

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARBONATACIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO

**Autores: JULIO CÉSAR OSMA PINTO
VIVIAN ANDREA VILLAMIZAR ROJAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
INGENIERÍA METALÚRGICA
BUCARAMANGA, 2011**

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARBONATACIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Autores: JULIO CÉSAR OSMA PINTO
VIVIAN ANDREA VILLAMIZAR ROJAS**

Director: MSc LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

Codirector: PhD RICARDO ALFREDO CRUZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
INGENIERÍA METALÚRGICA
BUCARAMANGA, 2011**

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, permitirme llegar a estas instancias y quien ha sido mi apoyo y fortaleza en todo momento.

A mis padres Marien Pinto y Alfonso Osma porque me educaron y enseñaron a trabajar, por creer en mí, porque ustedes son la base de lo que hoy en día soy; a mi hermano Germán por su colaboración, amistad y quien ha sido mi ejemplo a seguir; gracias a mi familia por el apoyo, por hacerme ver las cosas como son, por la felicidad que me brindan cada día de mi vida y permitirme hacer parte de ella.

A la mujer que amo, mi novia y compañera de proyecto Vivian Villamizar, por ser mi fortaleza, por contar con su amor incondicional, por la motivación que me da cada día para salir adelante, por brindarme su amistad y toda su confianza. Y espero de todo corazón, que me acompañe por mucho tiempo.

A todos mis amigos y compañeros, en especial a Carlos Méndez, Edinson Arias, Julie Sánchez, Ariel Arguello, Arnold Batista, Esteban Reyes, Edilson Pérez, Pablo Saurith, Victor Jiménez y Diana Benavides; porque me acompañaron en momentos difíciles y sé que lo van a seguir haciendo, no olviden que pueden seguir contando conmigo y que los quiero mucho.

A Movil Celulares y Cellular Service por permitirme trabajar durante mi formación como profesional, por los excelentes jefes y amigos que fueron conmigo, por brindarme su apoyo y su amistad desinteresadamente.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, located in the bottom right corner of the page.

DEDICATORIA

A Dios nuestro señor!! A ti el poder, el honor y la gloria, gracias por todo lo que me das y por ser siempre el camino la verdad y la vida.

A mi madre una luchadora incansable sinónimo de fuerza, ternura, amor y dedicación, quien me ha dado tanto y a quien amo profundamente.

A mi papi que en el cielo se encuentra y quien guía mis pasos desde su partida.

A ti mi amor, mi único y eterno amor Julio César con quien he vivido los momentos más hermosos de mi vida y con quien quiero realizar todos mis sueños.

A mis hermanos Andrés y José quienes han estado conmigo siempre y que a su manera me han motivado para ser mejor cada día.

A mi abuelita Nubia y en general a toda mi familia, gracias por esperar tanto de mí!!

A mis compañeros de trabajo Sofí, Betty, Javi, John, Jairo y Martha (RIP) quienes han caminado conmigo sufriendo, llorando, riendo y de quienes he aprendido tanto, por todo les estoy profundamente agradecida!!

A mis amigos Arley, Julie, Edinson, Ariel, Arnold, Esteban, Walter, Laura, Jenifer, Victor y Diana con quienes compartí mi vida universitaria y a quienes siempre voy a llevar en mi corazón.



AGRADECIMIENTOS

A nuestra alma mater la Universidad Industrial de Santander y a nuestra querida Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por formarnos como profesionales y hacernos parte de su familia.

A la Escuela de Ingeniería Civil, por recibirnos y permitirnos el uso de las instalaciones del edificio de Caracterización de materiales, especialmente a los técnicos Jairo Hernández y Jaime Cadena por su valiosa colaboración y calidad humana.

A la directora de nuestro proyecto, profesora y amiga MSc. Luz Amparo Quintero Ortiz, por su tiempo, apoyo incondicional, orientación, por compartir con nosotros sus conocimientos y brindarnos su confianza. Agradecemos además al profesor Julián Herrera Ortiz por sus consejos, orientación y ayuda.

Al claustro de profesores de la escuela de ingeniería metalúrgica: Iván Uribe, Custodio Vásquez, Orlando Gómez, Elcy Córdoba, Gustavo Neira, Julio Pedraza, Arnaldo Alonso, Walter Pardavé, Jaime González, Afranio Cardona y Luis Orlando Aguirre; por compartir sus conocimientos y formarnos pasa a paso como ingenieros, por los innumerables aportes a nuestras vidas, por crear y acrecentar el amor hacia nuestra carrera.

También queremos agradecer de forma muy especial a los técnicos y trabajadores de nuestra escuela: Ambrosio Carrillo, Mario Navarrete, Javier Quintana, Fermín Gómez, Domingo, Alcira y Orlando; por su amistad, disposición y colaboración incondicional. A los ingenieros Félix Arenas, Guillermo y Carlos Castro por su colaboración y atención.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 ESTADO DEL ARTE	24
1.3 OBJETIVOS	25
1.3.1 Objetivo general	25
1.3.2 Objetivos específicos	25
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	26
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO	26
2.2 CEMENTO PORTLAND	27
2.3 COMPUESTOS DEL CONCRETO	28
2.4 CARBONATACIÓN DEL CONCRETO	30
2.4.1 Dióxido de carbono	30
2.4.2 Reacciones presentes en el proceso	31
2.4.3 Neutralización del concreto	32
2.4.4 Predicción de la profundidad de carbonatación	32
2.4.5 Factores que influyen en la carbonatación	33
2.4.6 Efecto de la carbonatación sobre la porosidad y la resistencia	34
2.5 ENSAYOS REALIZADOS AL CONCRETO	35
2.5.1 Ensayos destructivos	35
2.5.2 Ensayos no destructivos	35
3. METODOLOGÍA	40
3.1 FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	41
3.2 FASE 2: CAPACITACIÓN Y PREPARACIÓN DE EQUIPOS	42
3.2.1 Cámara de carbonatación	42
3.2.2 Equipo de ultrasonido	45
3.2.3 Máquina de resistencia a la compresión	46
3.2.4 Equipo de porosidad	46
3.3 FASE 3: FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO	47

3.3.1 Identificación y caracterización de la materia prima.	47
3.3.2 Diseño de mezcla	48
3.3.3 Elaboración de probetas	48
3.3.4 Fraguado y curado de probetas	49
3.4 FASE 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES PREVIOS A LA EXPOSICIÓN CON DIÓXIDO DE CARBONO	50
3.4.1 Peso de las probetas	51
3.4.2 Inspección visual	51
3.4.3 Ensayo de porosidad	51
3.4.4 Difracción de Rayos X	51
3.4.5 Ensayo químico con fenolftaleína	52
3.4.6 Ensayo de ultrasonido	52
3.4.7 Ensayo de resistencia a la compresión	53
3.5 FASE 5: EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO	53
3.6 FASE 6: ENSAYOS EXPERIMENTALES DESPUÉS DE LA EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO	55
3.6.1 Peso de las probetas	56
3.6.2 Inspección visual	56
3.6.3 Ensayo de porosidad	56
3.6.4 Difracción de Rayos X	56
3.6.5 Ensayo químico con fenolftaleína	56
3.6.6 Ensayo de ultrasonido	57
3.6.7 Ensayo de resistencia a la compresión	57
3.7 FASE 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
3.8 FASE 8: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	58
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
4.1 FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO	59
4.1.1 Identificación y caracterización de la materia prima	59
4.1.2 Diseño de mezcla	60
4.2 EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO	60
4.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES PREVIOS Y DESPUÉS DE LA EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO	66
4.3.1 Peso de las probetas	66
4.3.2 Inspección visual	67
4.3.3 Ensayo de porosidad	68
4.3.4 Difracción de Rayos X	69
4.3.5 Ensayo químico con fenolftaleína	71
4.3.6 Medición de la velocidad de pulso ultrasónico	71

4.3.7 Ensayo de resistencia a la compresión	74
4.3.8 Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en concreto carbonatado	75
5. CONCLUSIONES	78
6. RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS	86

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Tipos de cemento. Fuente ASTM C150.	27
Tabla 2. Fases y formulas químicas de los compuestos del concreto.	28
Tabla 3. Parámetros de trabajo del equipo CNS FARNELL LTDA PUNDIT PLUS.	53
Tabla 4. Condiciones de operación de la cámara de carbonatación.	54
Tabla 5. Flujos obtenidos para aire y dióxido de carbono.	54
Tabla 6. Resultados de las características evaluadas para los agregados fino y grueso.	60
Tabla 7. Diseño de mezcla para 60 probetas de concreto con una relación a/c de 0,8.	60
Tabla 8. Profundidades de carbonatación para diferentes tiempos de exposición.	63
Tabla 9. Profundidades obtenidas y esperadas de carbonatación para diferentes tiempos de exposición.	65
Tabla 10. Peso de especímenes para diferentes tiempos de exposición.	66
Tabla 11. Resultados de porosidad para concreto carbonatado y libre de ataque.	68
Tabla 12. Análisis cuantitativo de concreto libre de ataque.	69
Tabla 13. Análisis cuantitativo de concreto carbonatado.	70
Tabla 14. Velocidad de pulso ultrasónico y la profundidad obtenida para diferentes tiempos de exposición.	72
Tabla 15. Valores promedio de la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación para cada tiempo de exposición.	74
Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico para diferentes tiempos de exposición.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1. Mecanismo de difusión del dióxido de carbono en el concreto. Tomado de [17].	32
Figura 2. Avance del frente de carbonatación en función del tiempo.	33
Figura 3. Efecto de la carbonatación en el refuerzo y el concreto. Tomado de [15].	34
Figura 4. Diagrama esquemático de la medida de la velocidad de pulso ultrasónico. Tomado de [13].	37
Figura 5. Métodos de medición de VPU. Tomado de [13].	38
Figura 6. Diagrama de la metodología.	40
Figura 7. Esquema de la cámara de carbonatación.	42
Figura 8. Cámara de carbonatación y sus partes constitutivas.	43
Figura 9. Equipo ENRAC 700 (ENRAC INC). Tomado de [http://www.aikencolon.com/enerac-700-combustion-emission-system.html].	44
Figura 10. Otros componentes de la cámara de carbonatación.	45
Figura 11. Equipo PUNDIT PLUS PC 1006. Tomado de [http://www.jroma.pt/images/punditplus.jpg].	45
Figura 12. Máquina para medir resistencia a la compresión marca AMSLER.	46
Figura 13. Porosímetro de campo RUSKA.	47
Figura 14. Compresor y formaletas utilizados en la fabricación de las probetas. Tomado de [23].	49
Figura 15. Distribución de ensayos previos a la exposición de dióxido de carbono.	50
Figura 16. Balanza digital.	51
Figura 17. Guías utilizadas en la medición de VPU. Tomado de [26].	52
Figura 18. Distribución de probetas para cada tiempo de exposición a dióxido de carbono.	55
Figura 19. Distribución de ensayos después de la exposición a dióxido de carbono.	56
Figura 20. Zonas de medición de la profundidad de carbonatación.	57
Figura 21. Distribución total de ensayos.	58
Figura 22. Disposición de las probetas de relación a/c 0.55 para las pruebas preliminares.	61
Figura 23. Frente carbonatado en concreto de relación a/c 0.55 con 12 horas de	61

exposición.	
Figura 24. Frente carbonatado en concreto de relación a/c 0.8 con 10 días de curado y calentamiento menor a 100°C.	63
Figura 25. Disminución del área de contacto a medida que aumenta el tiempo de exposición.	65
Figura 26. Estado superficial de las probetas.	68
Figura 27. Esquema de compensación de la carbonatación de la portlandita y la etringita.	70
Figura 28. Profundidades de carbonatación obtenidos en diferentes tiempos de exposición, para concretos con relación a/c de 0.8, bajo un 70 % de dióxido de carbono.	71

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	<i>Pág.</i>
Gráfica 1. Comportamiento de la profundidad de carbonatación en función de la raíz cuadrada del tiempo.	64
Gráfica 2. Relación entre el aumento de peso y el tiempo de carbonatación.	67
Gráfica 3. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función del tiempo de exposición.	73
Gráfica 4. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la profundidad de carbonatación.	73
Gráfica 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función del tiempo de exposición.	75
Gráfica 6. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso ultrasónico.	76

ÍNDICE DE ANEXOS

	<i>Pág.</i>
ANEXO A. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	86
ANEXO B. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN LA “PRACTICA RECOMENDABLE PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL Y CONCRETO PESADO ACI 211”	91
ANEXO C. CÁLCULOS PARA HALLAR LA POROSIDAD DE LAS MUESTRAS	96
ANEXO D. DIFRACCIÓN DE RAYOS X “DRX” – DIFRACTOGRAMAS	97
ANEXO E. REGISTRO DE TOMA DE DATOS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	99
ANEXO F. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	101
ANEXO G. FICHA DE SEGURIDAD DEL DIÓXIDO DE CARBONO	103

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARBONATACIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO.[†]

AUTORES: JULIO CÉSAR OSMA PINTO. VIVIAN ANDREA VILLAMIZAR ROJAS[‡]

PALABRAS CLAVES: carbonatación, concreto, VPU-Velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, porosidad, DRX-Difracción de rayos X.

La corrosión del refuerzo en el concreto conduce a la formación de grietas y reduce la vida útil de la estructura. La carbonatación después del ataque por cloruros es la segunda causa de corrosión del refuerzo en estructuras civiles, debido a que se desarrolla en un mayor tiempo por ser un proceso más lento. Debido a su cinética de reacción, hay la necesidad de un proceso acelerado para obtener datos en corto tiempo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la carbonatación sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo. Se realizó el ataque acelerado con CO₂ en una cámara de carbonatación a un concreto de relación agua/cemento de 0,8 con 28 días de curado, con una concentración de CO₂ en promedio del 70%, humedad relativa entre 50 y 70% a una temperatura de 25°C. Se evaluaron los cambios en el concreto debidos a la reacción de carbonatación mediante los ensayos de VPU, inspección visual, medidas de peso, resistencia a la compresión, porosidad, ataque químico con fenolftaleína y DRX. Los resultados obtenidos muestran que la técnica de VPU es sensible a las variaciones sufridas por el material como producto del ataque, lo cual convierte a este ensayo en un instrumento práctico para la inspección de estructuras susceptibles al ataque con CO₂ ayudando de una forma no destructiva a estimar la durabilidad del concreto.

[†] Trabajo de Investigación.

[‡] Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Directora: MSc. Luz Amparo Quintero Ortiz. Codirector: PhD. Ricardo Alfredo Cruz.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECTS OF CARBONATION ON THE ULTRASONIC PULSE VELOCITY IN CONCRETE.[§]

AUTHOR: JULIO CÉSAR OSMA PINTO. VIVIAN ANDREA VILLAMIZAR ROJAS^{**}

KEYWORDS: Carbonation, concrete, UPV-Ultrasonic Pulse Velocity, compressive strength, porosity, XRD X-ray diffraction.

Corrosion of reinforcement in concrete leads to cracking and reduces the life of the structure. Carbonation after the attack by chlorides is the second cause of corrosion of reinforcement in civil structures, because it develops a longer time to be a slower process. Because of their reaction kinetics, there is need for an expedited process for obtaining data in a short time. The aim of this study was to evaluate the effect of carbonation on the ultrasonic pulse velocity in concrete without reinforcement. The accelerated attack was carried out with CO₂ in carbonation chamber to a concrete water/cement ratio of 0.8 with 28 days of curing, with an average concentration of CO₂ in 70% relative humidity between 50 and 70% at temperature of 25°C. Changes were assessed in concrete due to carbonation reaction assays UPV by visual inspection, weight measurements, compressive strength, porosity, chemical attack with phenolphthalein and XRD. The results show that the technique of UPV is sensitive to changes undergone by the material as a result of the attack, which makes this test a practical tool for the inspection of structures susceptible to attack CO₂ helping a non-destructive estimate the durability of concrete.

[§] Research Work.

^{**} Department of Physical-Chemistry Engineerings. School of Metallurgical Engineering.
Director: MSc. Luz Amparo Quintero. Codirector: PhD. Ricardo Alfredo Cruz.

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material que ha transformado y evolucionado la industria de la construcción, ya que es la materia prima de obras diseñadas para mejorar la calidad de vida y el progreso de la humanidad. Existen por lo menos tres razones que hacen del concreto el material más ampliamente utilizado en ingeniería, la primera de ellas es su excelente resistencia al agua que ha hecho que su uso se haya extendido a severos ambientes industriales y naturales, la segunda es la facilidad con que se pueden formar elementos estructurales en una gran variedad de formas y tamaños, y la última razón es que por lo general es un material económico y con alta disponibilidad en el mercado [1].

Este material puede sufrir daños físicos, químicos y mecánicos si es expuesto a condiciones de ambiente y servicio desfavorables como excesivas cargas cíclicas, deflexión y ambientes químicamente agresivos, lo que afectará su durabilidad, y en consecuencia generará un deterioro en las estructuras civiles. Un mecanismo de daño del concreto debido al contacto con el ambiente es la carbonatación que puede ser iniciada con el contenido de CO_2 de la atmosfera [2].

Los ensayos no destructivos se han extendido a la evaluación de materiales como el concreto permitiendo de una forma económica y confiable monitorear propiedades características de este material sin perturbar su diseño, integridad, microestructura y por ende sus propiedades. El presente trabajo de grado tiene como objetivo relacionar el efecto de la carbonatación en concreto sin refuerzo con una técnica no destructiva, que busca detectar el daño ocasionado por este tipo de ataque sin debilitar la estructura, pues para medir la profundidad de carbonatación existe la necesidad de extraer núcleos y atacar con un indicador de pH.

Inicialmente en este documento, se presenta la fundamentación teórica necesaria para conocer y entender el proceso de carbonatación, las reacciones que tienen lugar, la

predicción de su profundidad en el concreto y los factores que influyen en este proceso. Se encuentran también las pruebas destructivas y no destructivas que se aplicaron a un concreto carbonatado y a uno libre de ataque.

Seguidamente se muestra la metodología propuesta, ocho fases con sus respectivas etapas y la descripción detallada de cada una de las actividades realizadas.

En el capítulo cinco se encuentran los resultados obtenidos durante el desarrollo del diseño metodológico con los análisis, tablas y gráficos correspondientes.

Posteriormente se encuentran los capítulos de conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas.

Adicionalmente, en los anexos del documento se encuentra información acerca de la caracterización de la materia prima disponible en el anexo A, la descripción paso a paso y el diseño de mezcla realizado se consignó en el anexo B, el procedimiento para hallar el porcentaje de porosidad en el Anexo C, los diafractogramas obtenidos en las muestras producto del DRX en el anexo D y los Anexos E y F contienen el registro de los valores y los cálculos para hallar la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión respectivamente. Finalmente en el anexo G se encuentra consignada la ficha de seguridad del CO₂.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presenta el planteamiento el problema, el estado del arte y los objetivos de esta investigación.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante mucho tiempo se pensó que el concreto por ser un material resistente tenía una vida eterna y que su durabilidad dependía únicamente de sus características mecánicas, lo cual produjo que durante el diseño de las estructuras de concreto no se considerara el tipo de ambiente al cual iban a ser expuestas dejando así la estructura vulnerable a ataques de sustancias como los cloruros, los sulfatos y el CO_2 . En la actualidad colapsos y demoliciones de estructuras han demostrado que la durabilidad no es únicamente dependiente de las características mecánicas del concreto sino también de la agresividad del medio en donde se encuentra [3].

En concreto reforzado el acero es protegido de daños mecánicos y del efecto de agentes atmosféricos debido a su inmersión en el concreto, que adicionalmente le brinda un ambiente altamente alcalino que le permite formar una capa pasiva, sin embargo, el acero puede corroerse si llegase a perder la protección que se le brinda, lo cual generaría inconvenientes en la durabilidad de la estructura y por ende altos costos de reparación y problemas de seguridad de la misma.

La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el dióxido de carbono atmosférico [4]. Como consecuencia de esta reacción, se pierde la protección que el concreto brinda al acero debido a que el pH del concreto se reduce y por ende, puede desarrollarse la corrosión del refuerzo. La

carbonatación es un proceso lento controlado por la difusión del CO_2 desde la superficie hasta el interior de la estructura que conduce a cambios en las propiedades físicas y químicas del concreto, es un mecanismo de daño que ha sido considerado menos relevante que la difusión de cloruros pero realmente es un proceso más común ya que puede ser iniciado con el contenido de CO_2 que se encuentra en la atmosfera natural, que en promedio es una concentración de 0,035% molar [2]. El proceso de carbonatación es posible dividirlo en dos, el primer fenómeno que se da durante la carbonatación es la neutralización de la pasta, posteriormente se da la corrosión del acero de refuerzo con las consecuencias que esto implica, fenómeno que está fuera del alcance de esta investigación.

La magnitud del daño en un concreto suele evaluarse a partir de sus características mecánicas, especialmente de la resistencia a la compresión que es su principal propiedad. Para medir la resistencia a la compresión se hace necesario perturbar la estabilidad de la estructura y su diseño, ya que requiere la extracción de núcleos para su determinación. En la identificación de los perfiles de carbonatación suele usarse también núcleos extraídos de la estructura para posteriormente atacar químicamente, debido a esto surge la necesidad de la aplicación de una técnica no destructiva que permita identificar y cuantificar el daño debido a la carbonatación sin afectar la estructura y esta técnica es la velocidad de pulso ultrasónico la cual se empezó a desarrollar como técnica para probar materiales desde hace medio siglo. En la actualidad, es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su simplicidad, versatilidad y repetitividad [5].

Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante y ondas superficiales o Rayleigh. La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio, de tal manera que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, las cuales se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material [6]. Con la VPU y la ayuda de otros ensayos experimentales es posible determinar no solo la profundidad de la carbonatación si no también evaluar la magnitud de este daño, pues conocer el avance de la reacción podría ser importante para valorar la vida útil residual o para inhibir la extensión de este ataque hacia el acero de refuerzo.

El concreto es durable cuando retiene las condiciones originales de forma, calidad y aptitud de servicio, luego de su exposición al medio ambiente. También se ha dicho que durabilidad significa conservar los niveles requeridos de servicio, es decir, mantener la calidad en el tiempo de vida útil [7]. Estas son razones para despertar interés no solo en el estudio de esta propiedad si no en la búsqueda constante de acciones para mejorarla, este proyecto hace parte de un estudio llamado “ESTIMACIÓN DE LA DURABILIDAD DE CONCRETO SIN REFUERZO A PARTIR DE RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS” del Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología en nuevos Materiales GIMAT, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

1.2 ESTADO DEL ARTE

Las estructuras de concreto día a día se envejecen y en la actualidad se sabe que no son eternas, su vida es finita debido a los múltiples factores que lo deterioran. La necesidad de una alternativa que fuese no destructiva, y que brindara información sobre el concreto, llevó a ingenieros a indagar sobre estas técnicas. La evaluación de las estructuras que poseen una resistencia incierta se presentan con mucha frecuencia, y la estimación de la calidad y la seguridad de servicio que la estructura puede seguir brindando a los usuarios no está necesariamente ligada, única y de manera exclusiva a la resistencia a compresión del concreto y por ello se requieren las evaluaciones, tanto del concreto como de los elementos estructurales a través de las llamadas «pruebas no destructivas», las cuales hoy en día se han convertido en una alternativa importante para establecer los parámetros de la seguridad estructural de las obras civiles en general [8].

La técnica de medición de velocidad de pulso ultrasónico como herramienta para diagnosticar el estado del concreto, la desarrollaron Leslie y Cheesman en 1949. Estudios cercanos a la fecha, desarrollados por Parker en 1953 encontró la dependencia de la velocidad de pulso con las propiedades elásticas del medio, sugiriendo entonces que del conocimiento de la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, permitiendo así relacionar las mismas con los parámetros de calidad del material. El mismo Parker determinó una relación entre la

velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión. A partir de estos estudios, Malhotra en 1985 publicó un criterio de aceptación del concreto basándose en la medida de la velocidad de pulso ultrasónico. Clasificando la calidad del concreto como excelente, bueno, cuestionable, pobre y muy pobre con base a los intervalos de velocidad [9]. Haciendo de su aplicación un medio de evaluación inicial y así mismo un punto de comparación con la técnica destructiva de resistencia a la compresión llevada a cabo después de este procedimiento. En cuanto a la velocidad de pulso ultrasónico en concreto, se han desarrollado varios estudios, que cada vez buscan relacionar los fenómenos y sus propiedades sin necesidad de comprometer su integridad.

Los primeros estudios sobre carbonatación los realizaron Seifritz y Lackner [10, 11]. Desde entonces, las investigaciones se hallan en constante evolución haciendo de este un proceso muy bien ilustrado e interpretado. Se han realizado análisis del efecto de la relación agua/cemento sobre la carbonatación [4], determinación del pH de la solución presente en los poros de un concreto carbonatado [12], hasta la construcción de una cámara de carbonatación que permite acelerar el proceso [4, 13]. Con respecto al tema, en la bibliografía consultada se encuentran pocas referencias bibliográficas que relacione la velocidad de pulso ultrasónico con el proceso de carbonatación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar el efecto de la carbonatación sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del tiempo de carbonatación sobre la velocidad de pulso ultrasónico y la porosidad en concreto sin refuerzo con una relación agua/cemento de 0.8.
- Evaluar el efecto de la carbonatación sobre la resistencia a la compresión en concreto sin refuerzo con una relación agua/cemento de 0.8.
- Determinar la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en concreto carbonatado.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se suministra información general del concreto, del proceso de carbonatación, de las reacciones que se llevan a cabo y los factores que influyen en este proceso, además de los métodos que se utilizan para su reconocimiento utilizando los ensayos destructivos y no destructivos.

2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

El concreto, también conocido con el nombre de hormigón, es un material constituido básicamente por: agregados y pasta. La pasta, obtenida por la mezcla entre el cemento y el agua; une los agregados, que normalmente son arena y grava (piedra triturada), dando lugar a una masa que solidifica dando una apariencia rocosa. Inicialmente, el cemento se hidrata al entrar en contacto con el agua, como consecuencia a esta hidratación se producen unas reacciones químicas que convierten al cemento en un producto trabajable y a su vez cohesivo [14]. Posterior a este estado, el cemento gana rigidez, estado conocido como fraguado. Después de que el cemento ha pasado por el anterior estado empieza a ganar resistencia y se endurece. Como consecuencia al endurecimiento, se obtienen las propiedades de resistencia y durabilidad. Las propiedades del concreto evolucionan con el tiempo y estas dependen de las características, de la cantidad de componentes y las condiciones de curado [15].

Los agregados constituyen aproximadamente entre el 60% al 75% del volumen total del concreto, por esta razón es de vital importancia su adecuada selección. Los agregados se deben poseer una resistencia mecánica adecuada y una buena resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar

deterioro del concreto. La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos [15].

La calidad del concreto también se ve influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento, ya que si el contenido de agua es bajo relativamente, se obtiene una mezcla con mayor resistencia a la compresión y se obtiene por tanto mayor rigidez, pero a su vez disminuye su trabajabilidad.

La principal característica del concreto es que resiste esfuerzos de compresión, pero frente a flexión y tensión se ve comprometido, debido a esto se utiliza acero de refuerzo para mitigar este comportamiento y mejorar sus características.

2.2 CEMENTO PORTLAND

Es obtenido básicamente por el proceso de molienda del producto de cocción, hasta sinterización, de una mezcla de caliza, arcilla (clinker) y de una material que se utiliza como regulador de fraguado, que normalmente es yeso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

El clinker es el componente alcalino del cemento, el cual está compuesto por silicatos (tricalcico y bicalcico), aluminatos (tricalcico) y el ferrito aluminato de cal (tetracalcico).

La calidad del cemento portland, la determina la norma ASTM C150, la cual establece cinco diferentes tipos de cemento de acuerdo a su uso y necesidad como muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de cemento. Fuente ASTM C150.

CEMENTO	USO
Tipo I	Cemento de uso general.
Tipo II	Cemento para uso general y además donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
Tipo III	Cemento de altas resistencias a edades tempranas y rápido fraguado.
Tipo IV	Cemento de bajo calor de hidratación, apto para uso masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de sulfatos.

2.3 COMPUESTOS DEL CONCRETO

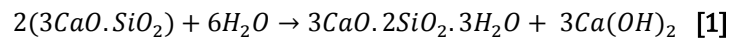
En la industria del cemento pórtland, conocer la composición química de la materia prima, de los productos intermedios y del producto final es de vital importancia, tanto para el desarrollo del proceso de fabricación como para obtener un producto que cumpla con las especificaciones técnicas esperadas [16]. La hidratación del cemento es función de las reacciones entre los minerales del cemento (C3S, C2S, C3A, y C4AF) y el agua, además, de la presencia de yeso y otros aditivos.

Tabla 2. Fases y formulas químicas de los compuestos del concreto.

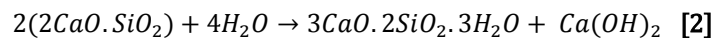
COMPUESTO		FORMULA	FORMULA ABREVIADA
Silicato tricálcico	Alita	3CaO.SiO₂	C3S
Silicato dicálcico	Belita	2CaO.SiO₂	C2S
Aluminato tricálcico	Celita	3CaO.Al₂O₃	C3A
Ferroaluminato tetracálcico		4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃	C4AF

Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados [16], así:

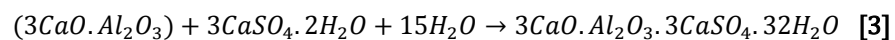
ALITA. El C3S es el silicato cálcico más inestable de los presentes en el cemento, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, así:



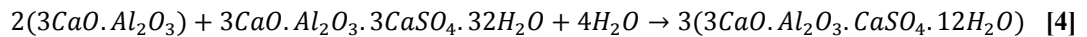
BELITA. El silicato dicálcico C2S al hidratarse también se convierte en tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, pero a diferencia de (1) se produce menos hidróxido de calcio:



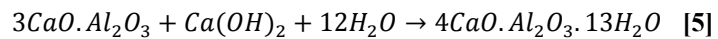
CELITA. El aluminato de calcio C3A al combinarse con yeso y agua produce la etringita:



El aluminato de calcio con la etringita y con agua se convierte en monosulfato:



El aluminato de calcio (C3A) con el hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado:



Tobermorita gel (CSH): Proviene de las reacciones 1 y 2, es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y concretos y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo [16].

Portlandita (hidróxido de calcio). Es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores altos (12-13) pues actúa como una “reserva alcalina”, mantiene a los concretos protegidos contra la corrosión electroquímica. También es positiva en el caso de concretos y morteros con áridos calizos, ya que en ellos la adherencia árido-pasta es mayor que en el caso de los áridos silíceos [16], este hidróxido es producto de las reacciones 1 y 2.

Su parte negativa, solubilidad en agua y fácilmente lixiviable por disolución; puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer material en descomponerse a altas temperaturas (600°C) en caso de incendio generando el desplome de la estructura. Varios de estos aspectos negativos pueden controlarse con la adición de puzolanas (cenizas volantes, humo de sílice, escoria de hornos, etc.) En el microscopio electrónico la portlandita se presenta normalmente en forma de plaquetas hexagonales delgadas, a menudo de décimas de micrómetros de ancho, pero después se convierten en depósitos masivos [16].

Etringita (trisulfoaluminato de calcio): es el producto de la reacción 3, los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de

varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión, ya que se trata de la etringita positiva, pues la que genera expansión se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades mayores a 28 días, además se dice que la formación de etringita conlleva a una expansión debido a su crecimiento orientado y también que la expansión asociada a la formación de etringita depende de las condiciones de curado [16].

2.4 CARBONATACIÓN DEL CONCRETO

La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el dióxido de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, como los de calcio (Portlandita) para formar carbonatos [4]. Como consecuencia de la reacción del hidróxido de calcio, hay formación de carbonato de calcio.

La exposición del concreto al CO_2 puede ser beneficiosa o perjudicial, dependiendo del tiempo, la tasa y la extensión de la carbonatación y del ambiente al cual está expuesto el cemento [3]. Por otra parte, una carbonatación intencional durante su producción puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad dimensional de los productos del concreto [15].

2.4.1 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se forma en todos aquellos procesos en que tiene lugar la combustión de sustancias que contienen carbono. En ambientes interiores no industriales sus principales focos de emisión son la respiración humana y otras combustiones (cocinas y calefacción), aunque la mayor fuente de dióxido de carbono es el transporte con combustibles fósiles y las plantas generadoras de potencia a partir de los mismos.

Básicamente, las fuentes de CO_2 que se presentan para que ocurra el proceso de carbonatación de una manera natural son:

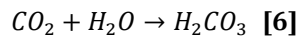
Dióxido de carbono en la atmosfera. La reacción del cemento pórtland hidratado con el CO_2 del aire es generalmente un proceso lento. Este proceso depende fuertemente de la humedad relativa del ambiente, la temperatura, la permeabilidad del concreto y la

concentración de CO_2 . Las mayores tasas 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 insignificante [3]. Si la humedad relativa es mayor que 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO_2 .

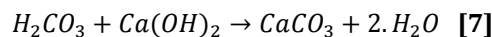
Dióxido de carbono en disolución. El CO_2 absorbido por la lluvia ingresa al agua en forma de ácido carbónico. La reacción con los carbonatos presentes en el suelo produce un equilibrio con bicarbonato de calcio que puede resultar en soluciones de pH neutro pero que sin embargo contienen cantidades significativas de CO_2 agresivo. Según [3], la tasa de ataque, similar a la del ataque por el CO_2 de la atmósfera, depende de las propiedades del concreto y de la concentración de CO_2 agresivo.

2.4.2 Reacciones presentes en el proceso

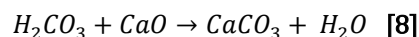
La creación del carbonato de calcio, requiere de tres sustancias importantes: dióxido de carbono que circunda en la atmósfera, las fases de calcio (Ca(OH)_2 y C-S-H) y el agua presente en los poros del concreto. Según [17] la primera reacción, se da en los poros cuando el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar ácido carbónico:



Este ácido carbónico, reacciona con las fases de calcio neutralizando el hidróxido de calcio:



Una vez el hidróxido de calcio ha sido convertido y no se encuentre en la pasta del cemento, la Tobermorita gel (fase hidratada de silicato de calcio CSH, que es aproximadamente 50-60% del volumen de sólidos en la pasta hidratada) liberará CaO el cual, también ayuda a la carbonatación:



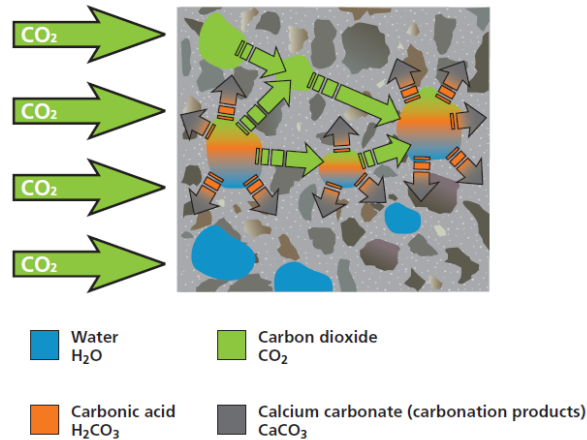


Figura 1. Mecanismo de difusión del dióxido de carbono en el concreto. Tomado de [17].

2.4.3 Neutralización del concreto

Una vez los hidróxidos de calcio, potasio y sodio (Ca(OH)₂, KOH, NaOH) presentes en los poros hayan sido carbonatados, el valor del pH decae. Esto sucede, ya que el CO₂ al combinarse con el agua forma el ácido carbónico, el cual es el causante en disminuir el pH de 12 a valores cercanos a 7 aproximadamente y al entrar en contacto con la superficie del concreto, provoca una reacción lenta de neutralización [4]. Esto ocasiona que el ambiente propicio para la estabilidad termodinámica del acero de refuerzo sea modificado y que la protección química que el concreto brinda al acero desaparezca.

2.4.4 Predicción de la profundidad de carbonatación

El proceso de carbonatación está regido por la difusión, donde el CO₂ va a través de la estructura porosa del concreto y produce cambios microestructurales.

El coeficiente de difusión del CO₂ puede ser obtenido por medio de la primera ley de Fick [18], tal como se expresa en la ecuación 9:

$$X = \sqrt{\frac{2DC}{a}} \sqrt{t} \quad [9]$$

Donde X representa la profundidad del frente de carbonatación a un tiempo de exposición t ; C la concentración de CO₂, D el coeficiente de difusividad y a es la concentración de las fases activas originadas en el proceso de hidratación del cemento. Según [19] esta ecuación puede ser redefinida y reducida obteniéndose la ecuación:

$$X_c = K_c \cdot \sqrt{t} \quad [10]$$

Donde:

X_c : Profundidad de la capa carbonatada

K_c : Constante de carbonatación

t : Tiempo (edad del concreto)

Esta expresión ha sido aceptada por diversos investigadores alrededor del mundo [18-20].

Debido a que el avance corre con la raíz cuadrada del tiempo, es decir que es asintótico, este tiende a detenerse con la profundidad y el tiempo (Fig. 2).

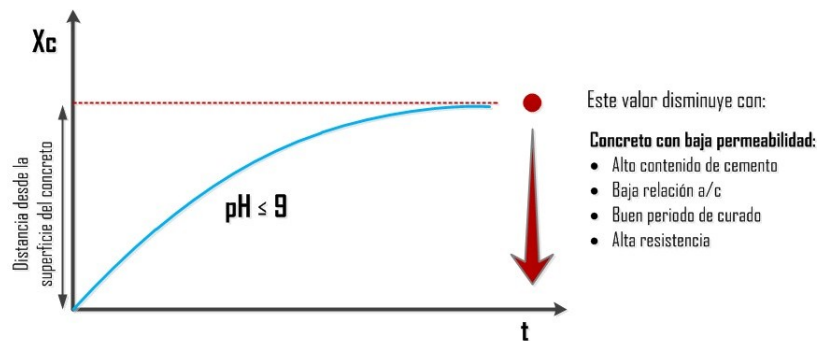


Figura 2. Avance del frente de carbonatación en función del tiempo.

2.4.5 Factores que influyen en la carbonatación

De la información reunida al proceso de carbonatación, muestran que los concretos relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los concretos densos, bien compactados. Una menor relación a/c y una buena compactación reducen la permeabilidad y limitan la carbonatación a la superficie. En las áreas industriales, donde hay mayor concentración de CO_2 en el aire, las tasas de carbonatación pueden ser mayores [3].

Se aumenta considerablemente el grado de la carbonatación en el concreto que tiene bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, baja resistencia y pasta altamente permeable (porosa). La profundidad de la carbonatación en el concreto de buena calidad

y bien curado tiene generalmente poca importancia desde que el refuerzo en el concreto tenga suficiente recubrimiento (Fig.3).



Figura 3. Efecto de la carbonatación en el refuerzo y el concreto. Tomado de [15].

2.4.6 Efecto de la carbonatación sobre la porosidad y la resistencia

Según [21], la reacción de carbonatación resulta en cambios de volumen, el carbonato de calcio tiene un volumen molecular que es 11% mas grande que el de la portlandita a la que sustituye. La formación del carbonato reduce la permeabilidad por el incremento del volumen. La etringita también está sujeta a carbonatación descomponiéndose en calcita, yeso y gel de alúmina.

La carbonatación del concreto fabricado con cemento portland incrementa la resistencia y disminuye la porosidad, pero tiene como desventaja la disminución del pH. La reducción de la porosidad previene que el oxígeno y los cloruros penetren hacia el refuerzo. El efecto de la carbonatación en concreto fabricado con cemento de alta alúmina, es similar a la de los hechos con cemento portland, en este caso los productos de la carbonatación son carboaluminatos y no carbonato de calcio. En el caso del concreto fabricado con cemento de escoria de alto horno la carbonatación causa un incremento en la porosidad y una reducción de la resistencia. La carbonatación causa un marcado incremento en la porosidad y una reducción de la resistencia en concretos con cementos supersulfatados, probablemente debido a la carbonatación de la etringita [21].

2.5 ENSAYOS REALIZADOS AL CONCRETO

Con el fin de comprobar las propiedades o las condiciones en las que se encuentra el concreto, se llevan a cabo una serie de ensayos. Estos dependen de la necesidad o lo que se busque medir y de allí se elige, si es necesario sacar un núcleo de una estructura o realizar una prueba que no comprometa la integridad de la misma.

2.5.1 Ensayos destructivos

El inconveniente de realizar estas pruebas, es que hay que sacar núcleos a las estructuras debilitándolas con el fin de poder evaluar la propiedad o las condiciones del concreto.

Resistencia a la compresión: Su determinación brinda un medio de evaluar la calidad del concreto y se define como la máxima resistencia a carga axial que soporta. Normalmente se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (MPa, PSI o kgf/cm²). El factor clave que influye de manera significativa en la resistencia a la compresión, es la relación a/c; también intervienen otros como el tipo y calidad del cemento, características de los agregados, condiciones de humedad durante el curado y edad del concreto [5].

Porosidad. Se relaciona con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad y su volumen total. Específicamente, la porosidad determina las proporciones a las que especies agresivas entran en la masa y causan destrucción [5, 22].

La determinación de la porosidad consiste en la medida del volumen de sólidos o granos del núcleo de la probeta, seguida por la medición del volumen total del mismo [5].

Ataque químico. Se hace con el fin de determinar la profundidad de la carbonatación midiendo el pH del concreto. Para esto el indicador más utilizado es la fenolftaleína al 1% en alcohol etílico. Esta solución es incolora en pH inferiores a 8.5 [4].

2.5.2 Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos son una excelente ayuda al momento de determinar la calidad del concreto endurecido, ya que se puede extraer información valiosa y efectuar un diagnóstico sin necesidad de dañar la estructura.

En la variedad de ensayos no destructivos, aplicables al concreto son:

La Inspección visual. Aunque muchas veces se desprecia, es el ensayo por excelencia y debe complementar las otras pruebas no destructivas aunque su defecto es que es subjetiva. Generalmente se observa cuidadosamente el concreto a fin de conocer cuál es su estado superficial y detectar posibles defectos como: malos acabados, discontinuidades abiertas a la superficie y porosidad.

El ultrasonido, en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta o baja frecuencia son introducidas en un material con el fin de detectar fallas como muestra la figura 4.

VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU). Esta técnica es una de las más utilizadas para el estudio del comportamiento de estructuras hechas en concreto, ya que gracias a ella, se pueden localizar las zonas que demuestran mayor daño y con ello, poder tomar medidas preventivas o de reparación.

Las ondas son producidas por un transductor generador y recibidas por un transductor receptor. Cualquier interferencia al paso de la onda, tiene como consecuencia un desvío de la misma produciendo un mayor recorrido, lo cual lleva a un mayor tiempo de vuelo.

La frecuencia que se utiliza en la inspección de concreto, es de baja frecuencia, de alrededor de 20 a 150 KHz, debido a la heterogeneidad del concreto, según lo indica la norma ASTM C597 y otras técnicas complementarias como la Norma Técnica Colombiana NTC 4325.

Debido a que se conocen las dimensiones de los elementos en estudio, es posible obtener la velocidad de transmisión de la onda, lo cual es un parámetro para determinar la condición física o la calidad del material en estudio.

Principio de la técnica. Consiste en determinar el tiempo durante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una dimensión conocida del elemento de concreto. Así, la longitud de la trayectoria dividida por el tiempo que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la velocidad de pulso ultrasónico [5].

$$V = \frac{L}{t} \quad [11]$$

Dónde: V: Velocidad de pulso

L: Longitud de la trayectoria

t: Tiempo requerido por el pulso para atravesar la longitud

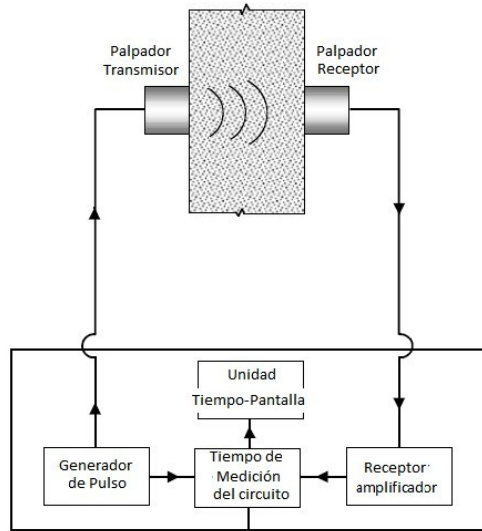


Figura 4. Diagrama esquemático de la medida de la velocidad de pulso ultrasónico. Tomado de [13].

Los métodos por los cuales se puede medir la velocidad de pulso ultrasónico son [22]:

Transmisión directa. Los terminales del emisor y el receptor son colocados y enfrentados en superficies opuestas del concreto. Este método presenta grandes ventajas pues produce una mayor sensibilidad y una ruta de viaje más definida por esto es empleada en vigas y columnas. (Figura 5A).

Transmisión semi-directa. Las terminales son colocadas adyacentemente formando generalmente un ángulo de 90°, este método se emplea en pilares, estribos o zapatas. (Figura 5B).

Transmisión indirecta o superficial. En este caso las terminales son colocadas en la misma superficie del concreto. Este es el método menos utilizado debido a la baja sensibilidad. (Figura 5C).

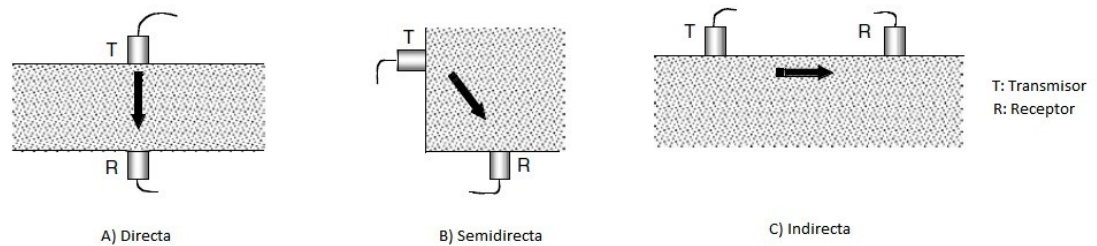


Figura 5. Métodos de medición de VPU. Tomado de [13].

Factores que pueden afectar la VPU. Con el fin de aplicar efectivamente este método y obtener buenos resultados, es necesario tener en cuenta una serie de factores que afectan la velocidad de pulso [5]:

- a) **Relación a/c:** tiene una relación inversamente proporcional, es decir, un aumento en la relación a/c lleva a una disminución en la velocidad de pulso, en la resistencia a la compresión y en la flexión.
- b) **Contenido de humedad:** Su influencia se debe principalmente al efecto de las diferentes condiciones de curado en la hidratación del cemento y otras a la presencia de agua libre en los poros. Es importante que estos efectos sean cuidadosamente considerados al estimar la resistencia.
- c) **Temperatura del concreto:** las variaciones en la temperatura no tienen un efecto significativo sobre la velocidad de pulso ultrasónico, siempre y cuando se encuentren dentro de un rango de 10°C a 30°C.
- d) **Forma y tamaño del espécimen:** La velocidad de pulso es independiente de la forma y el tamaño del espécimen, siempre y cuando la menor dimensión lateral del elemento sea mayor que la longitud de onda del pulso; por debajo de este valor, la VPU puede verse reducida considerablemente; esta reducción depende de la relación entre la menor dimensión lateral y la longitud de la onda.
- e) **Tamaño de los agregados, tipo y contenido:** La velocidad de pulso es afectada significativamente por el tipo y la cantidad de agregados. Para una misma mezcla de concreto y con la misma resistencia a la compresión, concretos con agregados redondeados presentan las velocidades de pulso más bajas, mientras que las

pedras trituradas las más altas. Las velocidades de pulso son mayores en los agregados que en la pasta de cemento.

- f) **Edad del concreto:** el comportamiento de la velocidad de pulso frente a la edad del concreto, es similar al de la resistencia contra el tiempo, primero presenta un aumento rápido y posteriormente se estabiliza.

3. METODOLOGÍA

En la figura 6 se muestra un diagrama de flujo con las etapas que se llevaron a cabo en la realización de la presente investigación.

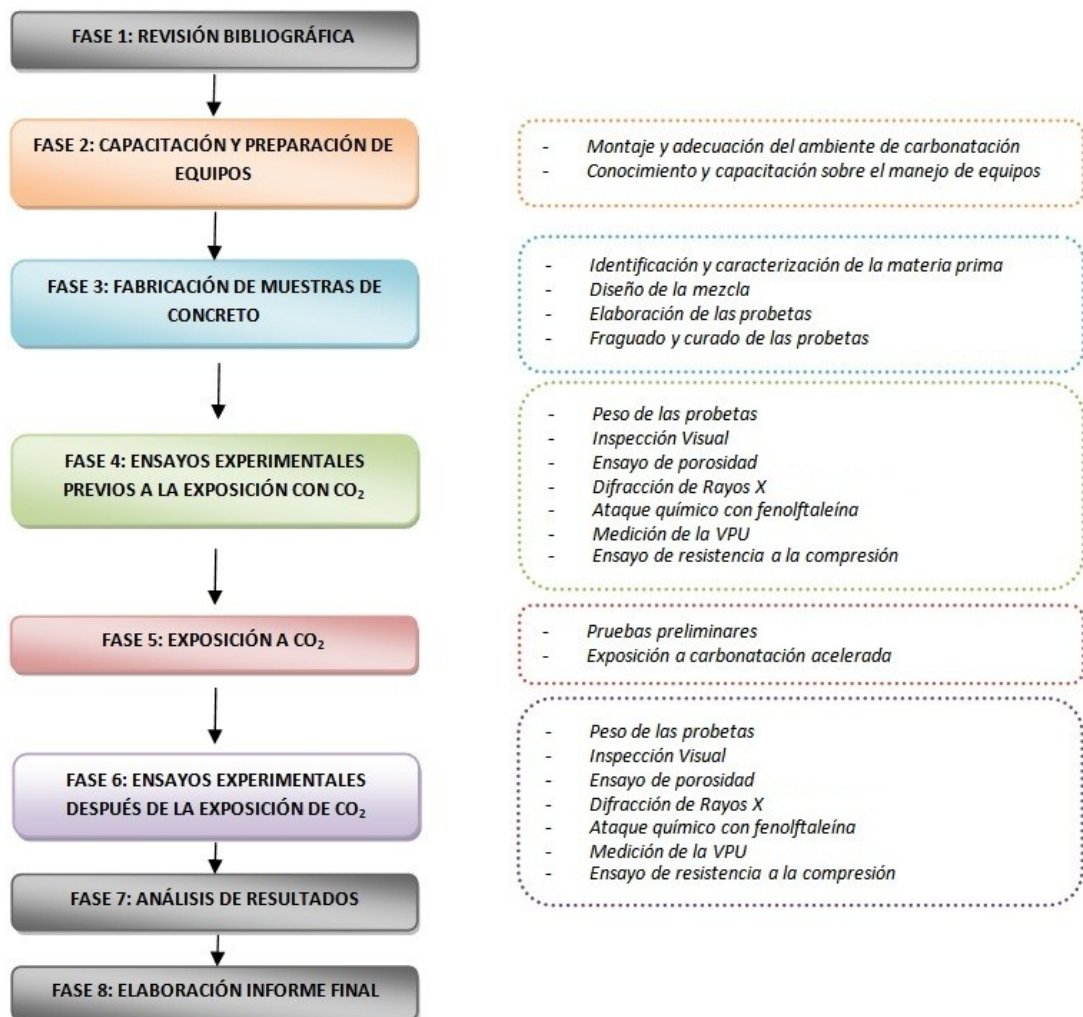


Figura 6. Diagrama de la metodología.

Una descripción detallada de cada una de las fases y sus respectivas etapas se encuentra a continuación.

3.1 FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta fase se realizó con el fin de adquirir y afianzar conceptos que permitieran profundizar el conocimiento acerca del concreto, la carbonatación, la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión y demás temas que debían conocerse para el desarrollo de la investigación.

Esta fase abarcó todo el tiempo destinado para la realización de este proyecto y fue llevada a cabo de la siguiente manera:

El inicio de la investigación proporcionó información acerca de las características del concreto, la VPU y la carbonatación, lo cual permitió entender el mecanismo de reacción, definir las variables que más influyen sobre este proceso para establecer la metodología del ataque acelerado que se adaptara a los objetivos planteados y así fijar el punto de partida de este proyecto.

El desarrollo de la investigación brindó conocimiento acerca de las características de los equipos, los ensayos a emplear y sobre el proceso de fabricación del concreto.

El final de esta investigación permitió establecer el efecto del ataque acelerado con CO₂ sobre el concreto, así como realizar un análisis de resultados consistente para dar las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Esta etapa se efectuó mediante la recopilación y análisis de libros, artículos, tesis de grado, normas (NTC, ASTM, INCONTEC), páginas web, entre otras relacionadas con los temas de interés de esta investigación.

3.2 FASE 2: CAPACITACIÓN Y PREPARACIÓN DE EQUIPOS

Los objetivos de este trabajo fueron trazados con el fin de determinar diferencias en las propiedades de un concreto carbonatado y otro libre de daño, esta medición implica el manejo de equipos que requieren cierta destreza, hecho que hace necesario un entrenamiento para el manejo adecuado de los mismos, especialmente de la cámara de carbonatación, el equipo de ultrasonido, la máquina de resistencia a la compresión y el equipo de porosidad. A continuación se presentan algunos detalles de los mismos.

3.2.1 Cámara de carbonatación

Para el estudio del proceso de carbonatación se construyó un equipo que acelera artificialmente la velocidad de reacción por medio del aumento de la concentración de dióxido de carbono en una atmósfera controlada.

La cámara de carbonatación es un sistema capaz de simular, mantener condiciones estables y constantes de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono. El diseño de la cámara empleada fue tomado de la bibliografía consultada, ajustado a las necesidades de la investigación y la cámara fue construida por una empresa de la ciudad.

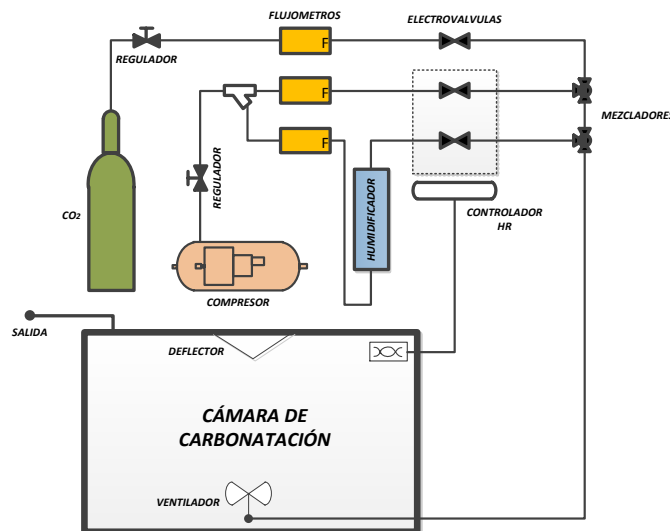


Figura 7. Esquema de la cámara de carbonatación.

En las figuras 7 y 8 se muestran respectivamente el esquema de la cámara de carbonatación y una fotografía de la misma con sus partes constitutivas.

La cámara está fabricada en lámina de acrílico, el mueble está dividido en dos partes, en una se encuentra el tablero de control y el sistema de operación digital, eléctrico y electro mecánico y la otra parte recubierta con una tapa acrílica actúa como un depósito que combina aire, humedad relativa (HR) y CO_2 a determinadas condiciones de temperatura.

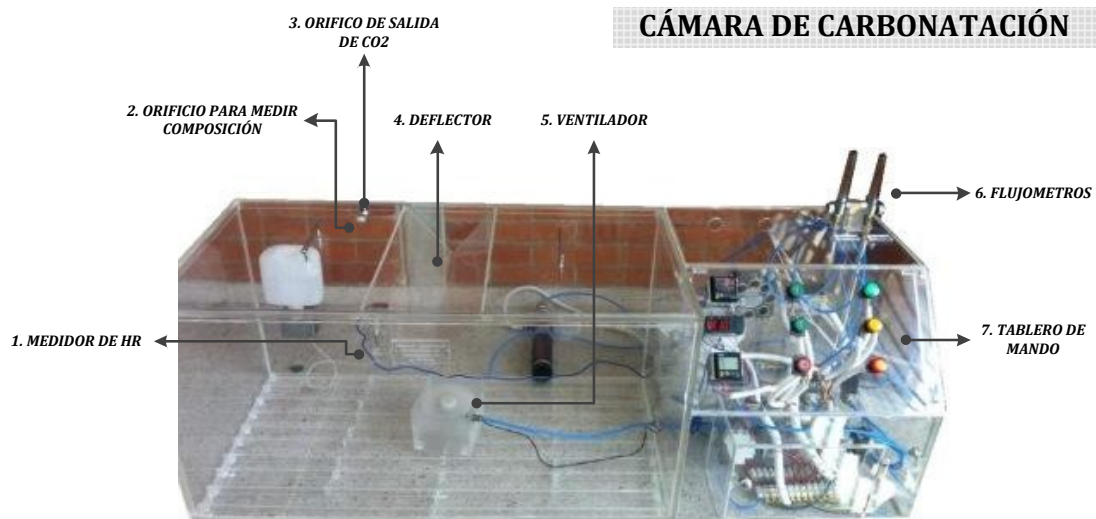


Figura 8. Cámara de carbonatación y sus partes constitutivas.

Esta cámara con dimensiones de 1 m de largo 0,5 m de ancho y 0,5 m de alto, tiene forma de prisma rectangular y posee una tapa acrílica con un espesor de 1 cm, presenta dos orificios de 6 mm de diámetro, uno de ellos sirvió como salida de aire y el otro se utilizó para introducir la sonda del equipo de monitoreo ENRAC 700 (ver figura 9) para medir la concentración de CO_2 . En uno de sus costados se hizo un orificio de 5 mm para ubicar el sensor del controlador de humedad relativa, dentro de la cámara se conectó una manguera que transporta el aire enriquecido con CO_2 desde el orificio de entrada hasta la parte media del fondo de la cámara, en donde se ubicó un ventilador y justo por encima de éste, en la parte media superior, se situó un deflector para lograr una mejor distribución del flujo de aire, como se aprecia en la figura 8.



Figura 9. Equipo ENRAC 700 (ENRAC INC). Tomado de [<http://www.aikencolon.com/enerac-700-combustion-emission-system.html>].

Para obtener la concentración deseada de CO_2 y de humedad relativa, se mezcló el flujo de CO_2 proveniente de un tanque comercial de 25 kg, con aire a dos niveles de humedad relativa (aire seco y húmedo) provenientes de un compresor. Se controló el volumen de los gases (aire y CO_2) por medio de medidores de flujo de distintas capacidades, utilizándose tres de ellos: uno para controlar el volumen de CO_2 y los otros dos para aire seco y húmedo (ver figura 10). La salida del compresor se dividió en dos flujos, uno en dirección al medidor de flujo de aire seco y otro en dirección a un humidificador, el cual es un recipiente acrílico cerrado con forma de tubo colocado de manera vertical, que contiene agua, y cuenta con dos orificios situados en la tapa superior, por uno de estos orificios entra el aire que proviene del compresor y por el otro sale aire húmedo, este flujo a la salida del humidificador se mezcló junto con el aire seco del compresor y el flujo de CO_2 para dirigirse hacia el interior de la cámara [4].

La capacitación acerca del manejo del equipo fue recibida por parte del fabricante, quien estableció condiciones de seguridad en cuanto al manejo, así como instrucciones acerca del funcionamiento de los controladores de humedad relativa, tiempo y temperatura.



Figura 10. Otros componentes de la cámara de carbonatación.

3.2.2 Equipo de ultrasonido

Se empleó en la investigación el equipo de baja frecuencia CNS FARNELL PUNDIT plus modelo PC 1006 (ver figura 11), el cual se encuentra en las instalaciones del laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y ha sido utilizado en la evaluación de concretos.



Figura 11. Equipo PUNDIT PLUS PC 1006. Tomado de [<http://www.jroma.pt/images/punditplus.jpg>].

3.2.3 Máquina de resistencia a la compresión

El equipo marca AMSLER utilizado, se encuentra ubicado en el Centro de Caracterización de Materiales de la escuela de Ingeniería Civil, es una máquina que permite realizar ensayos de resistencia a la compresión aplicando una carga axial en un rango de 5 a 80 toneladas. (Ver figura 12)

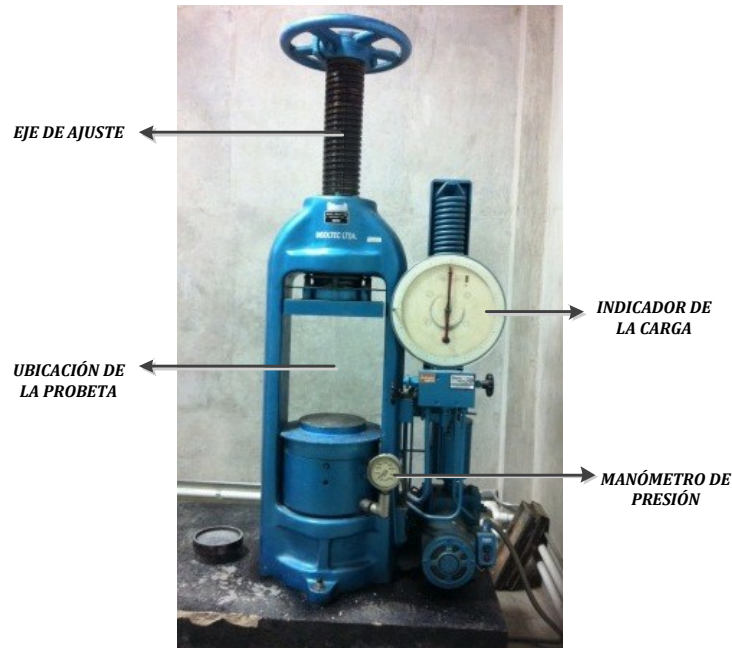


Figura 12. Máquina para medir resistencia a la compresión marca AMSLER.

3.2.4 Equipo de porosidad

El equipo empleado para esta prueba fue el porosímetro de campo Ruska, el cual hace parte de los equipos de la escuela de Ingeniería de Petróleos y está ubicado en la sede de Guatiguará.

Es un instrumento pequeño y portátil como muestra la figura 13, utilizado para medir la porosidad efectiva de muestras de concreto. Es un porosímetro de alta presión que tiene un bloque colector al que se le adjunta un cilindro de medición y un montaje de pistón para medir el desplazamiento de volumen; además dispone de un manómetro de mercurio que indica la presión del sistema del porosímetro.

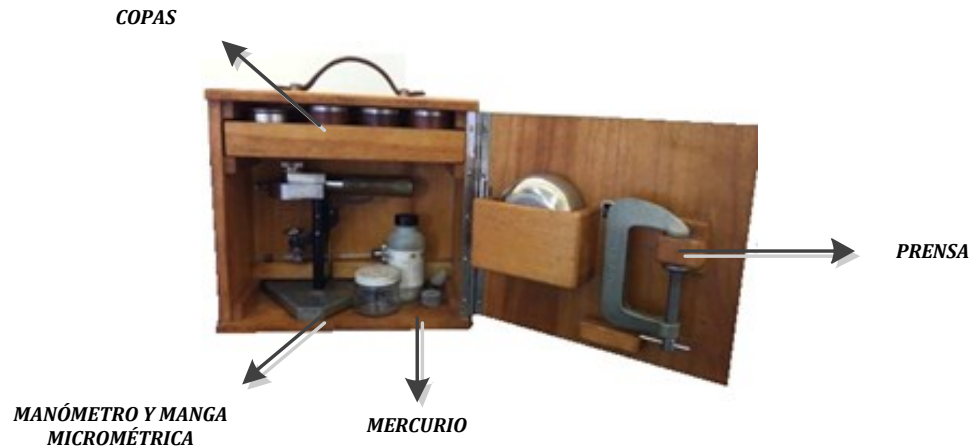


Figura 13. Porosímetro de campo RUSKA.

Este equipo a su vez, cuenta con un juego de tres copas de núcleos de diferentes tamaños y un picnómetro con tapa y plato y un tarro lleno de mercurio.

3.3 FASE 3: FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO

Para la realización de esta fase, se tuvo en cuenta las recomendaciones consignadas en el libro de Tecnología del concreto y del mortero [22].

3.3.1 Identificación y caracterización de la materia prima.

En esta actividad se verificó que el cemento cumpliera con las exigencias en cuanto a propiedades físicas y mecánicas de la norma NTC 121 así como los requerimientos de propiedades químicas de la norma NTC 321.

Los agregados se caracterizaron mediante las normas NTC 92, NTC 176, Y NTC 237 que permiten determinar la masa unitaria suelta y compactada, el peso específico, el porcentaje de absorción y el porcentaje de vacíos de los agregados finos y gruesos. Adicionalmente se determinó la granulometría de la arena, con ello el módulo de finura mediante las especificaciones de la norma NTC 77.

Detalles de la caracterización de la materia prima se encuentra en el anexo A. Se constató que el agua fuese potable y estuviese exenta de sustancias que afecten la resistencia y durabilidad del concreto, actividad que se realizó mediante el análisis fisicoquímico y microbiológico suministrado por el acueducto metropolitano de Bucaramanga que se presenta en el mismo anexo.

3.3.2 Diseño de mezcla

Aunque hoy en día existen diversos métodos de diseño disponibles y ellos dan aproximadamente las mismas proporciones relativas de materiales, el método más común y utilizado es la “PRÁCTICA RECOMENDABLE PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL Y CONCRETO PESADO A.C.I.211” [22], una descripción detallada del procedimiento para calcular la dosificación del diseño de mezcla se presenta en el anexo B, este método fue el empleado para la presente investigación.

Inicialmente, se asumió realizar un concreto con una resistencia a la compresión de 21 MPa que corresponde a una relación a/c de 0,55, sin embargo las pruebas preliminares adelantadas mostraron resultados poco satisfactorios, debido en gran parte a que los especímenes de concreto con esta mezcla no carbonataron lo suficiente como para obtener resultados significativos a la hora de utilizar el ensayo de ultrasonido. Con el fin de garantizar que se diera la carbonatación en toda la probeta de concreto, finalmente se optó por una relación a/c de 0,8 con una resistencia a la compresión de 12 MPa lo cual es una mezcla más permeable que la anterior.

3.3.3 Elaboración de probetas

Una vez realizado el diseño de mezcla fueron elaboradas 60 probetas cilíndricas de dimensiones 10cm de diámetro por 20cm de altura siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 1377.

La mezcla fue depositada en moldes plásticos reutilizables y desencofrada mediante un compresor a 50 psi (figura 14).

Después de definir el número total de probetas se estableció que se realizarían paulatinamente, es decir se prepararía mezcla solo para 10 probetas y no para todas al

mismo tiempo. El procedimiento inició con el peso en una balanza analítica de cada uno de los ingredientes de la mezcla, una vez pesados los componentes se realizó limpieza en los moldes plásticos y un humedecimiento interno con ACPM para facilitar el desencofrado. La fabricación del concreto empezó mezclando uniformemente el agregado fino con el cemento, una vez lista la mezcla de estos dos ingredientes se abre un espacio centrado y de forma circular dentro de ella con el fin de ubicar el agregado grueso y el agua, finalmente con la ayuda de herramientas se combinan todos los ingredientes hasta obtener un concreto consistente y homogéneo.



Figura 14. Compresor y formaletas utilizados en la fabricación de las probetas. Tomado de [23].

Obtenida la mezcla deseada se depositó en los moldes plásticos en tres capas del mismo espesor, cada capa se introdujo de forma independiente y antes de la adición de la siguiente capa se apisonó dándole a la mezcla 25 golpes en su área transversal y sin apisonar la capa anterior con una varilla de 1 cm de diámetro y 30 cm de altura como especifica la norma NTC 1377, además se tuvo la precaución de golpear las paredes exteriores del molde con un martillo de goma para eliminar el aire atrapado, cuando las tres capas estuvieron dentro de los moldes con la ayuda de un palustre se mejoró el acabado superficial de la cara de la probeta que queda expuesta al ambiente.

3.3.4 Fraguado y curado de probetas

Las probetas se dejaron fraguar durante 84 horas en los moldes plásticos, una vez transcurrido este tiempo se desencofraron utilizando un compresor a 50 psi, después de retirados los moldes se ubicaron las probetas en el sitio destinado para el proceso de curado, el cual que se realizó en condiciones ambientales.

3.4 FASE 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES PREVIOS A LA EXPOSICIÓN CON DIÓXIDO DE CARBONO

En esta fase experimental se realizaron siete pruebas a fin de conocer el estado inicial de las probetas de concreto y así comparar estos mismos parámetros después de su exposición a CO₂. Los ensayos se efectuaron a los 28 días del tiempo de curado y las pruebas realizadas fueron:

- Peso de las probetas
- Inspección Visual
- Ensayo de Porosidad
- Difracción de Rayos X (DRX)
- Ensayo con fenolftaleína
- Ensayo de Velocidad de Pulso ultrasónico (VPU)
- Ensayo de Resistencia a la Compresión

La distribución de las probetas a ensayar antes de la exposición a CO₂ se muestra en la figura 15. A la totalidad de las probetas (0 a 27) se les realizó lectura de pesos e inspección visual, de las cuales a ocho probetas (1 a 8) se les midió VPU y resistencia a la compresión y las diecinueve restantes (9 a 27) se expusieron a CO₂. La probeta cero se asignó para los ensayos de porosidad y DRX. Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas son mostrados en el siguiente capítulo.

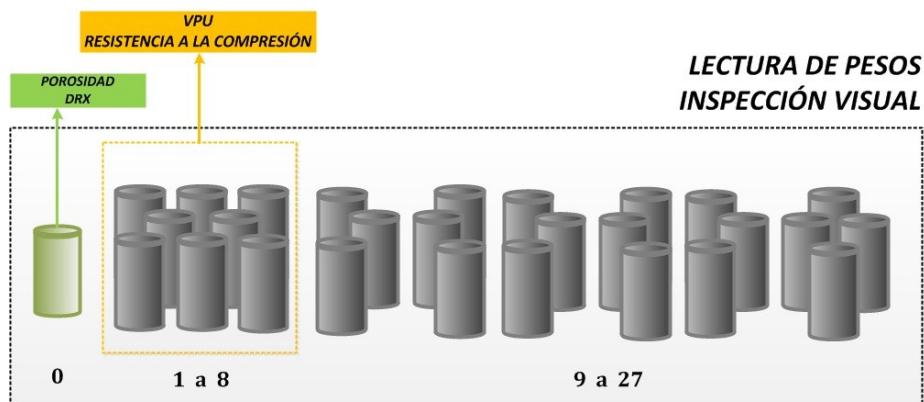


Figura 15. Distribución de ensayos previos a la exposición de dióxido de carbono.

3.4.1 Peso de las probetas

A cada una de las probetas después de los 28 días de curado, se le realizó la lectura de pesos por medio de una balanza que permite la lectura de tres cifras significativas. Ver figura 16.



Figura 16. Balanza digital.

3.4.2 Inspección visual

Después de la lectura del peso, se realizó un análisis visual a todas las probetas con el fin de observar su estado superficial y principales características físicas, como porosidad, grietas superficiales o malos acabados.

3.4.3 Ensayo de porosidad

Para la realización de este ensayo se utilizó el porosímetro de campo RUSKA (ver figura 13). Se eligió una probeta libre de carbonatación por fuera de las 17 escogidas en el esquema para realizar este ensayo, y así comparar la porosidad con un concreto carbonatado. Fue necesario extraer núcleos cúbicos de 2 cm de lado, para efectuar la medición. Los resultados obtenidos se presentan en el próximo capítulo.

3.4.4 Difracción de Rayos X

Mediante el ensayo de DRX se buscó identificar y cuantificar los compuestos cristalinos presentes en la fase no carbonatada. La metodología realizada para la preparación de la muestra y el desarrollo de este ensayo fue proporcionada por “El Laboratorio de Difracción de Rayos X” de la Universidad Industrial de Santander.

La preparación de la muestra para efectuar este procedimiento, partió de una muestra de un concreto no carbonatado. Esta muestra fue pulverizada en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μm (400 mesh). El espécimen seleccionado fue montado en un portamuestra mediante la técnica de llenado frontal. El análisis se realizó en un

difractómetro de polvo marca SIEMENS modelo D500. Los resultados del análisis cuantitativo y cualitativo se encuentran consignados en el siguiente capítulo.

3.4.5 Ensayo químico con fenolftaleína

Con el fin de asegurar que las probetas no presentaran carbonatación alguna, se roció una solución al 1% de fenolftaleína en alcohol industrial, sobre una probeta de concreto, elegida al azar.

3.4.6 Ensayo de ultrasonido

Para medir la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), como se indicó anteriormente se empleó el equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA, utilizando transductores de 54KHz de frecuencia. Este equipo mide el tiempo de propagación de la onda a través de la pieza con relación a la distancia entre los transductores. Las mediciones se aplicaron a ocho probetas, y a cada una se le tomaron dos lecturas en tres puntos diferentes dentro de la misma cara como muestra la figura 17, luego estos valores fueron promediados y registrados.

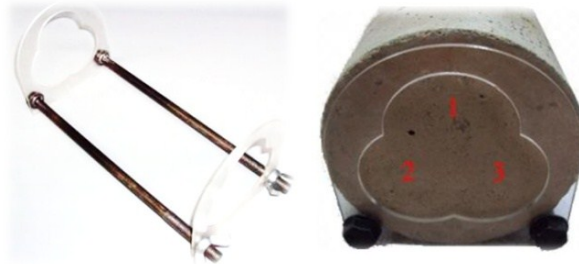


Figura 17. Guías utilizadas en la medición de VPU. Tomado de [26].

El procedimiento que se llevó a cabo para realizar este ensayo se encuentra dentro de los lineamientos de la norma ASTM C597-02.

Inicialmente se preparó y se acondicionó la superficie de cada probeta, con el fin de nivelar y limpiar las caras, para obtener un mejor acople de los transductores y unas mediciones óptimas. Para este acondicionamiento se utilizó una piedra esmeril y lija número 80.

Posteriormente, se realizó la conexión adecuada del equipo para la medición y se ajustaron los parámetros bajo los cuales se iba a trabajar (ver tabla 3). Se llevó a cabo su

calibración y finalmente se procedió a tomar las mediciones de las probetas. El acoplante utilizado fue vaselina y se empleó el método directo.

Tabla 3. Parámetros de trabajo del equipo CNS FARNELL LTDA PUNDIT PLUS.

Voltaje	500 V
Unidades	Métricas
Modo de pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	Apagado
Pulso de referencia	10 segundos

3.4.7 Ensayo de resistencia a la compresión

Para medir la resistencia a la compresión se empleó la máquina marca AMSLER, dentro de los rangos de velocidad y cargas permitidas. Este equipo mide la carga soportada en toneladas por la probeta antes de fallar (ver figura 12). El ensayo de resistencia a la compresión se realizó a las ocho probetas libres de carbonatación. Las diecinueve probetas restantes (de la 9 a la 27) se expusieron a CO₂. El procedimiento que se llevó a cabo para realizar este ensayo se encuentra dentro de los lineamientos de la norma ASTM C39/C39M-04.

Inicialmente se nivelaron las caras de las probetas con un desbaste superficial, con el fin de eliminar cualquier irregularidad y garantizar caras planas paralelas. Además, se midió su diámetro con el fin de calcular el área al cual se aplicó la carga.

Una vez las probetas estuviesen con las bases limpias, se colocaron cuidadosamente en el equipo, con el fin de garantizar que quedaran alineadas con el centro de la placa de carga. Luego se aplicó la carga, esta se hizo a una velocidad uniforme y continua hasta que se produjo la falla en la probeta.

3.5 FASE 5: EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO

Para la realización de esta fase se trabajó con la cámara de carbonatación en las instalaciones del edificio de caracterización de materiales Álvaro Beltrán Pinzón.

La cámara de carbonatación se calibró con las condiciones de operación que se muestran en la tabla 4. Para verificar en el ambiente de la cámara el 70% de CO₂, se utilizó el equipo de monitoreo ENRAC 700 (ENRAC INC) de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 4. Condiciones de operación de la cámara de carbonatación.

HUMEDAD RELATIVA	50-70
CONCENTRACIÓN DE CO ₂	70%
TEMPERATURA	25°C

Una vez establecidas las anteriores condiciones, se registraron los flujos obtenidos que muestra la tabla 5 y se mantuvieron para realizar la totalidad de las pruebas, garantizando así, el mismo ambiente para cada exposición. Con respecto al aire húmedo, no se necesitó abrir la válvula debido a que la humedad relativa se mantuvo durante la realización de las pruebas.

Tabla 5. Flujos obtenidos para aire y dióxido de carbono.

FLUJO	LPM
AIRE SECO	100
AIRE HÚMEDO	-
CO ₂	7,5

Con las condiciones de operación y los flujos establecidos, se procedió a realizar la carbonatación de los especímenes. Las diecinueve probetas restantes del numeral anterior (9 a 27), se dividieron en seis tiempos de exposición, cada uno se realizó con tres probetas, a diferencia del sexto tiempo de exposición en el cual se atacaron cuatro especímenes como se muestra en la figura 18.

Pruebas preliminares

Una vez realizada la calibración de la cámara, se llevaron a cabo 3 pruebas, introduciendo en cada una de ellas dos probetas para tiempos de carbonatación de 3, 6 y 12 horas respectivamente, con el fin de conocer el frente estimado de carbonatación para

los tiempos de exposición estipulados. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo de resultados.

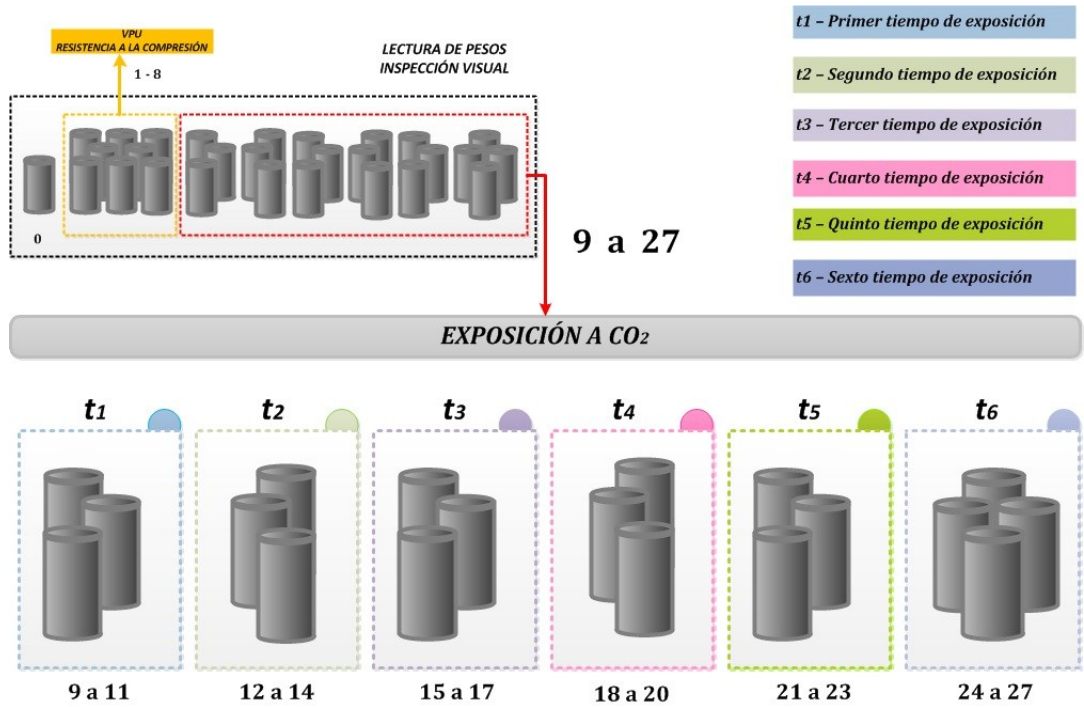


Figura 18. Distribución de probetas para cada tiempo de exposición a dióxido de carbono.

3.6 FASE 6: ENSAYOS EXPERIMENTALES DESPUÉS DE LA EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO

Culminada la exposición a CO₂, a dieciocho de las diecinueve probetas expuestas se les realizaron las mismas pruebas descritas en el numeral 4.4 con el fin de comparar los resultados obtenidos. La figura 19 muestra la distribución de ensayos realizados: lectura de pesos, inspección visual, VPU y resistencia a la compresión, dejando así la diecinueveava probeta solo para aplicarle porosidad y DRX.

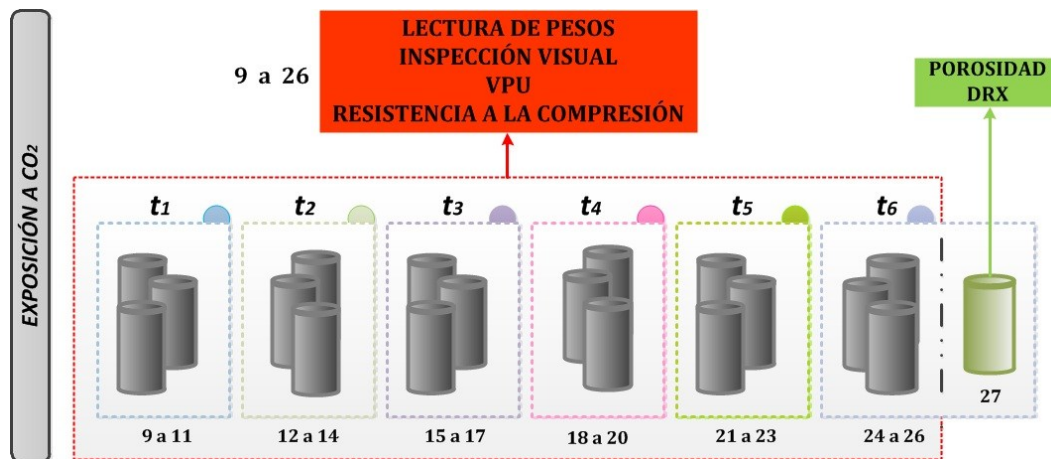


Figura 19. Distribución de ensayos después de la exposición a dióxido de carbono.

3.6.1 Peso de las probetas

Se realizaron las lecturas de pesos a las probetas de la 9 a la 26, con el fin de conocer si el proceso de reacción aportaba o disminuía a los especímenes expuestos.

3.6.2 Inspección visual

Después de la lectura del peso, se realizó un análisis visual con el fin de observar cambios superficiales, como porosidad y cambios de tonalidad.

3.6.3 Ensayo de porosidad

A una probeta carbonatada se le realizó el ensayo, siendo esta la cuarta probeta del sexto tiempo de exposición (probeta número 27) como muestra la figura 19. El ensayo se realizó con el fin de observar la variación de la porosidad que genera el proceso de carbonatación.

3.6.4 Difracción de Rayos X

Mediante el DRX se buscó identificar y cuantificar los compuestos cristalinos presentes en la fase carbonatada. La metodología y las condiciones realizadas para este ensayo fueron semejantes a la ejecutada para un concreto libre de carbonatación indicada en el numeral 3.4.4.

3.6.5 Ensayo químico con fenolftaleína

Con el fin de determinar el espesor de la capa carbonatada, se hizo un corte longitudinal y se roció una solución al 1% de fenolftaleína en alcohol industrial, sobre las probetas de concreto. Las zonas con un pH inferior a 9 que no cambiaron de color, se

consideran áreas carbonatadas, mientras que, las zonas con un pH superior a 9 tomaron un tono color rosa. Inmediatamente se midió el espesor del frente de carbonatación, con ayuda de un calibrador digital. Este método se basó en la norma RILEM CPC-18 [24].

Determinación de la profundidad de carbonatación.

Las mediciones de profundidad de carbonatación se realizaron en las zonas que muestra la figura 20 después de hacer un corte longitudinal a la probeta, se efectuaron tres lecturas por zona debido a que el frente que se presentó fue continuo.

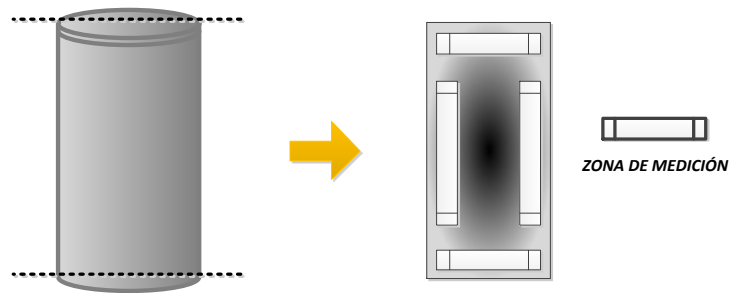


Figura 20. Zonas de medición de la profundidad de carbonatación.

Con base en estos valores, se obtuvo un promedio de las mediciones tomadas para cada probeta, y así reportar un valor de profundidad de carbonatación.

3.6.6 Ensayo de ultrasonido

Las mediciones se aplicaron a los especímenes de la 9 a la 26, de igual manera como esta descrito en el numeral 3.4.6, con el fin de conocer si la técnica es sensible al proceso de carbonatación.

3.6.7 Ensayo de resistencia a la compresión

La prueba se aplicó a las probetas de la 9 a la 26, de igual manera como se describió en el numeral 3.4.7. El ensayo se realizó con el fin de observar las variaciones de resistencia a la compresión que genera el proceso de carbonatación.

En la figura 21 se presenta un resumen de la distribución total de los ensayos realizados antes, durante y después a la exposición a CO₂.

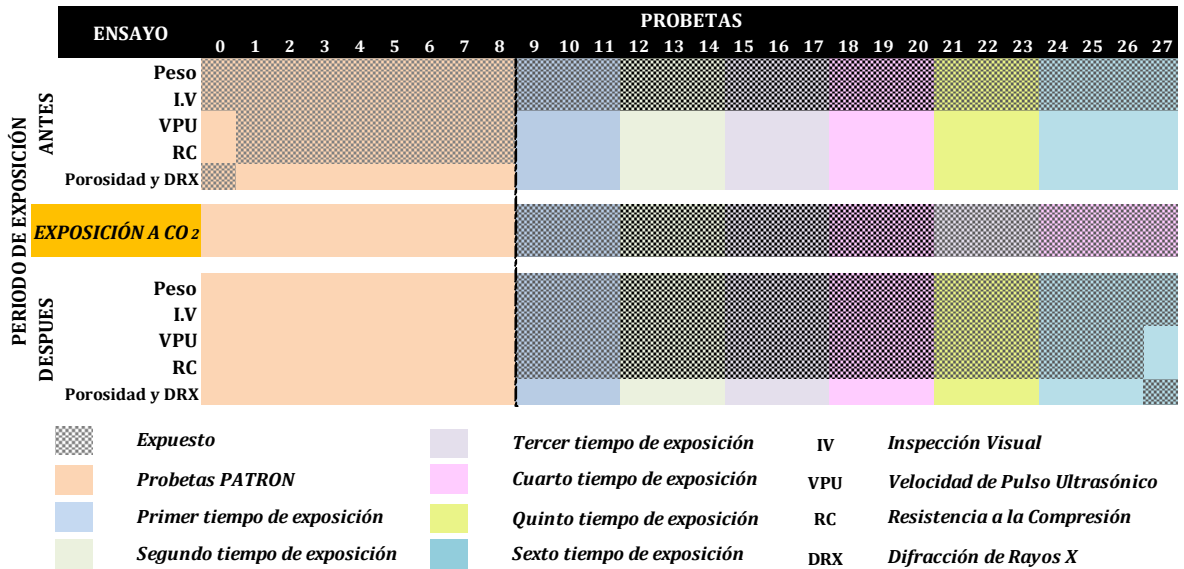


Figura 21. Distribución total de ensayos.

3.7 FASE 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta fase de la metodología se analizan los datos registrados en los diferentes ensayos y se correlacionan con el fin de evaluar los cambios ocurridos en el concreto debidos al ataque realizado.

3.8 FASE 8: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Se presenta un informe detallado de la investigación que contiene tanto el marco teórico y metodología como los resultados, las relaciones existentes entre la carbonatación y la velocidad de pulso ultrasónico, la porosidad y la resistencia a la compresión, igualmente la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en un concreto carbonatado, las respectivas conclusiones y las recomendaciones derivadas de la fase experimental.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo muestra los resultados obtenidos con el seguimiento de la metodología planteada y su respectivo análisis. Se presenta la recopilación de los resultados de las pruebas preliminares, las medidas de peso, los ensayos de inspección visual, porosidad, DRX, ataque químico, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión en las probetas de concreto sin refuerzo antes y después de su ataque con CO₂.

Adicionalmente se muestran las relaciones obtenidas entre el tiempo de carbonatación y la velocidad de pulso ultrasónico, la porosidad y la resistencia a la compresión, igualmente la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Lo anterior se realizó a un concreto con tiempos entre 0 y 30 horas de exposición a CO₂, con relación a/c de 0.8 y con 28 días de curado.

4.1 FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO

A continuación se presentan los resultados más significativos de la identificación y caracterización de la materia prima junto con el diseño de mezcla y además algunas características del agua y del cemento, lo anterior se encuentra consignado en los anexos A y B.

4.1.1 Identificación y caracterización de la materia prima

Los resultados obtenidos del agregado fino y grueso durante esta etapa se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de las características evaluadas para los agregados fino y grueso.

AGREGADO	Fino	Grueso
Gravedad específica aparente SSS	2,645	2,611
Peso unitario suelto	1373,02	1466,66
Peso unitario compactado	1582,8	1589,88
Porcentaje de absorción	2,249	1,419
Porcentaje de vacíos	40,16	39,10

El módulo de finura de la arena se determinó bajo las especificaciones de la norma NTC 77, el valor obtenido fue de 2,4 que se encuentra dentro del rango recomendado (2.3 a 3.1) [22].

4.1.2 Diseño de mezcla

Se muestra en la tabla 7 la dosificación para la fabricación de 60 probetas cilíndricas que ocupan un volumen de 0.0942 m³, el procedimiento utilizado para la dosificación se encuentra en el anexo B.

Tabla 7. Diseño de mezcla para 60 probetas de concreto con una relación a/c de 0,8.

Material	Peso en Kg
Agua	19.122
Cemento	23.898
Agregado Fino	78.138
Agregado Grueso	98.4

4.2 EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO

Las exposiciones se realizaron con un rango de humedad relativa entre el 50 y 70 %, a temperatura ambiente y con una concentración del 70% de CO₂. En esta etapa cabe resaltar que, las pruebas comenzaron después de los 28 días de curado, debido a que en días anteriores era difícil mantener dentro de la cámara de carbonatación utilizada, la humedad relativa en el intervalo recomendado debido a que los poros están saturados de agua [26] y consecuencia de lo anterior el CO₂ no difunde.

Pruebas preliminares

En esta etapa inicialmente se partió de un concreto con relación a/c de 0.55, sin embargo los resultados no fueron los esperados y fue necesario ajustar la relación a/c a 0.8, la cual produjo mayor porosidad en el concreto y permitió en corto tiempo realizar su carbonatación, aspecto fundamental para llevar a cabo el trabajo. A continuación se presentan aspectos de estas pruebas.

- **Pruebas preliminares para un concreto de relación a/c de 0,55**

Se fabricaron 15 probetas cilíndricas y 15 probetas cúbicas, de las cuales se destinaron 3 de cada geometría para realizar las pruebas preliminares, cabe resaltar que las cúbicas se recubrieron con pintura epóxica con el fin de realizar perfiles de carbonatación, la figura 22 muestra la disposición de las probetas para las pruebas preliminares.



Figura 22. Disposición de las probetas de relación a/c 0.55 para las pruebas preliminares.

Se planearon tiempos de exposición a CO_2 de 3,6 y 12 horas para determinar el coeficiente de carbonatación, pero no fue posible hallarlo ya que el concreto no se carbonato durante las primeras exposiciones, solo mostró una pequeña carbonatación de aproximadamente 1.5 mm como se muestra en la figura 23 después de 12 horas de exposición.



Figura 23. Frente carbonatado en concreto de relación a/c 0.55 con 12 horas de exposición.

Posteriormente se optó por aumentar el tiempo de exposición a 24 horas pero los resultados no fueron satisfactorios pues no hubo un avance significativo del frente. El concreto utilizado se fabricó con una relación agua cemento de 0.55 considerando que fuera permeable y se dejó curar 28 días bajo condiciones estándar. Al realizar pruebas de resistencia a la compresión los valores superaron 25 MPa y al realizar el corte longitudinal se observó un concreto denso y compacto. Estas características de buena calidad no permitieron que se produjera la reacción de carbonatación en estas probetas.

▪ ***Pruebas preliminares para un concreto de relación a/c de 0,8***

Dados los resultados y teniendo en cuenta que el grado de carbonatación aumenta en concretos de baja resistencia, pasta altamente porosa, bajo contenido de cemento y con corto periodo de curado [3], se estableció para el concreto en estudio una relación a/c alta de 0.8 y condiciones de curado al ambiente. Se fabricaron 60 probetas cilíndricas con esta relación.

Pruebas preliminares durante algunos días del tiempo de curado.

Durante el tiempo de curado de estas probetas se hicieron algunas exposiciones a CO₂, los días 3 y 7 pero desafortunadamente la humedad relativa no bajó de 90%, debido a que la probeta aún tenía agua y lo cual no permitió que la humedad se pudiera controlar y que el gas difundiera [2]. Debido a este inconveniente con la humedad, en las pruebas del día 10 se optó por calentar las probetas durante 1 hora a menos de 100° C y luego introducirlas a la cámara, esto permitió controlar la humedad y desarrollar la prueba con éxito aunque los resultados no fueron los esperados. Una vez terminado el tiempo de exposición se procedió a retirar las probetas de la cámara, se les realizó a dos de ellas un corte longitudinal y a la otra un corte transversal y se atacó químicamente con fenolftaleína, el ataque mostró dos coloraciones como era esperado, pero la zona carbonatada (color gris) quedó en medio de dos zonas sin ataque (color fucsia) como se muestra en la figura 24.

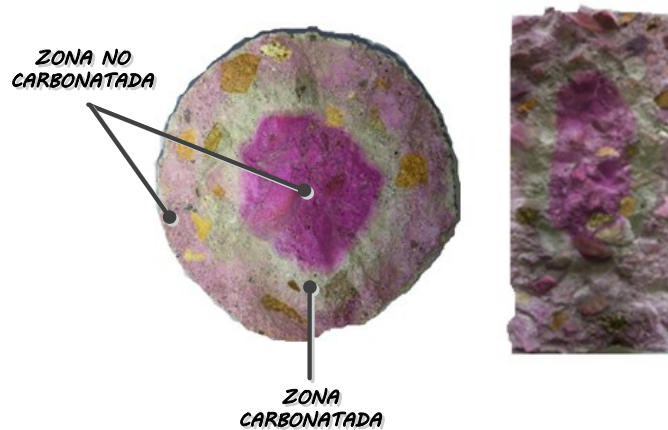


Figura 24. Frente carbonatado en concreto de relación a/c 0.8 con 10 días de curado y calentamiento menor a 100°C.

Lo observado en la figura 24, se presentó probablemente debido a que el calentamiento eliminó por completo el agua de la zona cercana al borde y esto produjo que el gas difundiera pero no reaccionara pues no encontró medio acuoso [2], al seguir penetrando en el concreto encontró una zona húmeda que le permitió llevar a cabo la reacción. En la siguiente zona que no ocurrió reacción, pudo ser que el gas no difundió hasta allí debido a que se suspendió la prueba o porque había exceso de humedad.

Después de esta experiencia, se decidió empezar el proceso de carbonatación con el concreto con esta relación a/c después de los 28 días de curado.

Pruebas preliminares después de los 28 días de curado.

Dentro de las pruebas preliminares se realizó la carbonatación a 3, 6 y 12 horas, después de la cual se realizó el ensayo de fenolftaleína y fueron medidas las profundidades de carbonatación que se muestran en la tabla 8.

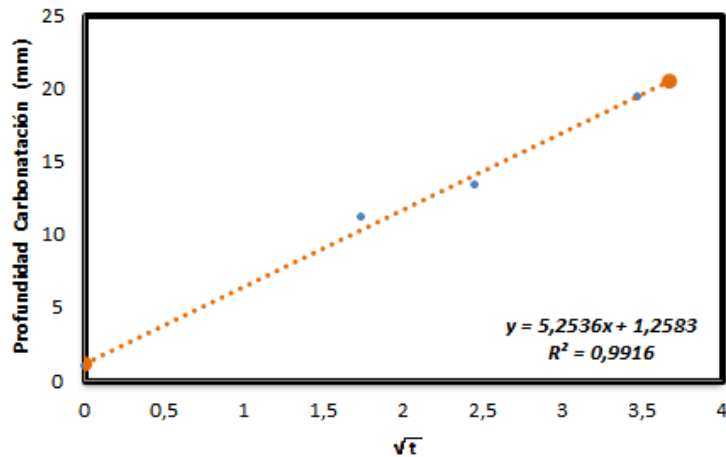
Tabla 8. Profundidades de carbonatación para diferentes tiempos de exposición.

TIEMPO (h)	Profundidad de Carbonatación (mm)
0	1,8
3	11,3
6	13,4
12	19,5

De la observación de la tabla 8 se puede decir que para las probetas con 0 tiempo de exposición presentan una leve carbonatación de 1,8 mm debido a su reacción con el CO₂ del ambiente.

Para cada tiempo se utilizaron dos probetas y se calculó el promedio de la profundidad de carbonatación. Con base en la ecuación [10] se graficó la profundidad de carbonatación Vs \sqrt{t} ; con el fin de hallar el coeficiente de carbonatación, el cual es la pendiente de la recta obtenida en la gráfica 1.

Gráfica 1. Comportamiento de la profundidad de carbonatación en función de la raíz cuadrada del tiempo.



Una vez obtenido el coeficiente de carbonatación y establecidos los tiempos de exposición, se determinaron las profundidades que se obtendrían bajo esas condiciones con la ecuación [10], estos valores se muestran en la tabla 9.

Con respecto a los valores obtenidos y esperados de la profundidad de carbonatación, fueron similares hasta las 10 horas de exposición. La disidencia se presentó en las exposiciones más largas, probablemente a que el modelo utilizado para la predicción se determinó hasta 12 horas, lo cual indica que para valores mayores de exposición se utilizaría una extrapolación. A esto se suma, que a medida que el CO₂ penetraba y reaccionaba con el concreto, el área de reacción disminuía como se ilustra en la figura 25, y además el concreto aumenta su porosidad [21], que probablemente permitió que el CO₂ difundiera con mayor velocidad y se obtuviese un mayor avance del frente carbonatado.

Tabla 9. Profundidades obtenidas y esperadas de carbonatación para diferentes tiempos de exposición.

PROBETA	HORAS DE EXPOSICIÓN							PROFUNDIDAD (mm)	
	0	2,5	5	7,5	10	22	30	OBTENIDA	ESPERADA
0-8								1,86	1,26
9 10 11								11,72	9,56
12 13 14								12,82	13,01
15 16 17								14,25	15,65
18 19 20								17,13	17,87
21 22 23								41,81	25,90
24 25 26 27								50	30,03

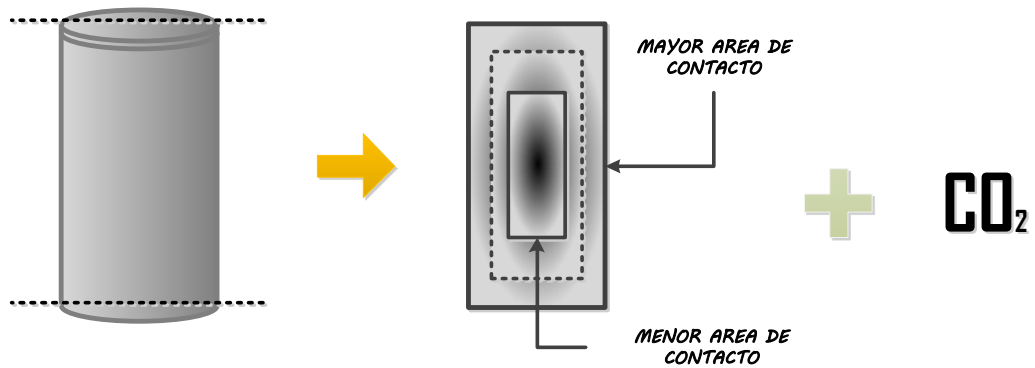


Figura 25. Disminución del área de contacto a medida que aumenta el tiempo de exposición.

4.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES PREVIOS Y DESPUÉS DE LA EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO

En este numeral se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los especímenes antes y después de ser expuestos a CO₂ con su respectivo análisis.

4.3.1 Peso de las probetas

En la tabla 10 se presenta el registro de los pesos obtenidos en las probetas antes y después de ser expuestas a CO₂, según como se indicó en la metodología.

De la observación de la tabla 10, se puede decir que hubo un aumento gradual del peso de la muestra a medida que aumento el tiempo de exposición a CO₂. El mayor aumento alcanzado fue de 2,4% presentado en el último tiempo de exposición.

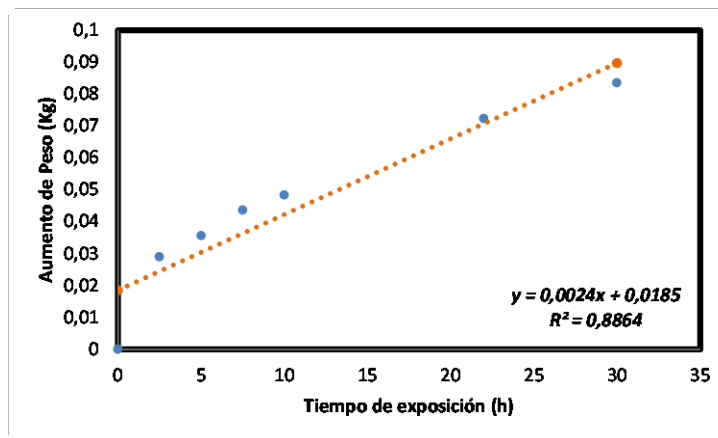
El leve aumento de peso se debe probablemente a cambios microestructurales debidos al surgimiento del carbonato de calcio y modificaciones en la etringita y la portlandita.

Tabla 10. Peso de especímenes para diferentes tiempos de exposición.

PROBETA	HORAS DE EXPOSICIÓN							PESO inicial (Kg)	DIFERENCIA (Kg)	PESO final (Kg)	DIFERENCIA (%)
	0	2,5	5	7,5	10	22	30				
0-8								3,838		3,838	
								3,787		3,787	
								3,806		3,806	
9								3,839	0,015	3,854	0,4
								3,769	0,045	3,814	1,2
								3,849	0,027	3,876	0,7
12								3,791	0,037	3,828	1,0
								3,801	0,034	3,835	0,9
								3,771	0,036	3,807	1,0
15								3,804	0,049	3,853	1,3
								3,850	0,044	3,894	1,1
								3,756	0,038	3,794	1,0
18								3,760	0,047	3,807	1,3
								3,741	0,046	3,787	1,2
								3,803	0,052	3,855	1,4
21								3,849	0,070	3,919	1,8
								3,801	0,074	3,875	1,9
								3,819	0,073	3,892	1,9
24								3,752	0,079	3,831	2,1
								3,818	0,079	3,897	2,1
								3,835	0,083	3,918	2,2
27							3,832	0,093	3,925	2,4	

En la gráfica 2 se aprecia que a medida que aumenta el tiempo de exposición, aumenta el peso de las probetas, mostrando un comportamiento lineal. De acuerdo a la bibliografía consultada, la ecuación 10 sugiere que la carbonatación se da significativamente hasta determinado tiempo, lo que indica que el peso debería mantenerse constante después de que se frene el avance de la reacción. Sin embargo, bajo las condiciones de la investigación el comportamiento lineal mostrado se debe a que el proceso en el intervalo de estudio no presenta la etapa de estabilización.

Gráfica 2. Relación entre el aumento de peso y el tiempo de carbonatación.



La relación del aumento de peso y el tiempo de exposición se puede representar mediante la ecuación $W=0,0024.t+0,0185$ con un índice de correlación de **0,8864**.

4.3.2 Inspección visual

A pesar de que la relación a/c finalmente utilizada fue alta (0,8), se observó antes de la exposición que la mayoría de probetas presentaban alta porosidad, buen estado superficial y poca rugosidad. Las probetas se dejaron en las formaletas 3 días antes de realizar el desencofrado con lo cual se evitó el daño en las superficies dispuestas para medir velocidad de pulso ultrasónico.

Con la inspección visual realizada después del ataque acelerado con CO_2 no fue posible encontrar diferencias con lo observado en las probetas libres de ataque, no se evidenció cambios en la coloración, en las dimensiones ni se hallaron discontinuidades.

La figura 26 muestra la superficie después de un corte longitudinal de un espécimen carbonatado y uno libre de ataque. Es delicado afirmar que un concreto se encuentra carbonatado por inspección visual, debido a que la tonalidad es semejante a un concreto libre de ataque. Sin embargo si se observa detalladamente después del corte el frente carbonatado se distingue en una tonalidad más clara del resto de la matriz cementicia pero este efecto dura muy poco, se debe hacer ataque químico con fenolftaleína con el fin de obtener contraste entre zonas y así diferenciar regiones carbonatadas y libres de daño.

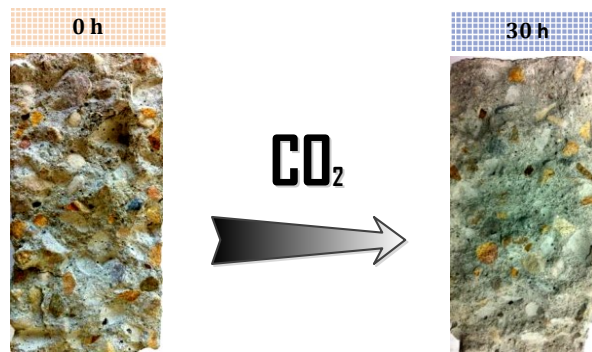


Figura 26. Estado superficial de las probetas.

4.3.3 Ensayo de porosidad

En la tabla 11 se registran los resultados obtenidos de porosidad para un concreto totalmente carbonatado y uno libre de ataque. Según estos valores se puede apreciar que el proceso de carbonatación bajo las condiciones nombradas, aumentan la porosidad en la pasta cementicia. Los cálculos de estos resultados se pueden ver en el anexo C.

Tabla 11. Resultados de porosidad para concreto carbonatado y libre de ataque.

CONCRETO	POROSIDAD (%)
LIBRE DE ATAQUE	18,7
CARBONATADO	25,3

Partiendo del hecho de que el concreto industrial debe ser lo menos poroso posible, para evitar que sea deteriorado por el ingreso de agentes agresivos como los sulfatos los cloruros y el CO_2 , la tabla 11 muestra que el concreto utilizado en el desarrollo de esta investigación es altamente poroso y esto se debe a la relación a/c utilizada, cabe resaltar que manejar esta relación era necesario para garantizar que el ataque se produjera en

una manera significativa. El concreto carbonatado presentó un aumento de porosidad posiblemente por la carbonatación de la etringita [21], este efecto beneficia el ingreso de otros compuestos que pueden deteriorar el concreto [22].

4.3.4 Difracción de Rayos X

La tabla 12 muestra los resultados de DRX del concreto no carbonatado, donde se aprecian compuestos como el cuarzo, albita, yeso y microclina asociados principalmente a la materia prima. Se encuentran fases como la portlandita y la etringita producto de las reacciones de hidratación del cemento. Además, calcita probablemente introducida como impureza en alguno de los materiales utilizados en la fabricación del concreto. Cabe resaltar que esta cantidad de calcita no fue detectada por el ensayo de fenolftaleína seguramente porque no se encuentra en una cantidad suficiente para disminuir considerablemente el pH del concreto.

Tabla 12. Análisis cuantitativo de concreto libre de ataque.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	Si O ₂	010-85-0794	Cuarzo	22.1 % (D.E = 0.3)
	Ca CO ₃	010-85-0849	Calcita	11.5 % (D.E = 0.2)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6429	Albita	12.7 % (D.E = 0.4)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita	17.2 % (D.E = 0.6)
	Ca (OH) ₂	010-76-0571	Portlandita	10.8 % (D.E = 0.3)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	000-41-1451	Ettringita	4.7 % (D.E = 0.3)
	Ca SO ₂ . 2H ₂ O	010-76-1746	Yeso	4.1 % (D.E = 0.2)
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	010-74-1784	Caolinita	4.7 % (D.E = 0.4)
	K Al Si ₃ O ₈	010-76-0918	Microclina	3.5 % (D.E = 0.3)
	TOTAL CRISTALINO			91.3 %
	AMORFOS Y OTROS			8.7 %

El análisis de la muestra carbonatada se presenta en la tabla 13, donde se aprecia que la exposición acelerada con CO₂ resultó en la carbonatación del concreto, en consecuencia se observa una disminución de la cantidad de portlandita y un aumento de calcita que es el comportamiento típico y el esperado por los autores de esta investigación. Con respecto a la etringita, disminuyo a tal punto de no ser cuantificable. Lo anterior confirma lo establecido en los análisis de peso y porosidad.

El aumento de peso y de porosidad en las muestras de concreto carbonatadas se debe probablemente a un equilibrio entre los cambios producidos en las proporciones de etringita y portlandita. Por efecto de la carbonatación desaparece la etringita (fase de mayor peso molecular), y disminuye la portlandita (fase de peso molecular más bajo) y

aparece en mayor proporción la calcita (fase de peso molecular intermedio), por lo cual se cree que hubo una compensación de pesos y volúmenes resultando un ligero aumento de peso y porosidad. Lo anterior se esquematiza en la figura 27.

Tabla 13. Análisis cuantitativo de concreto carbonatado.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
CRISTALINOS	Si O ₂	010-85-0865	Cuarzo	22.7 % (D.E = 0.3)
	Ca CO ₃	010-85-0849	Calcita	19.7 % (D.E = 0.2)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6427	Albita	14.4 % (D.E = 0.4)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita	9.3 % (D.E = 0.6)
	Ca (OH) ₂	010-70-6448	Portlandita	1.5 % (D.E = 0.3)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	000-73-6239	Ettringita	N.C
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	010-75-1593	Caolinita	5.1 % (D.E = 0.4)
	K Al Si ₃ O ₈	010-76-0918	Microclina	3.9 % (D.E = 0.3)
	TOTAL CRISTALINO			76,6 %
	AMORFOS Y OTROS			23.4 %

Nota:

N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación)

D.E = Desviación estándar

Los difractogramas obtenidos para las dos muestras se encuentran adjuntos en el anexo D.

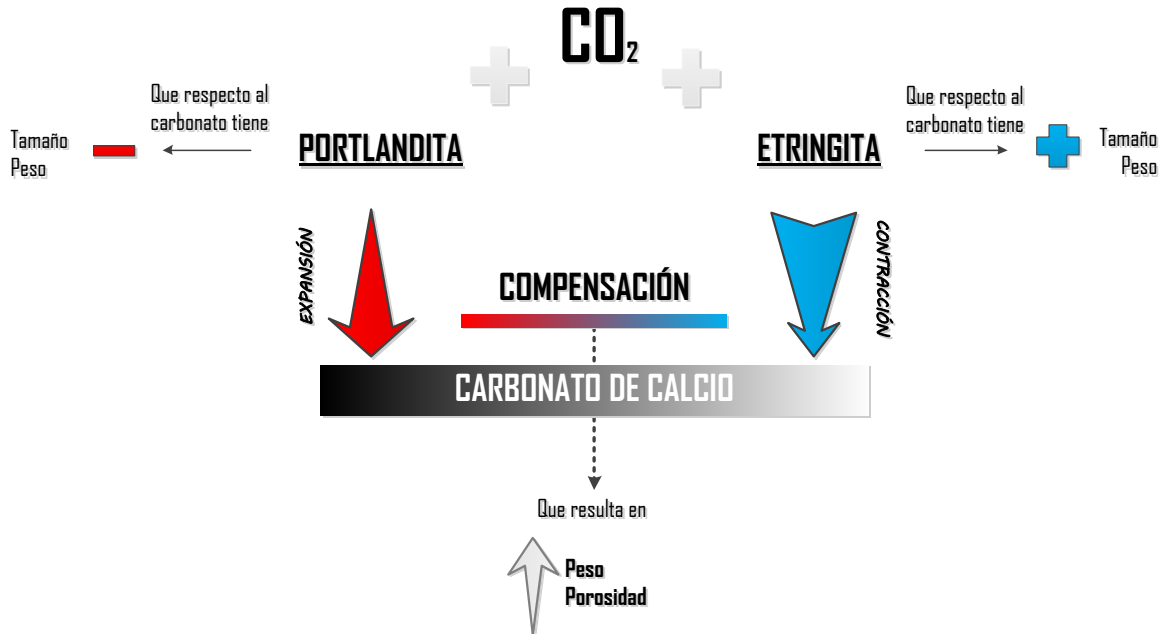


Figura 27. Esquema de compensación de la carbonatación de la portlandita y la etringita.

4.3.5 Ensayo químico con fenolftaleína

Este ensayo permite diferenciar zonas con diferente pH, lo cual hace posible medir la profundidad de carbonatación y por lo tanto conocer la extensión de la reacción a medida que aumenta el tiempo de exposición.



Figura 28. Profundidades de carbonatación obtenidos en diferentes tiempos de exposición, para concretos con relación a/c de 0.8, bajo un 70 % de dióxido de carbono.

La figura 28 muestra el concreto que no ha sido expuesto en la cámara de carbonatación (0 h) con un frente carbonatado de 1.8 mm, probablemente esto se produjo por la interacción del material con el CO₂ del ambiente circundante. Se observa un incremento gradual y uniforme del frente carbonatado a medida que aumenta el tiempo de exposición, es importante resaltar que se alcanza una carbonatación completa a las 30 horas de ataque acelerado.

4.3.6 Medición de la velocidad de pulso ultrasónico

En la tabla 14 se presenta un promedio de la velocidad de pulso ultrasónico por cada tiempo de exposición con su respectiva profundidad de carbonatación. Se determinó la VPU utilizando la ecuación 11, la medición del tiempo de vuelo y la longitud de los especímenes.

De la observación de la tabla 14, se puede decir que hubo una disminución gradual de la velocidad de pulso de la muestra a medida que aumento el tiempo de exposición a CO₂.

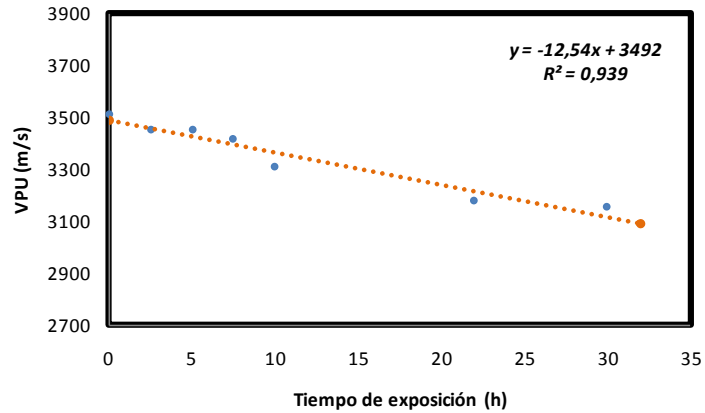
Los valores obtenidos de VPU muestran que la técnica es sensible a las variaciones sufridas por el material como producto del ataque, mostrando una disminución a medida que aumenta el tiempo de exposición a CO₂. La mayor disminución porcentual alcanzada fue de 10,22% presentado en el último tiempo de exposición que corresponde a la probeta totalmente carbonatada. Los cálculos de estos resultados y las velocidades obtenidas para cada probeta se presentan en el anexo E.

Tabla 14. Velocidad de pulso ultrasónico y la profundidad obtenida para diferentes tiempos de exposición.

PROBETA	HORAS DE EXPOSICIÓN						VPU (m/s)	VPU PROMEDIO (m/s)	PROFUNDIDAD OBTENIDA (m)	DISMINUCIÓN PORCENTUAL
	0	2,5	5	7,5	10	22					30
0-8							3472,39	3512,45	0,00186	.
							3493,94			
							3539,33			
9							3457,04	3450,82	0,01172	1,75
10							3476,28			
11							3419,14			
12							3474,87	3453,69	0,01282	1,67
13							3450,21			
14							3435,98			
15							3449,41	3417,61	0,01425	2,70
16							3382,22			
17							3421,20			
18							3334,32	3311,62	0,01713	5,72
19							3308,58			
20							3291,95			
21							3174,10	3178,52	0,04181	9,51
22							3125,45			
23							3236,02			
24							3187,21	3153,34	0,05	10,22
25							3115,50			
26							3157,30			
27							.			

El comportamiento del tiempo de carbonatación y la VPU se muestra en la gráfica 3. El mayor valor registrado fue para los especímenes libres de ataque y el menor que se obtuvo lo presentaron las probetas totalmente carbonatadas. Esta disminución de VPU posiblemente se debe a los cambios en la estructura del concreto (aparición y desaparición de algunas fases), además de un aumento de la porosidad y del peso, producto del equilibrio entre los cambios producidos; generando un aumento en la porosidad de la matriz cementicia provocando que la onda tome mayor tiempo al atravesar la longitud de la probeta.

Gráfica 3. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función del tiempo de exposición.



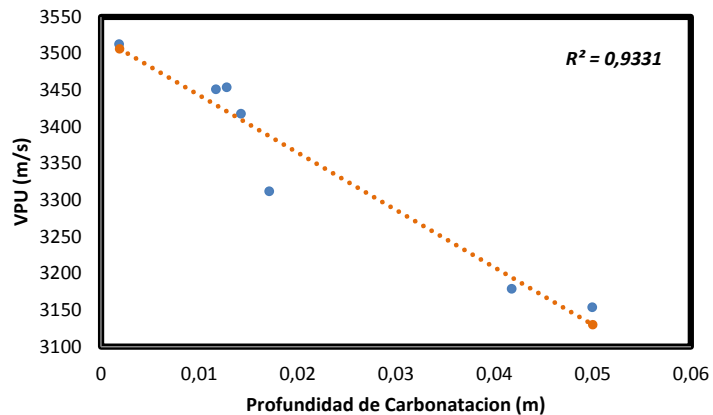
Los datos presentados en la gráfica 3, muestran un comportamiento decreciente de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta el tiempo de exposición. La tendencia que más se ajusta a este comportamiento es lineal y se indica mediante la expresión 12 con un índice de correlación de **0,939**.

$$VPU = -12,54 \cdot t + 3492 \quad [12]$$

Adicionalmente se aprecia un comportamiento decreciente de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la profundidad de carbonatación. La tendencia que más se ajusta a este comportamiento se indica mediante la expresión 13 que tiene un índice de correlación de **0,9331**.

$$VPU = -7815,8 \cdot X_c + 3521 \quad [13]$$

Gráfica 4. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la profundidad de carbonatación.



4.3.7 Ensayo de resistencia a la compresión

En la tabla 15 se presentan los promedios de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para los diferentes tiempos de exposición con su respectiva profundidad de carbonatación. Los resultados de este ensayo se expresaron en Kg/cm², PSI y MPa. El cálculo del valor de resistencia a la compresión f'_c se determinó mediante la ecuación:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad [14]$$

Donde P es la fuerza máxima soportada por el espécimen y A es el área de la sección transversal a la que se aplicó la carga. Los cálculos de estos resultados y las resistencias de cada probeta se presentan en el anexo F.

Tabla 15. Valores promedio de la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación para cada tiempo de exposición.

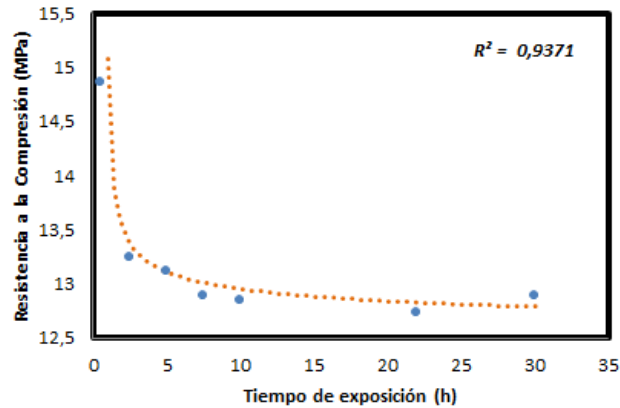
PROBETA	HORAS DE EXPOSICIÓN						PROMEDIO DE RESISTENCIA			PROFUNDIDAD (m)	
	0	2,5	5	7,5	10	22	30	Kgf/cm ²	PSI	Mpa	OBTENIDA
0-8								151,78	2154,27	14,86	0,00186
9								135,36	1921,28	13,25	0,01172
10											
11								134,06	1902,85	13,12	0,01282
12											
13											
14								131,69	1869,20	12,89	0,01425
15											
16											
17								131,28	1863,36	12,85	0,01713
18											
19											
20								130,15	1847,35	12,74	0,04181
21											
22											
23								133,47	1894,46	13,07	0,05
24											
25											
26											
27											

Los valores obtenidos de resistencia a la compresión muestran que la técnica aunque es sensible a las variaciones sufridas por el material como producto del ataque, presenta una disminución ligera a medida que aumenta el tiempo de exposición.

El comportamiento de la resistencia a la compresión y el tiempo de exposición se muestra en la gráfica 5. Se aprecia una relación logarítmica inversa entre estos dos parámetros, ya que la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumenta el tiempo de exposición y la profundidad de carbonatación. La tendencia que más se ajusta a este comportamiento se indica mediante la expresión 15 con un índice de correlación de **0,9371**.

$$f'_c = \frac{5,3}{\ln(28(t - 0,8))} + 12 \quad [15]$$

Gráfica 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función del tiempo de exposición.



4.3.8 Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en concreto carbonatado

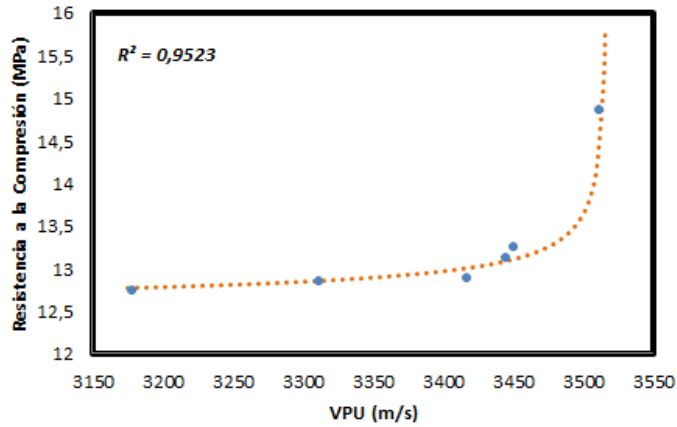
En la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico para cada tiempo de exposición.

El comportamiento de la resistencia a la compresión y la VPU para un concreto carbonatado con relación a/c de 0.8 se muestra la gráfica 6. Según los resultados obtenidos, la resistencia a la compresión y la VPU van disminuyendo a medida que el frente de carbonatación avanza, debido a las variaciones sufridas por el material como producto del ataque.

Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico para diferentes tiempos de exposición.

PROBETA	HORAS DE EXPOSICIÓN						VPU m/s	PROMEDIO DE RESISTENCIA		
	0	2,5	5	7,5	10	22		30	Kgf/cm ²	PSI	Mpa
0-8	█						3512,450844	151,78	2154,17	14,86
9		█					3450,819321	135,36	1921,23	13,25
10										
11										
12			█				3453,689208	134,06	1902,78	13,12
13										
14										
15				█			3417,60835	131,69	1869,14	12,89
16										
17										
18					█		3311,616973	131,28	1863,33	12,85
19										
20										
21						█	3178,521337	130,15	1847,29	12,74
22										
23										
24						█	3153,335854	133,47	1894,41	13,06
25										
26										
27										

Gráfica 6. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso ultrasónico.



La relación de la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico se puede representar mediante la expresión 16 con factor de correlación de **0.9523**

$$f'_c = \frac{5}{\ln(0,9(3520 - VPU))} + 11,9 \quad [16]$$

La literatura muestra que en concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Esto se evidencia en los valores obtenidos de resistencia a la compresión, porque independientemente del frente logrado se obtuvo un comportamiento estable como muestra la gráfica 6, ya que este proceso no es excesivo en cuanto a presencia de grietas, expansiones o contracciones, a diferencia del daño ocasionado por ejemplo por sulfatos o fuego [25, 26]. Lo que se ve involucrado son cambios de fase donde la VPU es una técnica con mayor sensibilidad que la resistencia a la compresión como lo evidencia la gráfica 4.

Un comportamiento más agresivo sucedería en un concreto que presentara refuerzo, porque allí disminuiría drásticamente la resistencia debido a la expansión del refuerzo y al posterior agrietamiento del concreto.

5. CONCLUSIONES

Los resultados y análisis consignados en esta investigación, se obtuvieron bajo las condiciones de ataque acelerado con CO_2 en una cámara de carbonatación a un concreto de relación a/c de 0,8 con 28 días de curado, con una concentración de CO_2 en promedio del 70%, humedad relativa entre 50 y 70% a una temperatura de 25°C.

El incremento del 7% de la porosidad se debe probablemente al equilibrio que se da entre los cambios producidos en la estructura por el ataque, debido a que la carbonatación de la etringita produce en el material un aumento en la porosidad, a diferencia de la portlandita que la disminuye, el balance entre estos efectos resulta en el aumento de esta propiedad.

La investigación permitió verificar que la carbonatación es un mecanismo de daño que afecta la durabilidad del concreto debido al aumento de la porosidad en la matriz cementicia, lo cual deja al material vulnerable al ataque de otros agentes naturales como cloruros y sulfatos.

Al incrementar el tiempo de exposición se aumenta tenuemente el peso del concreto debido quizá a un equilibrio entre los cambios de portlandita y etringita a carbonato de calcio. Es decir la carbonatación de la etringita produce en el material una disminución en el peso, a diferencia de la portlandita que lo aumenta. El hecho que el álcali se encuentre en mayor cantidad ayuda a contrarrestar la disminución producida por la ausencia de etringita, lo que resulta en un ligero incremento de peso. Este aumento muestra un comportamiento lineal dado por la expresión $W=0,0024.t+0,0185$ con un índice de correlación de 0,8864.

Al incrementar el tiempo de exposición disminuyó la VPU posiblemente debido al aumento de la porosidad, causando que la onda tome mayor tiempo en atravesar la

longitud de la probeta. Esta disminución presenta un comportamiento lineal dado por la expresión $VPU = -12,54 \cdot t + 3492$ con un índice de correlación de 0,939.

Los resultados obtenidos permitieron confirmar lo expresado en la literatura respecto a que en un concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias [21]. Esto se evidencia en los valores obtenidos de resistencia a la compresión, porque independientemente del frente logrado se obtuvo un comportamiento estable de esta propiedad, comprobado por inspección visual la ausencia de grietas, expansiones o contracciones, a diferencia del daño ocasionado por ejemplo por sulfatos o fuego. Se encontró una correlación entre la resistencia a la compresión y el tiempo de exposición del tipo $f'_c = \frac{5,3}{\ln(28(t-0,8))} + 12$ con un índice de correlación de 0,9371.

La investigación mostró que el proceso de carbonatación produce cambios en la estructura del concreto (modificación de fases) en donde la VPU es una técnica con mayor sensibilidad que la resistencia a la compresión. Por esta razón, la relación de la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico se puede representar mediante la expresión $f'_c = \frac{5}{\ln(0,9(3520-VPU))} + 11,9$ con factor de correlación de 0,9523.

De los resultados obtenidos en esta investigación muestra que la técnica de VPU es sensible a variaciones ocasionadas en el concreto producto de la reacción de carbonatación, lo cual convierte este ensayo en un instrumento práctico para la inspección de estructuras susceptibles al ataque con CO_2 ayudando de una forma no destructiva a estimar la durabilidad del concreto.

6. RECOMENDACIONES

Para complementar este estudio se recomienda:

Continuar el estudio de la carbonatación en muestras de concreto con y sin refuerzo variando las condiciones de curado, geometría de los especímenes, cambiando el tipo de cemento y utilizando adiciones como la escoria de alto horno.

Estudiar el efecto positivo del proceso de carbonatación sobre las propiedades del concreto, en muestras de este material durante su producción como lo recomienda la ACI 201.2R-01.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NAWY, Edward. Concrete Constrution Enginnering Handbook. Taylor and Francis Group. Second edition. 2008.
- [2] LINARES, Douglas y SÁNCHEZ, Miguel. Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada, Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería”, Universidad del Zulia, Venezuela, Volumen 26, N°. 1, abril 2003.
- [3] ACI Committee201. Guía para la Durabilidad del Hormigón (ACI 201.2R-2001),” American Concrete Institute, Farmington, Hills, Mich.
- [4] MORENO, Eric; DOMINGUEZ, Gerardo; COB, Enrique y DUARTE, Francisco. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración, Moreno et.al. / Ingeniería 8-2 (2004) 117-130.
- [5] ARIZA, Diana y ATUESTA, Javier. Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.
- [6] SOLÍS, Rómel; MORENO, Éricy CASTILLO, William. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados.
- [7] GONZÁLES DE LA COTERA, Manuel. Guía introductora a la durabilidad en el concreto.
- [8] DÁMASO, José. Las estructuras no son eternas. En: Construcción y tecnología. 48-54p. 2006.

[9] MALHOTRA V. M. "Nondestructive methods for testing concrete". Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. 1985.

[10] FUJI, M., YAMASAKI, A., KAKIZAWA, M. Reduction of CO₂ emission by treatment of waste concrete via an artificial process. American Chemical Society, Division Fuel Chemistry. Vol. 46 (1), 2001.

[11] GOFF, F., LACKNER, K. S. Carbon dioxide sequestering using ultramafic rocks. Environment al Geosciences. Vol. 5, 1998, p. 89-101.

[12] MORENO, Eric. Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Vol. 10; 5-12; 2006.

[13] UNIVERSIDAD DEL ZULIA. Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada. <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702003000100006&script=sci_arttext> [citado en 25 de Febrero de 2011].

[14] INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Conceptos básicos del concreto. 9-15p. 2004.

[15] KOSMATKA, Steven; KERKHOFF, Beatrix; PANARESE, William y TANESI, Jussara. Diseño y mezclas de concreto. Portland Cement Association. Illinois, EE.UU., 1-15p.

[16] GIRALDO, Manuel y TOBÓN, Jorge. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Dyna, marzo, año/vol. 73, Vol. 148. Universidad Nacional de Colombia. 69-81. 2006.

[17] FORMTEX CPF LINER. Carbonation of concrete. <<http://www.fibertex.com/SiteCollectionDocuments/Carbonation.pdf>>. [citado en 15 de Marzo de 2011].

- [18] Y. F. Houst, F. H. Wittmann. “Depth Profiles of Carbonates formed during natural Carbonation”. Cement and Concrete Research. Vol. 32. 2002.
- [19] RODRIGUEZ, Cesar; RODRIGUEZ, Erich; TORRES, Janneth y DELVASTO, Silvio. Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros Metakaolin concrete: Carbonation and chloride behavior. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Vol. 48; 55-64; 2009.
- [20] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. Construction and Building Materials. Vol.20; 744-753; 2006.
- [21] D.A. ST JOHN; POOLE y I. SIMS. Concrete Petrography. A handbook of Investigative techniques. New York. Ed Arnold.1998.
- [22] SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. “Tecnología del concreto y del mortero”. Bhandar Editores LTDA. 3ra Ed. Bogota DC, Colombia. 1996.
- [23] DURÁN, Edwin y PEÑA, Deyci. Correlación entre el contenido de agua del concreto, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.
- [24] RILEM, Concrete Permanent Committee CPC-18, Measurement of hardened concrete carbonation depth. 1988.
- [25] QUIROS, Gilberto y SANTAMARIA, Ruth. Evaluación del efecto del ataque de sulfatos sobre concreto, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (vpu). Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.
- [26] CUESTA, Harry y LUQUE, Hector. Evaluación del efecto sobre la de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.

- [27] CEMENTO ARGOS. Cemento gris de uso estructural. <<http://www.argos.com.co/wps/wcm/connect/29780600405e576b91b3ff5efd947518/cemento+gris+de+uso+estructural.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=29780600405e576b91b3ff5efd947518>> [citado en 10 de Marzo de 2010].
- [28] _____. NTC 30 Cemento Portland. Clasificación y Nomenclatura. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [29] _____. NTC 77 (1995). Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis granulométrico. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [30] _____. NTC 78 (1995). Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [31] _____. NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [32] _____. NTC 121 (1995). Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [33] _____. NTC 176 (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [34] _____. NTC 237 (1995). Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [35] _____. NTC 321 (1995). Cemento Portland. Especificaciones Químicas. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [36] _____. NTC 1377 (1994). Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [37] _____. NTC 3459 (2001). Concretos. Agua para la elaboración de concreto. NTC - Norma Técnica Colombiana.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Significance of test and properties of concrete and concrete making materials*. STP 169D, USA, 2006

[38] _____. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33-01. USA, 2001.

[39] _____. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the *Laboratory*. ASTM C192-00. USA, 2000.

[40] _____. Standard Specification for Portland Cement ASTM C150 -07. USA, 2007.

[41] _____. Standard Test Method fo Pulse Velocity Through Concrete. ASTM C597-02. USA, 2002.

[42] _____. Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. ASTM C856-04. USA, 2004.

ANEXO A. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El concreto fabricado para esta investigación es una mezcla de agregado grueso, agregado fino, cemento y agua.

Agregado: el grueso proviene del municipio de pescadero, el formato “Agregado Grueso” presenta las características de este componente del concreto. El formato “Agregado Fino” enseña algunas características del agregado fino y el formato “Resultado de Ensayos” complementa la caracterización con un análisis granulométrico.


Cemento: Se utilizó cemento portland Tipo I que posee una densidad de 3.03 Kg/m³. La tabla A1 muestra que el cemento utilizado cumple con las especificaciones químicas exigidas por la norma NTC 321 para un cemento portland tipo 1, el empaque y rotulado es el recomendado, las características físicas están dentro los valores estipulados por la norma NTC 121.

Agua: la fabricación del concreto se realizó con agua potable como es recomendado, proveniente del acueducto municipal de Bucaramanga, las probetas se realizaron en el mes de Junio del año 2011 fecha para la cual se muestra un pH neutro y dentro de los límites estipulados (entre 6 y 8), la cantidad de carbonato de calcio permisible para la fabricación del concreto no debe exceder los 400 ppm y el agua utilizada cumple con este requerimiento pues posee cantidades menores a 100 ppm, la presencia de sulfatos y cloruros no representan ningún impedimento para la utilización de esta agua pues sus cantidades están muy por debajo de los valores permisibles 20.000 ppm y 3000 ppm respectivamente [22].

Tabla A1. Especificaciones técnicas del cemento Argos. Tomado de [27]

Especificaciones Técnicas				
PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 Tipo 0U	
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00		7.00	—
Trióxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.50		3.50	—
PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 Tipo 0U	
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	70		45	45
Fraguado final ⁽¹⁾ , máximo (minutos)	330		480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.80		0.80	0.80
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02		—	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	21.0		8.0	10.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	28.0		15.0	17.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	36.6		24.0	28.0

Tabla A2. Resultados de los análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																			
F CC 507-006		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																			
Rev.:0																					
MUNICIPIO:	BUCARAMANGA	AÑO:	2011																		
PARAMETROS	Parámetros Fisicoquímicos												Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL			
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente Unidades Pt-Co	pH Unidades	Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruro 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	% Aceptabilidad 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	
PROMEDIO	90	0,98	0,82	4,6	7,16	0	0,05	44,7	66,9	3,1	28,9	N.D	1,2	N.D	179	0,0	100	0,0	100	0,00	
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/día	100	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 N.D: 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"																				

Elaboró: Leonor Chacón Zárate

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ
Jefe de Control Calidad Aguas

Tabla A3. Formato de informe con los resultados obtenidos de la caracterización del agregado fino.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE HORMIGON SIMPLE

AGREGADO FINO

SOLICITANTE : - Yivian Villamizar - Julio César Osma		FECHA		
		D	M	A
		09	12	10
PROCEDENCIA :		MUESTRA #		
MATERIAL :				
DESCRIPCION :				
NORMA (NTC) :				
GRAVEDADES ESPECIFICAS				
DATOS :				
A = Peso del Frasco + Agua hasta la marca, en el aire		653		Gramos
B = Peso de la muestra en condición 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 secada al horno		489		Gramos
CALCULOS :				
Gravedad específica real	$\frac{D}{(A - C + D)}$	=	<u>2,747</u>	
Gravedad específica aparente	$\frac{D}{(A + B - C)}$	=	<u>2,587</u>	
Gravedad específica aparente S.S.S	$\frac{B}{(A + B - C)}$	=	<u>2,695</u>	(E) **
PESO UNITARIO				
CALIBRACION DEL MEDIDOR :				
P ₁ = Peso del medidor + vidrio		3017		Kilogramos
P ₂ = Peso del medidor + vidrio + agua		5843		Kilogramos
V = Volumen del medidor	$\frac{(P_2 - P_1)}{1000}$	=	<u>2,830</u>	dm ³
DATOS :				
P _m = Peso del medidor vacío		2529		Gramos
P _c = Peso del medidor + material S.S.S compactado		7008,33		Gramos
P _s = Peso del medidor + material S.S.S suelto		6914,66		Gramos
Peso unitario del agregado S.S.S compactad	$\frac{(P_c - P_m)}{V}$	=	<u>1582,8</u>	Ka / m ³ (F) **
Peso unitario del agregado S.S.S suelto	$\frac{(P_s - P_m)}{V}$	=	<u>1373,02</u>	Ka / m ³
% de absorción	$\frac{(B - D) * 100}{D}$	=	<u>2,249</u>	%
% de vacíos	$\frac{(E * 1000 - F)}{(E * 10)}$	=	<u>40,16</u>	%
OBSERVACIONES :				
LABORATORISTA :		V° B°		
_____ JAIRO HERNANDEZ		_____ DIRECTOR ESCUELA ING. CIVIL		

Tabla A4. Formato de informe con los resultados obtenidos de la caracterización del agregado grueso.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE HORMIGON SIMPLE

AGREGADO GRUESO

SOLICITANTE : - Vivian Villamizar - Julio César Osma		FECHA		
		D	M	A
		09	12	10
PROCEDENCIA :		MUESTRA #		
MATERIAL :				
DESCRIPCION :				
NORMA (NTC) :				
GRAVEDADES ESPECIFICAS				
DATOS :				
A = Peso de la muestra en condición S.S.S. en el aire	5000			Gramos
Pa = Peso de la canasta, sumergida en agua	1800			Gramos
Pb = Peso de la canasta + muestra S.S.S. sumergida en agua	4885			Gramos
B = Peso de la muestra en agua = Pb - Pa	3085			Gramos
C = Peso de la muestra secada en el horno	4930			Gramos
CALCULOS :				
Gravedad específica real	$\frac{C}{(C - B)}$	=	2,672	
Gravedad específica aparente	$\frac{C}{(A - B)}$	=	2,574	
Gravedad específica aparente S.S.S	$\frac{A}{(A - B)}$	=	2,611	(D) **
PESO UNITARIO				
CALIBRACION DEL MEDIDOR :				
P ₁ = Peso del medidor + vidrio	3017			Kilogramos
P ₂ = Peso del medidor + vidrio + agua	5843			Kilogramos
V = Volumen del medidor	$\frac{(P_2 - P_1)}{1000}$	=	2,830	dm ³
DATOS :				
Pm = Peso del medidor vacío	2529			Gramos
Pc = Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7028,66			Gramos
Ps = Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6679,66			Gramos
Peso unitario del agregado S.S.S compactado	$\frac{(Pc - Pm)}{v}$	=	1589,88	Kg / m ³ (E) **
Peso unitario del agregado S.S.S suelto	$\frac{(Ps - Pm)}{V}$	=	1466,66	Kg / m ³
% de absorción	$\frac{(A - C) * 100}{C}$	=	1,419	%
% de vacíos	$\frac{(D * 1000 - E)}{(D * 10)}$	=	39,10	%
OBSERVACIONES :				
LABORATORISTA :		V * B °		
_____ JAIRO HERNANDEZ		_____ DIRECTOR ESCUELA ING. CIVIL		

ANEXO B. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN LA “PRACTICA RECOMENDABLE PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL Y CONCRETO PESADO ACI 211”

El diseño de mezcla se realizó para una base de cálculo de 1 m³ de concreto.

I. Selección del asentamiento

La consistencia es otro termino para caracterizar el estado plástico del concreto y hace referencia a su estado de fluidez, es decir, que tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla de concreto cuando se encuentra en estado plástico. Como regla general y por razones de economía deben usarse las mezclas con la mínima consistencia que permita una colocación eficiente [22].

Tabla B1. Asentamientos recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad. Tomado de [22]

Consistencia	Asentamiento (cm)	Tipo de estructura y condiciones de colocación
Muy seca	0 – 2.0	Vigas prefabricadas de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
Seca	2.0 – 3.5	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.
Semi-seca	3.5 – 5.0	Pavimentos con vibraciones normales. Fundiciones de concreto simple. Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración.
Media	5.0 – 10.0	Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas, columnas, vigas y muros reforzados con vibración.
Húmeda	10.0 – 15.0	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzo. Trabajar donde la colocación sea difícil. Nuevamente no es apropiado para compactarlo con demasiado.

De acuerdo a las necesidades de la investigación se seleccionó el asentamiento para una consistencia media, es decir un asentamiento entre 5-10 cm.

II. Selección del tamaño máximo del agregado

Los agregados bien gradados con mayor tamaño máximo tienen menos vacíos y menor área superficial que los de menor tamaño máximo; por consiguiente, si el tamaño

máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta, para un mismo asentamiento, los contenidos de cemento y agua disminuirán. Por lo cual, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura [22].

El tamaño máximo del agregado utilizado para la realización del diseño de mezcla de este proyecto fue de $\frac{3}{4}$ " es decir 19.05mm, va de acuerdo con las dimensiones de la probeta, y con la necesidad de tener un concreto menos compacto.

III. Estimación del contenido de agua de mezclado

El agua de mezclado se define como la cantidad de agua por unidad de volumen unitario que requiere el cemento, contenido en ese volumen unitario, para producir una pasta eficientemente hidratada, con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico.

El agua de mezclado cumple dos importantes funciones en una mezcla de concreto, la primera es que hidrata las partículas de cemento, y la otra, es que produce la fluidez necesaria, la cantidad de agua de mezclado por volumen unitario de concreto, que se requiere para producir un asentamiento determinado, depende del requerimiento de agua del cemento y del requerimiento de agua del agregado, por lo cual el contenido de agua está ligada al tipo de asentamiento que se requiera y al tamaño máximo de agregado.

Considerando que el asentamiento se encuentra entre 5 y 10 cm y que el tamaño máximo de agregado seleccionado es $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm), se calcula según estos valores en la tabla B2 que el contenido de agua necesario es igual a **200 kg/m³**.

Tabla B2. Agua en kilogramos por metro cubico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados. Tomado de [28]

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO						
	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
5 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire (%)	3	2.3	2	1.5	1	0.5	0.3

IV. Determinación de la resistencia de diseño

El concreto debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión de acuerdo a las necesidades de cada estructura, en este caso se realizó un diseño para una resistencia a la compresión menor a 17 MPa, pues una alta resistencia puede llegar a afectar e incluso inhibir el avance de la carbonatación [3, 21].

V. Selección de la relación agua-cemento

La relación agua cemento no solo determina los requisitos de resistencia, sino también factores pertinentes a la durabilidad y propiedades para el acabado del concreto, debido a que este debe ser capaz de soportar aquellas exposiciones que puedan despojarlo de su capacidad de servicio, cuando no es necesario una alta resistencia y las condiciones de exposición sean tales que la alta durabilidad sea vital, son estas las que deben determinar la relación a/c, para condiciones severas de exposición la relación agua-cemento debe mantenerse baja, aun cuando los requisitos de resistencia puedan cumplirse con un valor más alto [22]. Una menor relación a/c da un concreto más durable debido a su baja porosidad, esta característica impide el ingreso de agentes agresivos hacia el interior de la estructura, para poder garantizar el ataque con CO₂ fue necesario utilizar una relación a/c de 0.8 para producir un concreto vulnerable a este tipo de ataque.

VI. Cálculo del contenido de cemento

Una vez determinado el contenido de agua de mezclado y la relación a/c, el contenido de cemento por metro cúbico de concreto es fácilmente calculado al dividir el contenido de agua de mezclado entre la relación agua cemento.

$$C = \frac{a}{a/c}$$

Para el caso de este proyecto, el contenido de cemento es $C = \frac{200}{0,8} = 250 \text{Kg/m}^3$.

VII. Estimación del contenido de agregado grueso.

El método ACI 211 recomienda que conocido el b/bo, se calcula el peso absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto. Según la siguiente ecuación:

$$b = (b/bo) \times bo$$

Dónde:

b = volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, b_o = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto, b/b_o = Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso (Tabla B3)

La tabla B3 es ampliamente conocida por los usuarios del método ACI 211, y en ella se dan los valores de b/b_o en función del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura de la arena, el peso seco del agregado grueso requerido por metro cúbico de concreto, es simplemente igual al valor tomado de la tabla B3 multiplicado por su respectivo peso unitario compacto en Kg/m^3 .

Tabla B3. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. Tomado de [28]

Tamaño máximo de agregado (mm)	Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
13	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Para un tamaño máximo de agregado de 19.05mm y un módulo de finura de la arena de 2.4 reportado en el anexo A, la relación $b/b_o = 0.66$

El peso seco del agregado grueso sería entonces = $0.66 * 1589.98 = 1049.39 \text{ Kg/m}^3$

VIII. Estimación del contenido de agregado fino:

El volumen de agregado fino a utilizar en la mezcla se calcula por diferencia entre la base de cálculo ($1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$) y la suma de volúmenes de cada uno de los otros componentes presentes en la mezcla.

$$V_{af} = 1000 - (V_a + V_c + V_{ag})$$

Conversión de las cantidades de agua, cemento y agregado grueso a volumen:

V_a = volumen de agua

$$V_a = 200 \text{ Kg} * \frac{1 \text{ L}}{1 \text{ Kg}} = \mathbf{200 \text{ L}}$$

V_c = volumen de cemento

$$V_c = 250 \text{ Kg} * \frac{1}{3.03 \text{ Kg}} = \mathbf{82,52 \text{ L}}$$

V_{ag} = volumen de agregado grueso

$$V_{ag} = 1049.39 \text{ Kg} * \frac{1 \text{ L}}{2.61 \text{ Kg}} = \mathbf{402 \text{ L}}$$

$$V_{af} = 1000 - (200+82.51+402) = \mathbf{315,49 \text{ L}}$$

En peso seria:

$$W_{af} = 315.49 \text{ L} * \frac{2.65 \text{ Kg}}{1 \text{ L}} = \mathbf{836,05 \text{ Kg}/m^3}$$

Tabla B4. Diseño de mezcla para 1 m³ de hormigón.

Material	Peso en Kg
Agua	200
Cemento	250
Agregado Fino	836.05
Agregado Grueso	1049.39

Tabla B5. Dosificación para 60 probetas cilíndricas.

Material	Peso en Kg
Agua	19.122
Cemento	23.898
Agregado Fino	78.138
Agregado Grueso	98.4

$$\text{Volumen 60 probetas cilíndricas} = 0.0942 \text{ m}^3.$$

ANEXO C. CÁLCULOS PARA HALLAR LA POROSIDAD DE LAS MUESTRAS

Se tiene la ecuación:

$$\phi = \left(1 - \frac{V_{gr}}{V_t}\right) * 100$$

Dónde:

Φ : Porosidad efectiva

V_{gr} : Volumen de granos

V_t : Volumen total

Para calcular la porosidad efectiva por ejemplo de la muestra libre de ataque, se procedió de la siguiente manera:

$$\phi = \left(1 - \frac{49}{59,5}\right) * 100 = 17,64 \%$$

En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos en el ensayo de porosidad con sus respectivos promedios.

Tabla C1. Valores obtenidos en el ensayo de porosidad con sus respectivos promedios.

CONCRETO		VOLUMEN DE GRANOS	VOLUMEN TOTAL	% POROSIDAD EFECTIVA	PROMEDIO DE POROSIDAD
LIBRE DE ATAQUE	A	49	59,5	17,64	18,7
	B	49,5	60	17,50	
	C	46	58,2	20,96	
	D	42,5	56,2	24,37	
CARBONATADO	E	40	58	31,03	25,3
	F	46,2	58	20,34	

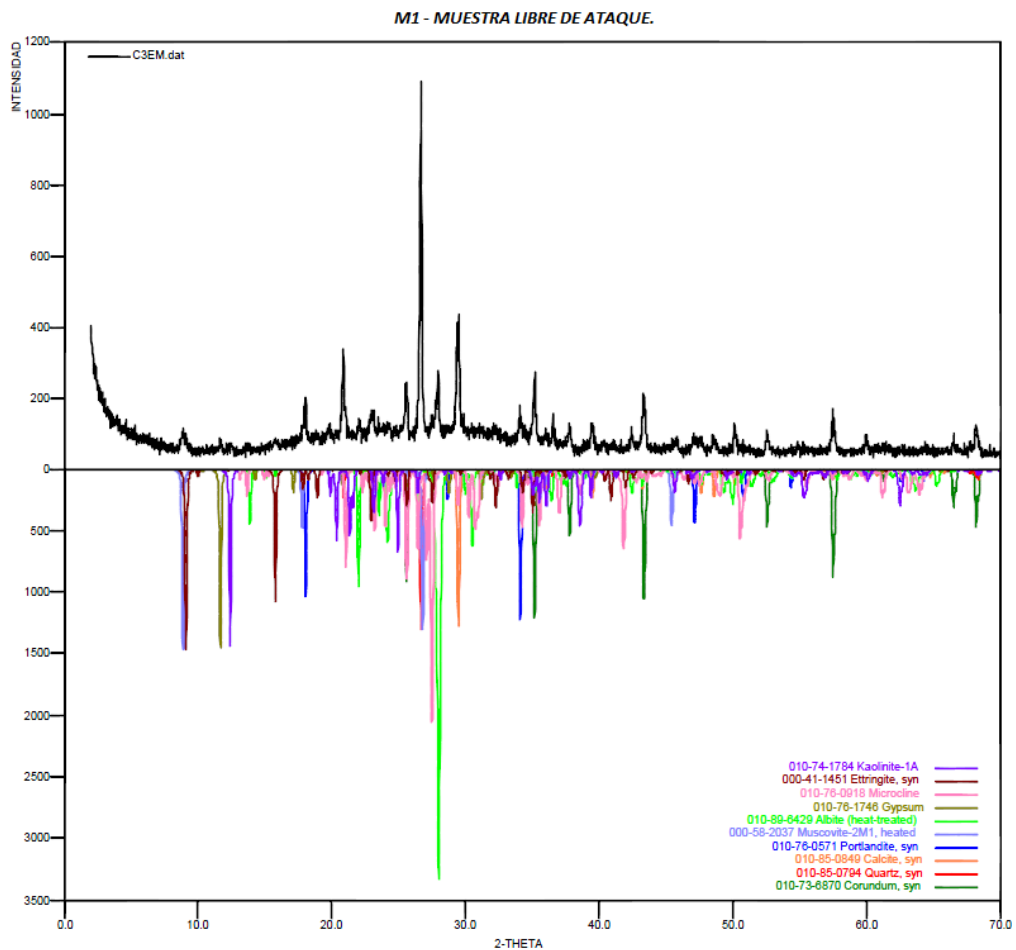
ANEXO D. DIFRACCIÓN DE RAYOS X “DRX” – DIFRACTOGRAMAS

ANÁLISIS CUANTITATIVO

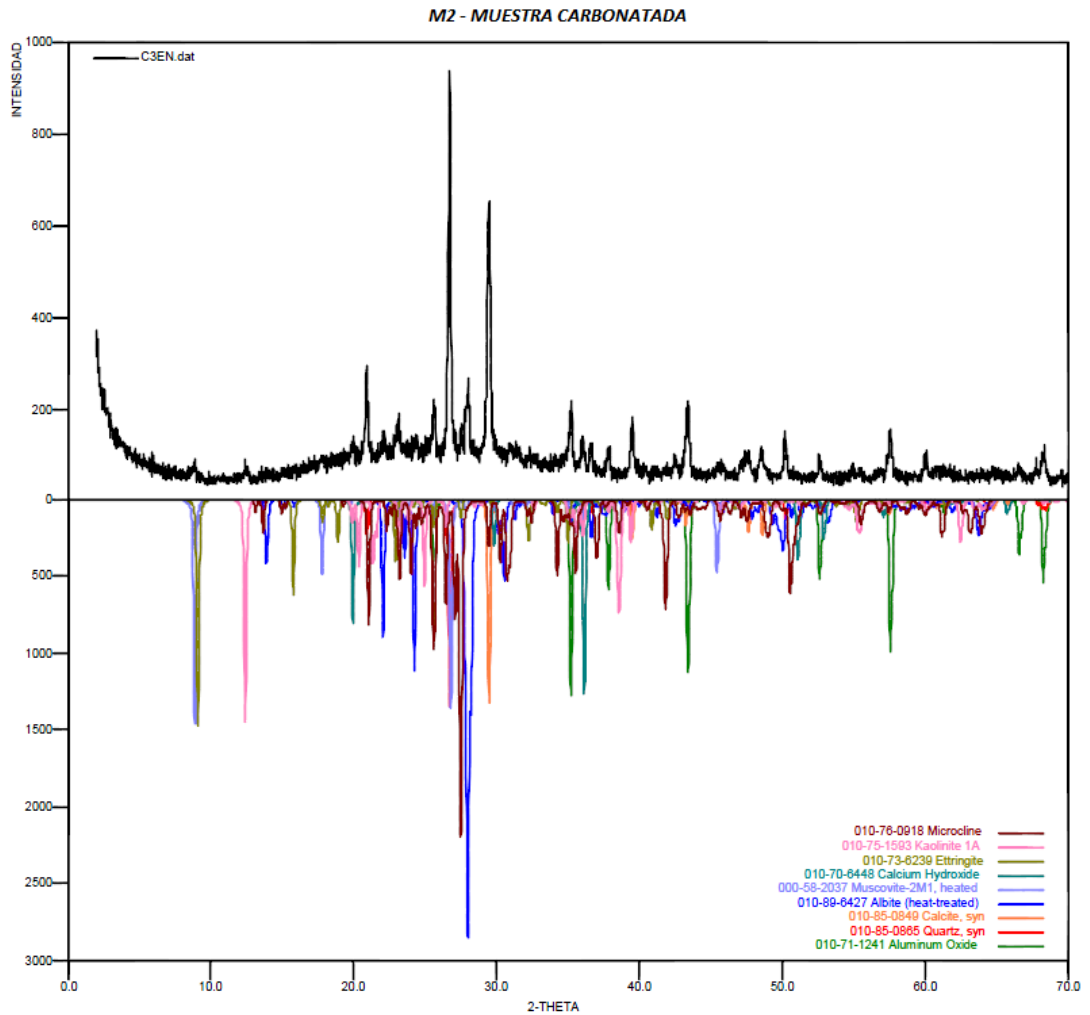
Observaciones:

En los perfiles de difracción se observa la fase de Corundum-Aluminum Oxide (estándar interno), el cual fue agregado a la muestra en una cantidad conocida para la respectiva cuantificación.

Gráfica D1. Difractograma de muestra libre de ataque M1.



Gráfica D2. Difractograma de muestra carbonatada M2.



El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (Aluminum oxide, -100mesh, 99%. Corundum, α -phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20%.

ANEXO E. REGISTRO DE TOMA DE DATOS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

La velocidad de pulso ultrasónico se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$V = \frac{L}{t}[13]$$

Donde se usa la altura promedio y el tiempo de vuelo promedio. Para el cálculo de este tiempo se hacían dos lecturas por cada uno de los tres puntos determinados para ello. Se verificaba que las dos lecturas de cada punto cumplieran con un porcentaje de error inferior al 2% y luego se promediaban.

Tabla E1. Registro de VPU para cada una de las muestras libres de carbonatación.

PROBETA	LONGITUD (m)	PUNTO	MEDICIÓN (μs)			VELOCIDAD (m/s)
			1	2	PROMEDIO	
0
1	0,20435	1	59,2	58,2	58,7	3472,387426
		2	59,7	59,7	59,7	
		3	58,1	58,2	58,15	
2	0,20415	1	59,8	59,3	59,55	3470,954945
		2	58,1	58,4	58,25	
		3	58,3	59	58,65	
3	0,20475	1	58,1	57,8	57,95	3522,075688
		2	58,2	57,9	58,05	
		3	58,5	58,3	58,4	
4	0,20589	1	58,4	58	58,2	3555,958549
		2	58,2	57,9	58,05	
		3	57,4	57,5	57,45	
5	0,20655	1	59,3	59,1	59,2	3493,93854
		2	58,7	58,8	58,75	
		3	59,5	59,3	59,4	
6	0,20435	1	58	58	58	3517,211704
		2	58,4	58	58,2	
		3	58	58,2	58,1	
7	0,20655	1	58,7	58,2	58,45	3527,754056
		2	59	59	59	
		3	58,2	58,2	58,2	
8	0,20475	1	58,1	57,5	57,8	3539,325843
		2	58	58	58	
		3	58	57,5	57,75	

Tabla E2. Registro de VPU para cada una de las muestras carbonatadas.

PROBETA	LONGITUD (m)	PUNTO	MEDICIÓN (µs)			VELOCIDAD (m/s)
			1	2	PROMEDIO	
9	0,20627	1	59,8	60,2	60	3457,039106
		2	59,5	59	59,25	
		3	59,7	59,8	59,75	
10	0,20568	1	59,2	58,6	58,9	3476,28169
		2	59,7	59,2	59,45	
		3	58,9	59,4	59,15	
11	0,20606	1	60,5	60,3	60,4	3419,137168
		2	60,7	60,9	60,8	
		3	60	59,2	59,6	
12	0,20606	1	59,6	59,5	59,55	3474,873524
		2	59,1	59,6	59,35	
		3	59,1	58,9	59	
13	0,20569	1	58,4	58,4	58,4	3450,209673
		2	60,2	60,3	60,25	
		3	60,1	60,3	60,2	
14	0,20593	1	59,8	60	59,9	3435,984427
		2	60	60,4	60,2	
		3	59,4	60	59,7	
15	0,20386	1	58,4	59,3	58,85	3449,407783
		2	58,7	59,2	58,95	
		3	59,6	59,4	59,5	
16	0,20733	1	61	60,4	60,7	3382,218597
		2	61,9	61,6	61,75	
		3	61,6	61,3	61,45	
17	0,2055	1	60,6	60,1	60,35	3421,198668
		2	60	59,9	59,95	
		3	60,1	59,7	59,9	
18	0,20595	1	62,1	62,5	62,3	3334,32272
		2	62,7	61	61,85	
		3	61,5	60,8	61,15	
19	0,2064	1	62	62,6	62,3	3308,576009
		2	62,8	62,9	62,85	
		3	62,6	61,4	62	
20	0,20657	1	62,3	62,5	62,4	3291,952191
		2	63,2	62,7	62,95	
		3	63	62,8	62,9	
21	0,20711	2,2353	63,7	64	63,85	3174,099617
		2,2601	65,2	65,2	65,2	
		2,2848	66,6	66,8	66,7	
22	0,20654	2,3096	66,4	65,9	66,15	3125,447667
		2,3344	66	66	66	
		2,3591	65,9	66,3	66,1	
23	0,20635	2,3839	64	63,9	63,95	3236,016728
		2,4087	63,2	63,1	63,15	
		2,4334	64,2	64,2	64,2	
24	0,20685	2,4582	64,4	64,1	64,25	3187,211094
		2,483	65,9	64,8	65,35	
		2,5077	65,3	64,9	65,1	
25	0,2077	2,5325	66,6	67	66,8	3115,5
		2,5573	66,4	66,6	66,5	
		2,582	66,4	67	66,7	
26	0,20554	2,6068	65,5	65	65,25	3157,296467
		2,6316	64,8	65,2	65	
		2,6563	65	65,1	65,05	
27	.	.	.	.	.

ANEXO F. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El cálculo del valor de resistencia a la compresión f'_c se determinó mediante la ecuación:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad [14]$$

Donde P es la fuerza máxima soportada por el espécimen y A es el área de la sección transversal a la que se aplicó la carga. Como la maquina AMSLER mide la resistencia en kgf, se halló el área de la sección en cm^2 para obtener la resistencia en kgf/cm^2 . Una vez obtenido el valor se realizó la conversión a PSI y MPa.

Tabla F1. Registro de resistencia a la compresión para cada una de las probetas.

PROBETA	AREA (cm^2)	PRESIÓN (Kgf)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
			Kgf/ cm^2	PSI	Mpa
0	.	.	.	.	.
1	83,04	13500	162,57	2307,47	15,91
2	81,99	12400	151,24	2146,60	14,80
3	81,98	12800	156,14	2216,11	15,28
4	81,07	14200	175,16	2486,10	17,15
5	85,63	11800	137,80	1955,90	13,49
6	81,99	12400	151,24	2146,60	14,80
7	83,04	11800	142,10	2016,90	13,91
8	82,62	11400	137,98	1958,44	13,51
9	84,92	10700	132,60	1882,06	12,98
10	85,07	11100	131,48	1866,16	12,87
11	85,91	12200	142,01	2015,61	13,90
12	84,86	10900	128,45	1823,11	12,57
13	84,88	12000	141,38	2006,62	13,84
14	84,61	11200	132,37	1878,83	12,96
15	84,55	12000	139,93	1986,10	13,70
16	84,40	9900	123,20	1748,64	12,06
17	84,88	11200	131,95	1872,85	12,92
18	84,17	11000	129,30	1835,22	12,66
19	84,84	11400	133,20	1890,58	13,04
20	85,27	11200	131,35	1864,28	12,86
21	85,28	10100	118,43	1680,99	11,59
22	82,88	11000	132,72	1883,79	12,99
23	86,14	12000	139,31	1977,27	13,64
24	84,96	12000	141,24	2004,73	13,83
25	85,30	11000	128,96	1830,35	12,62
26	85,24	11100	130,22	1848,29	12,75
27	.	.	.	.	.

Para calcular la resistencia a la compresión se procedió de la siguiente manera:

Para el espécimen número 8 con área de $82,62 \text{ cm}^2$, la fuerza soportada fue de 11400 kgf.

$$f'_c = \frac{11400}{82,62} = 137,98 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para obtener el valor en PSI:


$$137,98 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 2,2 \frac{\text{Lbf}}{\text{kgf}} * 2,54^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{in}^2} = 1958,43 \text{ PSI}$$

Para obtener el valor en MPa:

$$1958,43 \text{ PSI} * 6896,55 \frac{\text{Pa}}{\text{PSI}} = 13,51 \text{ MPa}$$

ANEXO G. FICHA DE SEGURIDAD DEL DIÓXIDO DE CARBONO

La ficha de seguridad del dióxido de carbono utilizado fue suministrada por la empresa.



HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL (MSDS) DIOXIDO DE CARBONO

PRODUCTO Dióxido de Carbono	CAS: 124-38-9 DOT. N°: UN 1013 Ficha de intervención: N° 1
NOMBRE COMERCIAL Y SINONIMOS Dióxido de Carbono; Anhídrido Carbónico	Clase de riesgo: División 2.2
NOMENCLATURA QUÍMICA Y SINONIMOS Dióxido de Carbono	Fórmula: CO ₂
FECHA DE EMISION Y REVISIONES Revisado en: Febrero de 1991/C.R.C.03/98	Familia: Carbonatos

DATOS FÍSICOS

PUNTO DE EBULLICIÓN: Punto de sublimación: -109.3° F (-78.5°C)	DENSIDAD LIQUIDA A PUNTO DE EBULLICIÓN Densidad sólido: 97.5 Lb/ft ³ (1562 kg/m ³)
PRESION DE VAPOR a 70° F (21.1°C) = 856 psia (5900 Kpa)	DENSIDAD GASEOSA A 70° F. 1 atm .124 lb/ft ³ (1.99 kg/m ³)
% de Evaporación N/A	PUNTO DE CONGELACION - 69.8 °F (-56.6 °C) 75.1 psia (518 Kpa)
SOLUBILIDAD EN AGUA Muy soluble	GRAVEDAD ESPECIFICA (AIRE=1) a 70° F (21.1°C) = 1.65
APARIENCIA Y OLOR Gas incoloro, e inodoro.	

INFORMACION SOBRE RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSION

PUNTO DE INFLAMACION Método empleado N/A.	TEMPERATURA DE AUTO IGNICION N/A	LIMITE DE INFLAMABILIDAD % EN Volumen LEL: N/A UEL: N/A
MEDIO DE EXTINCIÓN Gas inerte, no inflamable		CLASIFICACION ELÉCTRICA No peligroso
PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR EL FUEGO N/A		
RIESGOS INUSUALES DE FUEGO Y EXPLOSION Si los cilindros están involucrados en un incendio, llévelos a un lugar seguro, o manténgalos fríos mediante niebla de agua.		