	170
120	23	90		55	555
	38.2	70		58.3	160
Min	46.3	100		73.5	510
70	53.7	70		87	220
	68.3	95		83.8	520
	50.2	80		85.8	320
	74.7	120		94.2	525
	83.3	110		97.5	320
	98.2	75		99.2	560

Prob. 15% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 15% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	180	F=1000 Hz	31.2	100
Max	16.8	220	Max	38.7	145
300	30	90	170	48	100
	51.9	300		57.3	170
Min	62.2	140	Min	60	105
90	73	300	90	75.3	140
	97	130		83.1	105
F= 315 Hz	0	160		92.8	150
Max	7.4	120		100.5	90
380	21.2	290	F=1250 Hz	0	60
	28.2	110	Max	10	55
Min	41.2	290	70	17.7	65
110	59	110		22	55
	78	320	Min	31.4	65
	94	130	45	36.2	55
	99.5	380		44.1	70
F= 400 Hz	0	390		50.2	50
Max	4.5	410		57.4	65
440	32.6	300		64.2	45
	41.3	440		72.3	65
Min	85	300		84.2	55
275	90.8	440		88	70
	104.7	275		93	50
F= 630 Hz	0	220		101.5	70
Max	11.8	200		105.5	45
280	23.9	280	F= 1600 Hz	0	410
	41.9	180	Max	1.1	610
Min	51.3	260	610	3.5	340
180	71.8	200		8	210
	85.5	255	Min	12.6	600
	96.8	195	170	20	200
	109.5	250		23.5	600
F= 800 Hz	0	90		30.3	195
Max	8.6	80		34.3	600
110	27.7	100		41.3	200
	35.4	65		45	600
Min	44	100		52.5	190
65	52	70		68.2	575
	61.7	105		75.3	190
	68.4	85		78.8	570
	89.8	110		85.8	180
	98.2	70		84.7	570
F=1000	0	120		97.8	170
	7.05	140		107.5	590
	14.75	100			
	25.1	140			

Prob. 15% - 3	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 15% - 3	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	190	F = 800 Hz	56.3	75
Max	8.5	120	Max	62.3	110
300	11.4	220	110	63	80
	11.9	160	Min	88.5	105
Min	23.2	250	60	100	60
60	28.7	180	F = 1000 Hz	0	110
	29	160	Max	5.9	130
	29.3	140	130	13	100
	29.8	120		22.7	130
	50.5	300	Min	32.5	90
	52.6	140	80	41	130
	96	60		46.6	80
	51.4	240		55.8	130
F = 315 Hz	0	220		69.3	100
Max	25.4	160		74.3	125
480	40.7	380		86.5	100
	59	125		91	130
Min	59.3	100		99.5	90
100	61	480		111	125
	75.5	180	F = 1250 Hz	0	60
	100.8	280	Max	36.4	45
	97.3	140	80	43.8	80
F = 400 Hz	0	400		50.8	50
Max	52.3	240	Min	86	80
640	49.5	280	45	93.7	50
	51.5	200		99	70
Min	69.5	640		104.5	45
200	79.5	260	F = 1600 Hz	0	440
	91.8	440	Max	1.2	600
	85	280	600	8.5	240
	103.8	200		12.1	600
	111	440	Min	13.6	360
F = 630 Hz	0	210	200	16.1	520
Max	15.1	180		20.2	210
320	25.3	210		23	600
	27.5	160		30.5	200
Min	34.9	200		34	600
140	54.2	320		41.2	210
	68	140		45.1	600
	81.2	220		52	210
	98.5	140		56	580
F = 800 Hz	0	100		63.8	205
	12	80		67.5	600
	27.7	105		74.8	205
	37	60			
	48.8	105			

20%

Prob. 20% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 20% - 1	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	185	F=1000	0	110
Max	13.2	230	Max	5.5	130
245	29.2	140	135	12.5	90
	50.4	245		21.8	125
Min	56.3	145	Min	29.7	95
110	72.6	220	80	40.4	130
	79.1	150		49.2	90
	94.3	205		57.3	135
	95.9	110		65.8	95
F= 315 Hz	0	200		76.2	125
Max	11.2	160		46.7	95
340	17.8	240		94.7	130
	25.8	155		101.6	80
Min	39.8	230	F=1250	0	60
110	59.8	110	Max	9.2	45
	79.3	230	75	14.3	65
	100	340		23.7	45
F=400 Hz	0	380	Min	32.1	65
Max	2.8	405	40	36.9	40
520	14.2	280		46.7	70
	17	440		52.3	45
Min	31.9	280		56.5	75
280	50.2	520		65.3	48
	75.4	320		76.5	70
	86.1	520		80.5	50
	103.5	280		100.7	65
F= 630 Hz	0	260		105.5	43
Max	7.9	160	F=1600	0	520
290	24	250	Max	8.8	220
	39.9	180	600	12.3	560
Min	54.7	280		20.4	220
140	66.6	140	Min	23.1	580
	81.7	190	195	30.3	205
	77.8	240		38.3	520
	83.7	290		41	205
F= 800 Hz	0	85		53.6	195
Max	14.5	80		56.7	570
105	20	75		64.2	200
	34.3	80		68	580
Min	46.4	105		75.3	200
75	53.6	78		78.8	580
	62.3	105		86.7	200
	80.5	80		89.2	580
	91.2	105		96	200
	100.6	75		100.8	590

Prob. 20% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 20% - 2	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	197.5	F=1250 Hz	0	65
Max	13.3	210	Max	9.2	56
300	30.8	165	85	18.1	76
	53.2	300		26.2	55
Min	55.8	150	Min	45.5	85
72	94.6	242	55	54.7	55
	97.2	72		76.2	76
				80.3	60
F= 315 Hz	0	202			
Max	13.3	164		98.5	72
274	24.3	98		108.2	60
	79.2	244.5	F= 1600 Hz	0	595
Min	96.7	150	Max	5.6	232
98	101	274	605	11.8	575
				14.5	250
F= 400 Hz	0	420			
Max	32.5	305	Min	22.6	605
540	50	540	232	26.2	256
Min	85.7	290		34	600
290	91.5	468		36.4	264
				44.2	600
F= 630 Hz	0	224			
Max	17.8	200		53.6	288
256	29.5	256		61.6	530
	40.3	188		64.5	284
Min	57.2	250		68.3	575
188	67.8	200		75.3	272
	87	250		77.2	570
				87.2	265
F= 800 Hz	0	100			
Max	23.2	85		93.2	555
136	45.5	112		96.5	252
	58.6	88		99.4	570
Min	64.8	112			
85	85.2	88			
	80.3	136			
F=1000 Hz	0	116			
Max	5.3	142			
150	16.3	110			
	24.3	145			
Min	31	100			
100	41.4	140			
	51.4	110			
	60.3	125			
	66.5	100			
	76.5	134			
	85.8	102			
	93.2	150			
	103	100			

Prob. 20% - 3	Distancia (cm)	Amplitud (mV)	Prob. 20% - 3	Distancia (cm)	Amplitud (mV)
F = 250 Hz	0	200		84.5	72
Max	7.1	230		91	110
295	3.7	180		98	68
	24.6	240		107	100
Min	28.3	180	F= 1000 Hz	0	120
50	30	260	Max	15	90
	31.5	200	150	26	150
	45.5	170		35.5	90
	51.2	295	Min	40	130
	62.5	155	70	47	70
	67.2	145		57	130
	69	140		65	90
	72	120		79	130
	95	230		90	90
	96	50		92.5	130
F= 315 Hz	0	200		101.5	70
Max	8	80		109	120
320	9.5	260		0	55
	13	180		23	48
Min	21	260	F= 1250 Hz	26.5	60
80	22.5	80	Max	37	40
	61	280	72	47	64
	78	180		52.5	48
	79.8	320	Min	56	72
	87	180	40	64	40
	100.5	280		72	60
F=400 Hz	0	360		84.5	40
Max	6.5	400		86.5	60
520	32	280		95	40
	35.5	500		103.5	68
Min	51	240		105.5	44
220	69	520		0	260
	104	220		15	600
F= 630 Hz	0	200	F= 1600 Hz	20.5	150
Max	20.5	160	Max	26	600
300	41	180	600	31.5	140
	54	300		37	560
Min	67	150	Min	53	140
140	84	220	135	59	520
	95.5	140		64	140
	109	220		69	520
F=800 Hz	0	72		75.5	140
Max	38.5	70		91	520
110	48.5	110		96.8	135
Min	56.5	72		102	500
68	61.5	100		108	135

Cálculo de α	SRW Muestras 1 SWR+1	SWR-1	$\alpha 1$	SRW Muestras 2 SWR-1	SWR-1	$\alpha 2$	SRW Muestras 3 SWR+1	SWR-1	$\alpha 3$	α media	Desv. Est.			
Frecuencia 250 Hz	0% 4.333	5.333	3.333	0.609	3.556	4.556	2.556	0.685	2.800	3.800	1.800	0.776	0.690	0.083
	10% 6.714	7.714	5.714	0.451	3.643	4.643	2.643	0.676	5.571	6.571	4.571	0.516	0.548	0.116
	15% 3.478	4.478	2.478	0.694	3.333	4.333	2.333	0.710	5.000	6.000	4.000	0.556	0.653	0.085
	20% 2.227	3.227	1.227	0.855	4.167	5.167	3.167	0.624	5.900	6.900	4.900	0.496	0.658	0.182
Frecuencia 315 Hz	0% 8.750	9.750	7.750	0.368	5.750	6.750	4.750	0.505	7.667	8.667	6.667	0.408	0.427	0.070
	10% 9.143	10.143	8.143	0.355	4.133	5.133	3.133	0.627	4.250	5.250	3.250	0.617	0.533	0.154
	15% 3.417	4.417	2.417	0.701	3.455	4.455	2.455	0.696	4.800	5.800	3.800	0.571	0.656	0.074
	20% 3.091	4.091	2.091	0.739	2.796	3.796	1.796	0.776	4.000	5.000	3.000	0.640	0.718	0.070
Frecuencia 400 Hz	0% 3.188	4.188	2.188	0.727	1.486	2.486	0.486	0.962	3.000	4.000	2.000	0.750	0.813	0.129
	10% 2.083	3.083	1.083	0.877	2.200	3.200	1.200	0.859	2.500	3.500	1.500	0.816	0.851	0.031
	15% 2.167	3.167	1.167	0.864	1.600	2.600	0.600	0.947	3.200	4.200	2.200	0.726	0.846	0.112
	20% 1.875	2.875	0.875	0.907	1.862	2.862	0.862	0.909	2.364	3.364	1.364	0.836	0.884	0.042
Frecuencia 630 Hz	0% 3.000	4.000	2.000	0.750	1.867	2.867	0.867	0.909	1.875	2.875	0.875	0.907	0.855	0.091
	10% 1.429	2.429	0.429	0.969	1.852	2.852	0.852	0.911	2.000	3.000	1.000	0.889	0.923	0.041
	15% 3.059	4.059	2.059	0.743	1.556	2.556	0.556	0.953	2.286	3.286	1.286	0.847	0.847	0.105
	20% 2.071	3.071	1.071	0.878	1.362	2.362	0.362	0.977	2.143	3.143	1.143	0.868	0.908	0.060
Frecuencia 800 Hz	0% 2.000	3.000	1.000	0.889	1.275	2.275	0.275	0.985	3.000	4.000	2.000	0.750	0.875	0.118
	10% 1.750	2.750	0.750	0.926	1.692	2.692	0.692	0.934	1.846	2.846	0.846	0.912	0.924	0.011
	15% 1.714	2.714	0.714	0.931	1.692	2.692	0.692	0.934	1.833	2.833	0.833	0.913	0.926	0.011
	20% 1.400	2.400	0.400	0.972	1.600	2.600	0.600	0.947	1.618	2.618	0.618	0.944	0.954	0.015
Frecuencia 1000 Hz	0% 2.235	3.235	1.235	0.854	1.813	2.813	0.813	0.917	2.917	3.917	1.917	0.761	0.844	0.079
	10% 2.286	3.286	1.286	0.847	2.000	3.000	1.000	0.889	1.800	2.800	0.800	0.918	0.885	0.036
	15% 1.714	2.714	0.714	0.931	1.889	2.889	0.889	0.905	1.625	2.625	0.625	0.943	0.926	0.019
	20% 1.688	2.688	0.688	0.935	1.500	2.500	0.500	0.960	2.143	3.143	1.143	0.868	0.921	0.048
Frecuencia 1250 Hz	0% 1.750	2.750	0.750	0.926	1.750	2.750	0.750	0.926	4.500	5.500	3.500	0.595	0.815	0.191
	10% 1.455	2.455	0.455	0.966	1.550	2.550	0.550	0.953	2.286	3.286	1.286	0.847	0.922	0.065
	15% 2.000	3.000	1.000	0.889	1.556	2.556	0.556	0.953	1.778	2.778	0.778	0.922	0.921	0.032
	20% 1.875	2.875	0.875	0.907	1.545	2.545	0.545	0.954	1.800	2.800	0.800	0.918	0.927	0.024
Frecuencia 1600 Hz	0% 3.200	4.200	2.200	0.726	3.000	4.000	2.000	0.750	4.000	5.000	3.000	0.640	0.705	0.058
	10% 1.867	2.867	0.867	0.909	4.480	5.480	3.480	0.597	3.050	4.050	2.050	0.744	0.750	0.156
	15% 4.667	5.667	3.667	0.581	3.588	4.588	2.588	0.682	3.000	4.000	2.000	0.750	0.671	0.085
	20% 3.077	4.077	2.077	0.740	2.608	3.608	1.608	0.801	4.444	5.444	3.444	0.600	0.714	0.103