

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ATAQUE DE SULFATOS SOBRE
CONCRETO, MEDIANTE LA TÉCNICA DE VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO (VPU)”**

**GILBERTO ANDRES QUIROS VELASCO
RUTH MYRIAM SANTAMARIA URREA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTADES DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS Y FISICO MECANICAS
ESCUELAS DE INGENIERIA METALURGICA E INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ATAQUE DE SULFATOS SOBRE
CONCRETO, MEDIANTE LA TÉCNICA DE VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO (VPU)”**

**GILBERTO ANDRES QUIROS VELASCO
RUTH MYRIAM SANTAMARIA URREA**

**Trabajo de investigación, presentado como requisito de grado para optar al
título de Ingeniero Metalúrgico e Ingeniera Civil.**

Directores

**M.Sc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ
Ph.D. RICARDO ALFREDO CRUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTADES DE INGENIERIAS FISICO QUIMICAS Y FISICO MECANICAS
ESCUELAS DE INGENIERIA METALURGICA E INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

A Dios, por darme la vida y darme a mi familia que es mi tesoro.

A mi Padre, tu recuerdo me alienta cada día.

A mi Madre, por su infinito amor y apoyo incondicional.

A mis hermanas, por ser mi ejemplo de superación.

A mi hermano, amigo, compañero de mil batallas.

A mi novia y compañera de proyecto, por ser mi apoyo y fortaleza.

Gilberto Andrés Quirós V.

A Dios, por ser mi guía y fortaleza.

A mi familia, por brindarme la oportunidad, el amor, el apoyo incondicional y la confianza de alcanzar mis metas.

A mi novio y compañero por compartir esta etapa conmigo, por hacerla más agradable y por poner su fe en mí.

Ruth Santamaría U.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra alma mater por acogernos en su campus y cultivar en nosotros el espíritu de ser mejores, como personas y como profesionales, por brindarnos la oportunidad de conocer personas y adquirir conocimientos que enriquecieron nuestras vidas.

Agradecemos a nuestras escuelas por guiarnos y apoyarnos en el desarrollo de esta investigación, por poner a nuestro alcance personal capacitado y equipos de calidad.

Nuestro cariño y agradecimiento para nuestra Directora de Proyecto, M. Sc. Luz Amparo Quintero por su dedicación y compromiso con la institución y con nosotros y a nuestro codirector Ph.D. Ricardo Cruz por su colaboración y orientación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO	20
1.1 Planteamiento del Problema	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo General	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
2. MARCO TEORICO	22
2.1 Generalidades del concreto	22
2.1.1 Composición del concreto	22
2.1.1.1 Cemento	22
2.1.1.2 Agregados	24
2.1.1.3 Agua	25
2.1.2 Relación agua cemento (a/c)	26
2.1.3 Reacciones de hidratación del cemento	26
2.1.4 Durabilidad del concreto	28
2.2 Ataque por sulfatos	29
2.2.1 Origen del ataque	29
2.2.1.1 Fuentes Externas	29
2.2.1.2 Fuentes Internas	30
2.2.2 Reacción Química	31
2.2.3 Factores que determinan la velocidad y severidad del ataque	31
2.3 Velocidad de pulso ultrasónico en concretos	34
2.3.1 Generalidades de la Técnica	34

2.3.2	Modos de Transmisión	35
2.3.3	Factores que intervienen en la velocidad de pulso ultrasónico	36
3.	METODOLOGIA	38
3.1	Revisión Bibliográfica	39
3.2	Establecimiento de las condiciones del Ensayo	39
3.3	Montaje y puesta en marcha del ataque acelerado a concreto	40
3.3.1	Adecuación del recipiente	40
3.3.2	Preparación de la solución	41
3.3.3	Diseño de Mezcla y Elaboración de Probetas	42
3.3.3.1	Diseño de Mezcla	42
3.3.3.2	Elaboración de las Probetas	43
3.3.4	Ataque Acelerado	46
3.4	Realización de Pruebas a Nivel de Laboratorio	49
3.4.1	Cambios de Volumen	49
3.4.2	Cambios de Masa	50
3.4.3	Difracción de Rayos X	51
3.4.4	Resistencia a la Compresión	52
3.4.5	Velocidad de Pulso Ultrasónico	53
3.5	Análisis de Resultados	56
3.6	Elaboración del Informe Final	56
4.	ANALISIS DE RESULTADOS	57
4.1	Caracterización de los materiales	57
4.2	Diseño de Mezcla	58
4.3	Determinación de la Curva de Enfriamiento	59
4.4	Ensayos Experimentales	60
4.4.1	Cambios de Volumen	61
4.4.2	Cambios de Masa	64
4.4.3	Difracción de Rayos X	67

4.4.4 Resistencia a la Compresión	69
4.4.5 Velocidad de Pulso Ultrasónico	71
4.5 Registro visual del estado de las probetas	73
4.6 Correlación entre la Resistencia a la Compresión y la Velocidad de Pulso Ultrasónico	75
4.7 Correlación entre la Densidad (masa/volumen) del concreto y la Velocidad de Pulso Ultrasónico	78
5. CONCLUSIONES	81
6. RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFIA	84
ANEXOS	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Nomenclatura óxidos y compuestos del cemento	23
Tabla 2. Componentes químicos del cemento	23
Tabla 3. Límites granulométricos del agregado grueso	24
Tabla 4. Límites granulométricos del agregado fino	25
Tabla 5. Reacciones químicas y daños generados por sulfato de calcio, sodio y magnesio.	32
Tabla 6. Clasificación del ataque por sulfatos	33
Tabla 7. Clasificación del cemento portland según el porcentaje de sus componentes	33
Tabla 8. Modos de transmisión	36
Tabla 9. Análisis del control de calidad del agua	43
Tabla 10. Distribución de probetas de acuerdo al ensayo para el que se usan	45
Tabla 11. Parámetros de funcionamiento del equipo	54
Tabla 12. Características obtenidas para los agregados fino y grueso	57
Tabla 13. Análisis granulométrico del agregado fino	58
Tabla 14. Dosificación de la mezcla	58
Tabla 15. Registro de alturas, altura promedio y % de expansión	61
Tabla 16. Registro de diámetros, diámetro promedio y % de expansión	62
Tabla 17. Registro del volumen de cada probeta y promedio	63

Tabla 18. Registro de la masa de cada probeta y promedio	65
Tabla 19. Promedio de gramos de solución absorbida cada 15 ciclos	66
Tabla 20. Presencia de fases cristalinas durante el ataque	68
Tabla 21. Registro de la resistencia de cada probeta y promedio	70
Tabla 22. Registro de la VPU de cada probeta y promedio	71
Tabla 23. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de las probetas de resistencia a la compresión antes de ser falladas	76
Tabla 24. Registro de VPU promedio y resistencia promedio	77
Tabla 25. Registro de la densidad promedio y VPU promedio	79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etringita y mono-sulfato hidratado	27
Figura 2. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación	38
Figura 3. Plano recipiente y rejilla	41
Figura 4. Elaboración de las probetas	44
Figura 5. Esquema representativo de un ciclo de ataque acelerado	48
Figura 6. Registro dimensiones de las probetas	50
Figura 7. Registro masa de las probetas	50
Figura 8. Muestra para ensayo DRX	51
Figura 9. Probetas y máquina de ensayos AMSLER	52
Figura 10. Probetas y equipo de ultrasonido	53
Figura 11. Preparación superficies de las probetas	54
Figura 12. Plano e imagen de las guías usadas para la toma de datos de VPU	55
Figura 13. Montaje para la determinación de la curva de enfriamiento de las muestras de concreto	59
Figura 14. Fotografía comparativa de muestras con y sin ataque. Presencia de expansión localizada (ciclo 105)	73
Figura 15. Fotografía comparativa de muestras con y sin ataque. Presencia de fisuras (ciclo 90)	74
Figura 16. Descascaramiento (ciclo 105)	75

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva de enfriamiento	60
Gráfica 2. % de expansión de las probetas en altura y diámetro	62
Gráfica 3. Líneas de tendencia del % de expansión en altura y diámetro	63
Gráfica 4. Comportamiento del volumen a lo largo del ataque	64
Gráfica 5. Comportamiento de la masa a lo largo del ataque	66
Gráfica 6. Gramos de solución absorbida por el concreto durante el ataque	67
Gráfica 7. Cambios en la resistencia a la compresión a lo largo del ataque	70
Gráfica 8. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico a lo largo del ataque	72
Gráfica 9. Desarrollo de la velocidad de pulso ultrasónico para probetas destinadas a la prueba de resistencia a la compresión durante el ataque	76
Gráfica 10. Modelo ajustado que correlaciona la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico	78
Gráfica 11. Modelo ajustado que correlaciona la densidad con la velocidad de pulso ultrasónico	80

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Metodología y cálculo de diseño de mezcla	87
ANEXO B: Toma de datos y cálculos efectuados para el análisis de resultados	93
ANEXO C: Resultado de la prueba de difracción de rayos x (ciclos 0 y 75)	96
ANEXO D: Imágenes del deterioro causado a especímenes de concreto por ataque acelerado de sulfato de sodio	100

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ATAQUE DE SULFATOS SOBRE CONCRETO, MEDIANTE LA TÉCNICA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).*

AUTORES: QUIROS VELASCO, Gilberto Andrés. SANTAMARIA URREA, Ruth Myriam **

PALABRAS CLAVES: concreto, velocidad de pulso ultrasónico, ataque acelerado de sulfatos, resistencia a la compresión.

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico para estimar los cambios ocurridos a un concreto fabricado con cemento portland tipo I, relación agua/cemento de 0,5 y agregado grueso de $\frac{3}{4}$ ", debidos a un ataque acelerado con sulfato de sodio con duración de 120 ciclos (mojado-secado). Los resultados de la técnica fueron validados por medio ensayos de resistencia a la compresión, cambios de masa y volumen y difracción de rayos X, sobre un total de 25 probetas cilíndricas de 10 x 20 cm, permitiendo verificar la viabilidad de usar éste ensayo no destructivo como técnica de estimación de la resistencia a la compresión de un concreto con las características mencionadas expuesto a un ataque acelerado. Se relacionó la velocidad de pulso ultrasónico con la resistencia a la compresión mediante un modelo exponencial dado por la expresión $f'_c = e^{-1.0878 + 0.0012 VPU}$ con un valor de $R^2 = 88.61$ por ciento. Adicionalmente se relacionó la densidad (masa/volumen) y la velocidad de pulso ultrasónico por medio de un modelo lineal dado por la expresión $\rho = 0.111261 VPU + 1871.98$ con un valor de $R^2 = 72.51$ por ciento.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas y Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Civil, Directora: M.Sc. Luz Amparo Quintero. Co director: Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF SULFATE ATTACK ON CONCRETE, BY THE TECHNIQUE OF ULTRASONIC PULSE VELOCITY (UPV) *

AUTORES: QUIRÓS VELASCO, Gilberto Andrés. SANTAMARÍA URREA, Ruth Myriam **

KEYWORDS: concrete, ultrasonic pulse velocity, accelerated sulfate attack, compressive strength.

ABSTRACT

In this study, the use of the technique of ultrasonic pulse velocity to estimate the changes occurred in a concrete manufactured with type I portland cement, water / cement ratio of 0.5 and ¾" coarse aggregate , due to an accelerated sodium sulfate attack with a duration of 120 cycles (wet-dry), was evaluated. The results of the technique were validated by compressive strength testing, mass changes, volume changes and X-ray diffraction on a total of 25 cylindrical specimens of 10 x 20 cm, allowing verification of the feasibility of using this non-destructive testing as a technique for estimating the compressive strength of concrete with the features mentioned above and being exposed to an accelerated attack. The ultrasonic pulse velocity was related to compressive strength using an exponential model given by the expression: $f'_c = e^{-1.0878 + 0.0012 VPU}$ with a value of $R^2 = 88.61$ percent. Additionally, the density (mass / volume) was related to ultrasonic pulse velocity through a linear model given by the expression: $\rho = 0.111261 VPU + 1871.98$ with a value of $R^2 = 72.51$ percent.

* Research Work.

** Faculty of Physical Chemistry and Physical Mechanical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Civil Engineering. Director: M. Sc. Luz Amparo Quintero. Co director: Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz.

INTRODUCCION

El concreto es el material estructural más utilizado en el mundo hoy; a través de la historia se ha destacado por sus propiedades mecánicas, versatilidad, manejabilidad, durabilidad y bajo costo. Los romanos lo emplearon para construir acueductos, muros de contención, templos, coliseos, puentes, caminos, entre otras obras de ingeniería.

Muchas de las estructuras que se construyen en concreto como son las presas, plantas de tratamiento de aguas, cimentaciones, muros exteriores, pisos o techos se encuentran en contacto con el ambiente, lo que puede generar cambios en la estructura interna del concreto. Uno de los agentes que pueden afectar al concreto es el ión sulfato, ya que en la naturaleza se pueden encontrar fácilmente sulfatos disueltos en aguas o en el suelo.

Este ataque puede generar expansiones en el concreto, micro-grietas, pérdida progresiva de fuerza y masa (ablandamiento) debido a la formación de productos expansivos como la Etringita y el Yeso.

Estas modificaciones que ocurren en la estructura del concreto pueden ser evaluadas mediante ensayos no destructivos, los cuales permiten estimar el estado de material sin generar daño en ellos. Una de estas técnicas es la velocidad de pulso ultrasónico, la cual usada con bajas frecuencias permite evaluar materiales heterogéneos como el concreto.

Se realiza la presente investigación con el propósito de contribuir en el estudio del efecto que tiene sobre el concreto la exposición a un ataque acelerado por sulfatos, por medio de la velocidad de pulso ultrasónico. Para esto se evalúa el concreto antes y a lo largo del ataque mediante ensayos de resistencia a la compresión, cambios de masa, cambios de volumen, y difracción de rayos x.

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 Planteamiento del problema

El deterioro generado a estructuras de concreto por ataque químico ha sido objeto de estudio por muchos años, debido a la importancia y a la necesidad de garantizar la calidad y la seguridad de estructuras en servicio expuestas a ambientes agresivos.

Dentro de los ataques químicos a los que pueden estar expuestos los concretos se encuentra el ataque ocasionado por el ion sulfato, el cual al encontrarse en concentraciones superiores a 600 mg/l en agua o a 6000 mg/kg en el suelo^[26], y en ambientes húmedos o condiciones de secado y mojado, genera reacciones químicas en el concreto, que conllevan al incremento en los esfuerzos internos, aumento en el volumen, agrietamiento, descascaramientos, deformaciones, pérdida de masa y de alcalinidad entre otros.

Evaluar el avance y las consecuencias de este tipo de ataques es importante para valorar el estado de las estructuras y conocer la vida útil y el factor de seguridad de la misma. Estos daños generan altos costos de reparación, prevención o demolición dependiendo de la rapidez con que sea detectado el daño, por lo tanto es muy importante considerar técnicas que no generen daño adicional a la estructura y que además ayuden a disminuir los costos de detección, como son las técnicas de ensayos no destructivos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar el efecto del ataque acelerado de sulfatos sobre muestras de concreto sin refuerzo, por medio de la técnica de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la resistencia a la compresión, cambios micro-estructurales, cambios de masa y volumen, por medio de pruebas físico mecánicas, antes, durante y después del ataque de sulfatos a las muestras de concreto.
- Evaluar los cambios en la velocidad de pulso ultrasónico sobre las muestras de concreto sin refuerzo, a lo largo de la fase experimental.
- Relacionar los resultados obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico y las pruebas físico-mecánicas, con el fin de estimar los efectos del ataque de sulfatos sobre el concreto con a/c de 0.5.

2. MARCO TEORICO

2.1 Generalidades del concreto

El concreto es el material más usado en la construcción de obras de ingeniería, superando al acero y a la madera con un amplio margen, debido principalmente a su manejabilidad, alta resistencia a la compresión, resistencia al agua y bajo costo de fabricación y mantenimiento.

Entre las características principales que aporta este material están su trabajabilidad y su durabilidad. Esta primera característica es producto de su consistencia, plasticidad, cohesividad y compactabilidad cuando se encuentra en estado fluido. La segunda al igual que su resistencia a esfuerzos de compresión son productos de su endurecimiento. ^[14]

2.1.1 Composición del Concreto

El concreto es un material heterogéneo que consta de una matriz de cemento y agua en la cual se encuentran embebidas partículas de agregados.

2.1.1.1 Cemento

Para la fabricación del cemento se usan como materia prima caliza y arcillas, las cuales se mezclan y trituran formando un crudo que se lleva a horno, lo que da lugar a la formación del clinker. Una vez obtenido el clinker se agrega yeso y se lleva nuevamente a triturar en una trituradora de bolas. El yeso se agrega a la mezcla con el fin de retardar el fraguado, lo que le aporta al concreto un mayor tiempo en estado plástico.

Para facilitar el manejo de compuestos y reacciones químicas en el cemento es costumbre expresar los óxidos y compuestos del clínker utilizando las abreviaturas presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura óxidos y compuestos del cemento

Oxido	Abreviación	Compuesto	Abreviación
CaO	C	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$
SO_3	$\bar{\text{S}}$	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$

Fuente. Concrete, Microstructure, Properties and Materials ^[14]

En la Tabla 2 se muestran los componentes químicos del cemento y su función principal en el proceso de formación del clínker o durante las reacciones de hidratación, haciendo uso de la nomenclatura presentada en la tabla anterior.

Tabla 2. Componentes químicos del cemento

Nomenclatura	Nombre	Función
C_3S	Silicato Tricálcico	Desarrolla resistencia mecánica a corto plazo
C_2S	Silicato Bicálcico	Desarrolla resistencia mecánica a largo plazo
C_3A	Aluminato Tricálcico	Genera gran calor de hidratación y acelera el endurecimiento en las primeras horas
C_4AF	Ferroaluminato Tetracálcico	Aporta fundentes de hierro en la fabricación del clínker
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	Controla el fraguado

Fuente. Los Autores ^{[10][7]}

El cemento por sí solo no es un aglomerante pero al contacto con el agua adquiere dicha propiedad, debido a la ocurrencia de variadas reacciones químicas durante la hidratación. ^[14]

2.1.1.2 Agregados

Los agregados para la fabricación de concreto deben ser partículas que cumplan con requisitos de resistencia mecánica, resistencia a condiciones climáticas severas y además deben poseer una forma y tamaño adecuados.

Los agregados constituyen entre el 65 y el 75 % del volumen total del concreto. ^[13]

- **Agregado Grueso**

El agregado grueso (gravas) está conformado por partículas de tamaño superior a 4,75 mm, cuyas fuentes principales son los macizos rocosos o canteras. ^[14]

Una distribución granulométrica del agregado grueso adecuada se encuentra en un rango de valores como los mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Límites granulométricos del agregado grueso

Tamiz	% en peso que pasa
25.0 mm (1 pulg)	100
19.05 mm (¾ pulg)	90 a 100
12.5 mm (½ pulg)	20 a 55
4.75 mm (No. 4)	0 a 5
2.36 mm (No. 8)	0 a 5

Fuente. NTC 174^[16]

- **Agregado Fino**

El agregado fino (arenas) está conformado por partículas entre los 4,76 mm y los 0,076 mm, y se encuentran en su mayoría en depósitos aluviales. Debe estar libre de micas o materiales que afecten la resistencia. ^[14]

Los límites para una adecuada gradación del agregado fino se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Límites granulométricos del agregado fino

Tamiz	% en peso que pasa
9.5 mm (3/8 pulg.)	100
4.75 mm (No. 4)	95 a 100
2.36 mm (No. 8)	80 a 100
1.18 mm (No. 16)	50 a 85
600 μm (No. 30)	25 a 60
300 μm (No. 50)	10 a 30
150 μm (No. 100)	2 a 10
(No. 200)	0 a 7

Fuente. NTC 174^[16]

2.1.1.3 Agua

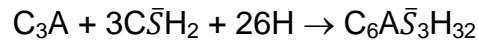
El agua que se utiliza en la mezcla debe estar libre de impurezas tales como sales, cloruros, ácidos, aceites y materiales orgánicos y debe cumplir con los requisitos de la NTC 3459^[17]

2.1.2 Relación agua cemento (a/c)

Se define como la relación entre la masa de agua y la masa de cemento. Esta es un parámetro determinante de la resistencia final del concreto, ya que posee una relación inversamente proporcional con la resistencia del concreto a soportar esfuerzos de compresión, es decir, a mayor a/c menor resistencia y viceversa.

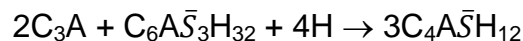
2.1.3 Reacciones de Hidratación del cemento

Al mezclar el cemento con agua, la reacción que ocurre más rápidamente es la hidratación del aluminato tricálcico (C_3A), el cual reacciona con yeso para producir Etringita ^[28]



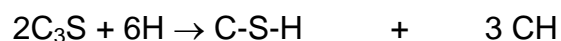
Etringita

El C_3A reacciona con la Etringita y con agua para formar monosulfato, una imagen de estos dos compuestos se presenta en la figura 1.



monosulfato

Sin embargo el desarrollo de la resistencia principal del concreto, resulta de la hidratación de las fases silicato de calcio (C_3S y C_2S). Ambos silicatos de calcio se combinan con agua para formar el silicato de calcio tipo gel hidratado, o C-S-H y Portlandita, o CH.



Tobermorita

Portlandita

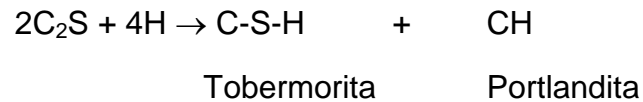
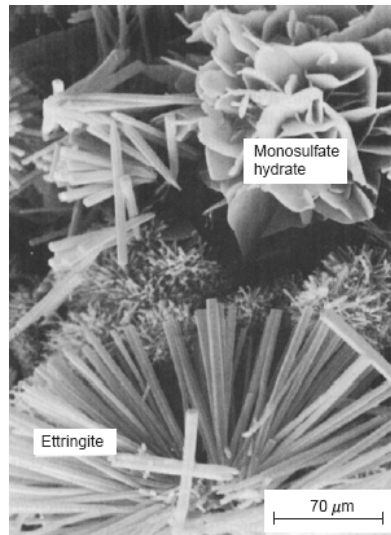


Figura 1. Etringita y mono-sulfato hidratado



Fuente. Concrete, Microstructure, Properties and Materials ^[14]

La Etringita primaria, que aparece como resultado de la hidratación del cemento, es responsable de darle al cemento mayor cohesión, a diferencia de la Etringita producto del ataque de sulfatos, que es responsable principalmente de las expansiones.

La Tobermorita gel es responsable de la adherencia de la pasta de cemento con los agregados, por lo que es muy importante en el desarrollo de la resistencia y durabilidad del concreto.

La Portlandita es la encargada de conservar el pH de la pasta en valores altos, lo que genera una protección contra la corrosión electroquímica. La portlandita también es responsable de efectos negativos como es, que puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos expansivos por

formación de Etringita secundaria, debido a su solubilidad en agua y a que es fácilmente lixiviable por disolución. [9]

2.1.4 Durabilidad del Concreto

La norma técnica colombiana NTC 5551^[18], brinda los parámetros de diseño para garantizar la durabilidad del concreto en el tiempo y define a ésta como la capacidad que tiene el concreto de comportarse satisfactoriamente frente a acciones físicas y químicas agresivas.

Se deben contemplar diversos factores durante la elaboración, puesta en obra y la exposición en servicio del concreto, ya que se pueden presentar ciertas reacciones indeseables que van en detrimento de la durabilidad del concreto.

Entre las más comunes se encuentran el falso fraguado que consiste en un defecto de fabricación del cemento, cuando al agregar yeso al clínker durante el proceso de molienda, las altas temperaturas hacen al yeso perder parte del agua de cristalización, lo que se traduce en una pasta de cemento que se rigidiza en los primeros minutos posteriores a la adición de agua. Otra reacción indeseable que se presenta y que ha sido ampliamente estudiada es la carbonatación, ésta es producto del contacto de dióxido de carbono con el hidróxido de calcio originado en la hidratación del cemento. Su principal efecto es la reducción del pH del concreto lo que da lugar a retracciones, reducciones de la porosidad, modificación lenta en la estructura y variaciones en la resistencia mecánica y química.

El concreto también se puede ver expuesto a ataques por sulfatos; esta reacción genera principalmente expansiones y pérdida de cohesión, lo que puede evolucionar en grietas, pérdida de masa y disminución en la resistencia.

2.2 Ataque por sulfatos

Durante décadas se ha investigado como es el mecanismo de ataque de los sulfatos al concreto, y a pesar de esto aun no se llega a un consenso definitivo, debido a que este ataque es un proceso complejo. Se conoce que compuestos con presencia del ion sulfato reaccionan con componentes del cemento para formar nuevas fases cuya principal característica es el gran aumento en su volumen en comparación con sus productos de origen. Este aumento de volumen genera tensiones internas que pueden superar la resistencia a la tracción del concreto, causando la fisuración del mismo. [27]

2.2.1 Origen del ataque

Las fuentes de sulfato que generan el ataque pueden provenir del exterior, como efluentes de la industria química con presencia de ácido sulfúrico o estar presentes en los componentes de fabricación del concreto (sulfatos presentes en los elementos de composición del cemento, agua utilizada en la mezcla, agregados).

2.2.1.1 Fuentes externas [27]

- **Suelos y aguas subterráneas:** En su mayoría los suelos contienen algo de sulfato en forma de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), generalmente entre el 0.01 y el 0.05 % de SO_4 en el suelo^[14], si tenemos en cuenta la baja solubilidad del yeso en el agua a temperaturas normales (aproximadamente 1400 mg/L SO_4) esta cantidad se considera despreciable para afectar al concreto. Sin embargo no se debe pensar en el yeso como única fuente de sulfatos, una mayor concentración del ion en aguas subterráneas se debe a la presencia principalmente de sulfatos de sodio, potasio y magnesio, teniendo en

cuenta que las solubilidades de los iones de sodio y de magnesio son muy superiores a las del yeso (del orden de 150 a 200 veces).

Estos sulfatos proceden de la oxidación de sulfuros como la pirita, descomposición biológica de la materia orgánica en suelos, pantanos o lagos poco profundos, y contaminación industrial como pozos de minería, tuberías de desagüe, efluentes de hornos que utilizan combustibles con alto contenido de azufre, etc.

- **Aguas marinas:** El deterioro al concreto generado por reacción química en presencia de agua marina se debe principalmente al sulfato de magnesio. Este reacciona con el hidróxido de calcio presente en los cementos portland para dar sulfato de calcio e hidróxido de magnesio.
- **Aguas de embalse:** La presencia de sulfatos en estas aguas se debe principalmente a las rocas yesíferas que pueden estar presentes en la zona del embalse.

2.2.1.2 Fuentes Internas

- **Cemento:** Uno de los componentes del cemento portland es el yeso (sulfato de calcio), este se incorpora en el proceso de fabricación con el propósito de regular el fraguado.
- **Agregados:** En ocasiones estos pueden llegar a contener yeso, por esto se recomienda un contenido máximo de 4.5% si se emplea cemento portland normal y máximo 6% si se utiliza cemento portland resistente a sulfatos. ^[27]

2.2.2 Reacción Química ^[27]

El deterioro del concreto como resultado de reacciones químicas entre componentes del cemento portland hidratado y los iones sulfato de una fuente externa está directamente relacionado con la cantidad y el tipo de sulfato.

Si se tiene una alta concentración de sulfato el ataque será más extenso, y su agresividad varía de acuerdo con el tipo de sulfato usado. En orden descendente amonio, magnesio, sodio, potasio y calcio representan los iones de sulfato más agresivos.

Dependiendo del tipo de sulfato, la forma de ataque puede variar como se muestra en la Tabla 5.

2.2.3 Factores que determinan la velocidad y severidad del ataque

Para clasificar la velocidad y severidad de un ataque por sulfatos se deben tener en cuenta muchos factores tales como, la naturaleza del sulfato, la concentración y solubilidad del mismo, el estado en que se encuentra, es decir, si está en solución o en el suelo y si se encuentra estancado o fluyendo.

De acuerdo a la durabilidad del concreto se puede clasificar un ataque de sulfatos como débil, medio o fuerte, teniendo en cuenta su concentración y el medio en el que se encuentre tal como se indica en la tabla 6.

Tabla 5. Reacciones químicas y daños generados por sulfato de calcio, sodio y magnesio.

SULFATO DE CALCIO	Daños generados
	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento de volumen de hasta el 227%, causado por formación de Etringita. -Fisuración debida a tensiones internas.
Reacciones	
$3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 19\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ <p style="text-align: center;">Sulfato de calcio Aluminato de calcio hidratado Sulfo-aluminato de calcio (Etringita)</p>	
SULFATO DE SODIO	Daños generados
	<ul style="list-style-type: none"> - Expansiones de alrededor de 125% y perdida de cohesión debido a la formación de yeso. - Aumento de volumen y fisuración como resultado de la formación de Etringita.
Reacciones	
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O}$ <p style="text-align: center;">Portlandita Sulfato de sodio Yeso Hidróxido de sodio</p> $3(\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 6\text{NaOH} + 17\text{H}_2\text{O}$ <p style="text-align: center;">Sulfato de sodio Aluminato de calcio hidratado Etringita Hidróxido de sodio</p>	
SULFATO DE MAGNESIO	Daños generados
	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro en la cohesión de los productos de hidratación del cemento. - Aumento de volumen y fisuración por formación de Etringita.
Reacciones	
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{OH})_2$ <p style="text-align: center;">Portlandita Sulfato de magnesio Yeso Hidróxido de magnesio</p> $3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 19\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ <p style="text-align: center;">Yeso Aluminato de calcio hidratado Etringita</p> $3\text{MgSO}_4 + 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 3\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ <p style="text-align: center;">Sulfato de magnesio Silicato tricálcico Yeso Hidróxido de magnesio</p>	

Fuente. Los Autores ^[27]

Tabla 6. Clasificación del ataque por sulfatos

Tipo de Medio	Parámetros	Subclase		
		Ataque Débil	Ataque Medio	Ataque Fuerte
AGUA	ION SULFATO SO ₄ ²⁻ (mg/L)	200 - 600	600 - 3000	> 3000
SUELO	ION SULFATO SO ₄ ²⁻ (mg/Kg de suelo seco)	2000 - 3000	3000 - 12000	> 12000

Fuente. NTC 5551^[18]

El cemento portland se clasifica de acuerdo con el porcentaje que de sus componentes esenciales contenga, como se muestra en la tabla 7.

Teniendo en cuenta dicha clasificación se consideran los cementos tipo II y tipo V como resistentes a sulfatos por su bajo contenido de C₃A, sin embargo de acuerdo a la naturaleza del sulfato que los ataque pueden llegar a estar en mayor riesgo que otros tipos de cemento. Por ejemplo el sulfato de sodio tiende a atacar con mayor severidad a cementos con alto contenido de C₃A, mientras que el sulfato de magnesio lo hace con aquellos que tienen un bajo contenido del mismo. ^[27]

Tabla 7. Clasificación del cemento portland según el porcentaje de sus componentes

Cemento Portland Tipo	%C ₃ S	%C ₂ S	%C ₃ A	%C ₄ AF	Característica
I	48	27	12	8	Uso general
II	40	35	5	13	Moderado calor de hidratación
III	62	13	9	8	Alta resistencia a corto plazo
IV	25	50	6	12	Bajo calor de hidratación
V	38	37	4	9	Ambientes agresivos

Fuente. Concreto y otros materiales para la construcción ^[12]

El contacto entre el concreto y el sulfato se incrementa cuando el sulfato se encuentra en aguas que fluyen, y es mayor si el concreto se encuentra expuesto a ciclos de mojado y secado que cuando éste está en inmersión continua, ya que se produce cristalización de sales, lo que empeora el ataque.

También existe relación entre la velocidad del ataque y la permeabilidad del concreto. Se requiere tener bajas permeabilidades, lo que implica adecuada compactación y curado y baja relación a/c, para que la velocidad del ataque sea mínima.

2.3 Velocidad de pulso ultrasónico en concretos

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es una de las técnicas de ensayos no destructivos más utilizados a la hora de evaluar estructuras de concreto, ya que permite diagnosticar y ubicar zonas en las cuales se presenten variaciones en sus propiedades.

De acuerdo con la norma ASTM C597^[1], el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en concreto es aplicable para determinar la uniformidad y la calidad relativa del mismo. Con este ensayo se puede indicar la presencia de vacíos, grietas o cambios en las propiedades del concreto, así como estimar la resistencia a la compresión del mismo.

2.3.1 Generalidades de la Técnica

Esta técnica tiene como propósito determinar el tiempo de vuelo, es decir, el tiempo que demora una onda en viajar a través de una pieza de concreto y así obtener la velocidad de dicho pulso, por medio de la ecuación (1) ^[11]

$$V = \frac{L}{t}$$

(1)

donde:

V = velocidad del pulso ultrasónico

L = longitud de la pieza de concreto

t = tiempo de vuelo

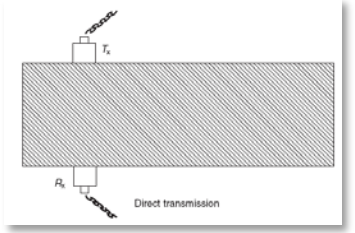
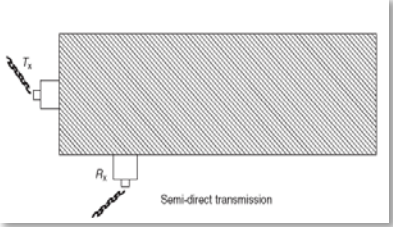
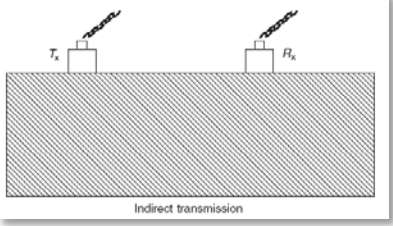
El equipo de VPU funciona con pulsos de onda longitudinal de baja frecuencia generados por un transductor electro-acústico que actúa como emisor, al transformar energía eléctrica en mecánica, que son recibidos por otro que actúa como receptor, y cumple la función opuesta, es decir, recibe el pulso como onda mecánica y lo convierte en energía eléctrica.

2.3.2 Modos de transmisión

La técnica de VPU brinda tres mecanismos de medición diferentes de acuerdo a la geometría de la pieza a estudiar y al acceso de las caras libre de la misma.

En la tabla 8 se muestra un esquema de la ubicación de los palpadores en la pieza y las principales características de cada uno de los modos de transmisión.

Tabla 8. Modos de transmisión

Modo de Transmisión	Esquema de la posición de los palpadores	Características
Directo		<p>Ofrece máxima transferencia de energía entre palpadores debido a que la onda viaja normal a ellos y por lo tanto brinda mayor exactitud en la lectura.</p>
Semi-directo		<p>Debe tenerse en cuenta que la ubicación de los palpadores permita la lectura y que la distancia para el cálculo de la velocidad se debe realizar teniendo en cuenta el teorema de Pitágoras</p>
Indirecto		<p>Proporciona medidas de velocidad de pulso que transitan por la zona cercana a la superficie del concreto, lo cual no permite conocer la respuesta al paso del pulso en zonas más representativas del concreto.</p>

Fuente. Los Autores ^[15]

2.3.3 Factores que intervienen en la velocidad de pulso ultrasónico

Cuando se aplica la técnica de velocidad de pulso ultrasónico se debe tener presente que existen variables que determinan la respuesta de las ondas al atravesar el material. A continuación se presentan algunos de estos factores: ^[11]
[14]

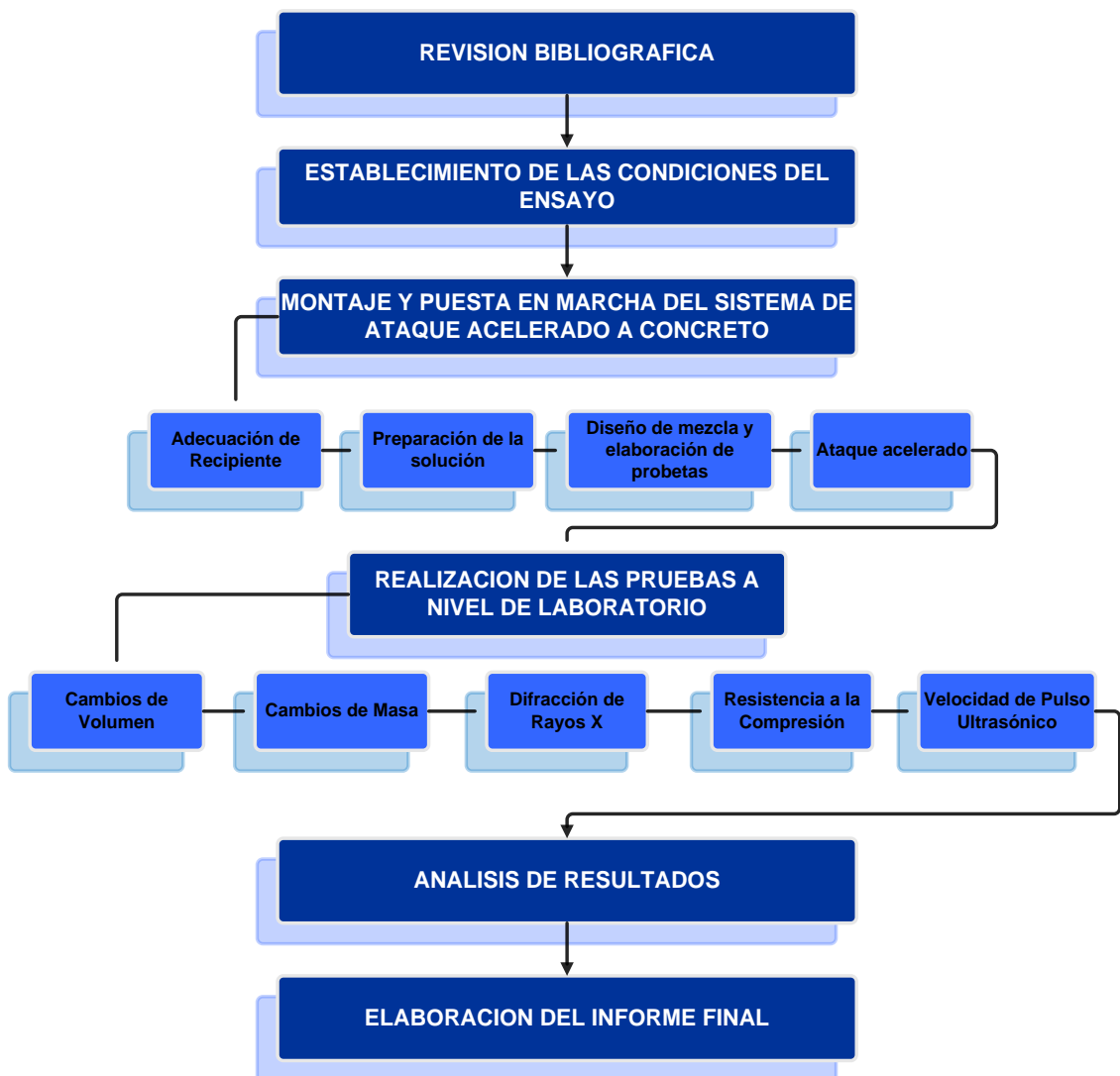
- **Edad:** A medida que el concreto aumenta su resistencia durante el curado, aumenta su hidratación y disminuye su porosidad, aumentando la rigidez del concreto, hecho que favorece la velocidad de pulso ultrasónico.

- **Humedad:** Entendida como el líquido retenido en los poros y fisuras del concreto, es proporcional a la velocidad de pulso ultrasónico, es decir a medida que aumenta la humedad aumenta la velocidad de las ondas en el concreto.
- **Agregado:** Debido a la naturaleza de las rocas usadas como agregados en el concreto, éstos suelen tener velocidades de pulso mayores que las de la pasta, lo que se traduce en un aumento en la velocidad de pulso del concreto.
- **Longitud de la trayectoria:** Esta toma importancia cuando su longitud es menor de 100 mm para un agregado de tamaño 20 mm y menor de 150 mm para un agregado de 40 mm. También se debe tener en cuenta que para una frecuencia de 50 kHz la longitud no puede ser menor de 80 mm.

3. METODOLOGIA

En la figura 2 se muestra un esquema básico de las principales actividades realizadas para el desarrollo de esta investigación:

Figura 2. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación



Fuente. Los Autores

A continuación se presentan detalles de cada una de las etapas indicadas en la figura 2.

3.1 Revisión Bibliográfica

En esta primera etapa se realizó la revisión, selección y análisis de material bibliográfico, que incluye libros, tesis, artículos, normas y especificaciones.

La búsqueda se enfocó en conocer las características básicas del material objeto de estudio (concreto), entender el mecanismo de ataque por sulfatos a concreto y determinar la metodología de ataque acelerado que mejor se adaptara a los objetivos de la investigación. Otro tema de vital importancia para la investigación fue el estudio del funcionamiento, manejo y análisis de resultados obtenidos de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico en concretos y los ensayos de resistencia a la compresión y difracción de rayos X.

3.2 Establecimiento de las condiciones del Ensayo

Con base en la bibliografía consultada se establecieron el mecanismo de ataque acelerado y las pruebas que brindaran mejor información sobre el desarrollo del ataque así: ^[6]

- Mecanismo de ataque: Ciclos de mojado y secado, usando como reactivo sulfato de sodio en una concentración de 160 g/L de agua.
- Relación a/c: 0.5
- Pruebas: - Cambios de Volumen
- Cambios de Masa

- Difracción de Rayos X
- Resistencia a la Compresión
- Velocidad de Pulso Ultrasónico

3.3 Montaje y Puesta en marcha del Ataque Acelerado a Concreto

El montaje y posterior ataque a las probetas de concreto se realizó en las instalaciones del Laboratorio 103 del edificio de caracterización de materiales Álvaro Beltrán Pinzón, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Para cumplir con el objetivo de esta etapa se realizaron las siguientes actividades: Adecuación del recipiente, preparación de la solución, diseño de mezcla y elaboración de probetas.

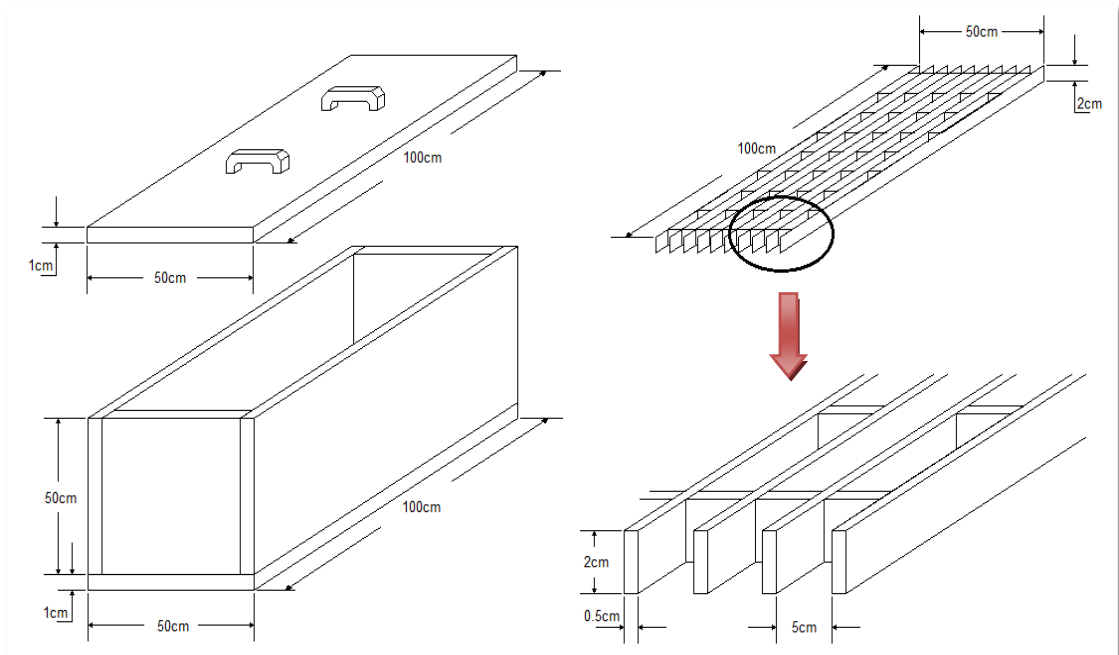
3.3.1 Adecuación del Recipiente

Para el diseño del recipiente donde se realizó la inmersión de las probetas en solución de sulfato de sodio, se tuvo en cuenta la cantidad de probetas, el volumen de solución y el material componente del recipiente; este último se seleccionó de tal manera que fuera inerte con la solución.

El recipiente se construyó en acrílico (Polimetilmetacrilato) de 10mm de espesor, con tapa hermética y con una rejilla elaborada en el mismo material. Sobre esta rejilla se ubicaron las probetas para permitir el contacto de toda su superficie con la solución.

En la figura 3 se presenta un plano detallado del recipiente y la rejilla.

Figura 3. Plano recipiente y rejilla



Fuente. Los Autores

3.3.2 Preparación de la Solución

Para la preparación de la solución se disolvieron 160 g de sulfato de sodio anhidro con una pureza de 99.9 % (según reporte suministrado por el proveedor) por cada litro de agua (potable). Una vez preparada la solución, se vació dentro del recipiente y se tomó una lectura de pH, como una referencia inicial.

Es importante tener en cuenta que la tapa hermética debía estar siempre puesta para evitar pérdidas por evaporación y evitar contaminación de la solución.

3.3.3 Diseño de Mezcla y Elaboración de Probetas

3.3.3.1 Diseño de Mezcla


El diseño de mezcla se inició con la caracterización de los agregados, para lo cual se estableció el tamaño máximo de agregado grueso igual a 19,05 mm (3/4") y se determinó el modulo de finura del agregado fino igual a 2.1.

El diseño de mezcla se realizó para un total de 25 probetas cilíndricas de volumen $V = 0.001571 \text{ m}^3$ y relación agua cemento de 0.5. Los resultados de la caracterización de los materiales se presentan en el capítulo siguiente y los cálculos de diseño de mezcla se muestran en el Anexo A.

Materiales involucrados en el diseño de la mezcla:

- **Cemento:** Se usó cemento Portland Tipo I, que cumple con los valores estipulados por las normas técnicas colombianas NTC 121^[19] y 321^[20] y la norma americana ASTM C-1157^[2].
- **Agregados:** Se usó material granular y fino proveniente del sector de Pescadero, Santander. Se determinaron sus características de acuerdo a las normas NTC 92^[21], 176^[22] y 237^[23] y se lavó y secó el agregado grueso para eliminar impurezas, en especial materia orgánica.
- **Agua:** El agua usada para la fabricación de las probetas se tomó del acueducto metropolitano de Bucaramanga y se verificó que cumpliera con las características fisicoquímicas requeridas, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Análisis del control de calidad del agua

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCIÓN																			
F CC 507-006		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																			
Rev.:0																					
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA				AÑO:		2010													
PARAMETROS	Parámetros Físicoquímicos														Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL	
	MES	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color aparente UPC	pH Unidades	Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli		% Aceptabilidad E. Coli
Enero	90	1,02	0,57	3,1	7,70	0	0,05	60,9	74,9	4,9	23,9	0,10	1,0	N.D	180	0	100	0	100	0,00	
Febrero	84	0,92	0,56	2,4	7,58	0	0,05	59,6	77,5	4,4	28,9	N.D	0,9	N.D	168	0	100	0	100	0,14	
Marzo	93	0,92	0,80	2,8	7,44	0	0,05	67,7	77,3	4,7	31,1	0,10	0,9	N.D	186	0	100	0	100	0,16	
Abril	87	0,90	1,06	7,2	7,18	0	0,10	42,1	78,0	3,5	39,9	N.D	1,0	N.D	174	0	100	0	100	0,27	
Mayo	93	0,85	0,95	6,1	7,24	0	0,09	48,8	72,2	3,2	32,4	N.D	0,9	N.D	188	0	100	0	100	0,00	
Junio	90	0,86	1,48	9,7	7,00	0	0,10	40,0	60,7	2,6	25,4	N.D	1,0	N.D	180	0	100	0	100	0,73	
PROMEDIO	90	0,91	0,87	5,2	7,36	0	0,07	51,5	73,4	3,9	30,3	N.D	0,9	N.D	179	0,0	100	0,0	100	0,22	
RES. 2115/07	90	0,93	0,80	4,2	6,5	0	0,07	50,0	70,0	3,5	25,0	0,3	1,0	0,1	180	0	100	0	100	0,5	
Convenciones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND No Detectable																				
Nota:	El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5 AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.																				

Elaboró: Leonor Chacon

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ
Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

3.3.3.2 Elaboración de las Probetas

Se fabricaron 25 probetas de concreto, para lo cual se usaron moldes plásticos cilíndricos prefabricados existentes en el mercado nacional, de 100 mm de diámetro y 200 mm de alto.

De estas 25 probetas, 3 se dejaron como testigos y a las 22 restantes se les realizó el ataque acelerado.

Un esquema de la preparación de las probetas se presenta en la figura 4.

Figura 4. Elaboración de las probetas



Fuente. Los Autores

La distribución de las probetas se hizo de acuerdo al tipo de prueba que se le realizó como se muestra en la tabla 10

Tabla 10. Distribución de las probetas de acuerdo al ensayo para el que se usan

	N° DE PROBETAS
CAMBIOS DE VOLUMEN	2
CAMBIOS DE MASA	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	2
RESISTENCIA A LA COMPRESION	18
TOTAL	22

Fuente. Los Autores

- **Preparación de la mezcla:**

Los materiales se pesaron previamente de acuerdo a los resultados del diseño de mezcla. Luego se agregaron los materiales finos, arena y cemento en una bandeja metálica. Se mezclaron bien y se dispusieron en forma de volcán para ubicar en su centro el agregado grueso y el agua, se incorporaron hasta obtener una mezcla uniforme como se muestra en las figuras 4(a) y 4(b).

- **Llenado de moldes:**

Previo al llenado de los moldes estos fueron impregnados con una fina capa de ACPM, para evitar que el concreto se adhiera y facilitar el desmolde.

Esta actividad se hizo en tres capas de espesor similar, agregando cada capa con una cuchara de llenado, y apisonando con una varilla metálica, la cual se introdujo dentro del material, con cuidado de no pasar a la capa anterior, 25 veces como lo indica la norma NTC 550^[24]. Ver figura 4(c).

Luego se procedió a golpear el costado del molde con un martillo de caucho, esto con el propósito de sacar el aire atrapado dentro de cada capa del concreto y obtener un concreto más compacto. Ver figura 4(d)

Por último, como se muestra en la figura 4(e), con la ayuda de un palustre se empareja la cara superior para obtener una superficie lisa.

- **Fraguado y Curado:**

Terminado el llenado de los moldes, se ubican las probetas en un lugar seguro y fresco y se dejan allí durante 24 horas, tiempo durante el cual se realiza el fraguado. Ver figura 4(f).

Transcurridas las 24 horas se procede a desmoldar, para lo cual se contó con la ayuda de un compresor Black & Decker de 2 caballos de fuerza, mecanismo que pudo ser utilizado gracias a las características del molde usado.

Después las probetas se ubicaron en un tanque para realizar su respectivo curado, realizado bajo condiciones estándar según lo indica la norma NTC 1377^[25] (28 días, 100% humedad y temperatura ambiente). Ver figura 4(g).

3.3.4 Ataque Acelerado

En esta fase se aplicó la metodología anteriormente indicada en el numeral 3.2, se determinaron el número de ciclos, la duración de la inmersión, del secado y el tiempo requerido para enfriar las probetas antes de entrar nuevamente a inmersión.

Se realizó además un monitoreo de la curva de enfriamiento usando un termómetro de contacto Fluke 54-II, con termo-cuplas tipo k, para controlar que no se presentaran fisuras adicionales debidas al cambio en la temperatura. En total se realizaron 120 ciclos distribuidos en dos ciclos diarios que consistían de: Mojado, Secado y Enfriamiento de las probetas.

A continuación se presentan detalles de estas actividades:

- **Mojado:**

En esta fase del ciclo las probetas se introducen en la solución de sulfato de sodio, y permanecen dentro de la misma por un periodo de 2 horas. Ver figura 5(a).

La inmersión para el primer ciclo del día iniciaba a las 6:35 am y terminaba a las 8:35 am, para el segundo ciclo la inmersión iniciaba a las 6:35 pm y terminaba a las 8:35 pm.

- **Secado:**

Al terminar el mojado las probetas se sacaban de la solución y se les realizaba un secado superficial con una toalla, para evitar que el exceso de humedad cayera en el interior del horno y causara daños al mismo. Luego se procedía a ubicar las probetas en el interior del horno, y este se graduaba en una temperatura de 105 ± 5 °C para un periodo de 9 horas. Ver figura 5(b).

El aumento de temperatura en el horno ocurría de manera gradual, iniciando en temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura indicada donde se mantenía hasta finalizar la etapa del ciclo.

Para el primer ciclo del día este proceso iniciaba a las 8:45 am y terminaba a las 5:45 pm y para el segundo ciclo iniciaba a las 8:45 pm y terminaba a las 5:45 am.

- **Enfriamiento:**

Una vez concluido el secado en horno se hacía necesario el enfriamiento de las probetas antes de volver a ser sumergidas en la solución; este enfriamiento se

realizó con la ayuda de ventiladores y teniendo en cuenta que el cambio en la temperatura no fuera abrupto, ya que podía causar fisuras en las probetas. Ver figura 5(c).

Figura 5. Esquema representativo de un ciclo de ataque acelerado



Fuente. Los Autores

El proceso de ataque acelerado se inicia una vez las probetas salen del curado estándar y se han realizados los ensayos para ciclo 0 (condiciones iniciales). Fue necesario monitorear constantemente el pH, lo que permitió determinar que se debía cambiar la solución cada 30 ciclos durante el proceso, para garantizar que no se presenten cambios considerables en la concentración de la solución.

Los 120 ciclos se realizaron de forma continua y homogénea para garantizar los resultados del ataque.

3.4 Realización de Pruebas a Nivel de Laboratorio

Se programó la realización de pruebas cada 15 ciclos, iniciando desde el ciclo cero (antes de iniciar el ataque) hasta el ciclo 120. Todas las pruebas se realizaron después de terminado un ciclo, es decir luego de concluir el enfriamiento.

Con el propósito de evaluar el avance del ataque se realizaron las siguientes pruebas: Cambios de Volumen, Cambios de Masa, Difracción de Rayos X, Resistencia a la Compresión y Velocidad de Pulso Ultrasónico.

3.4.1 Cambios de Volumen

Con el propósito de llevar una continuidad en la lectura de dimensiones de las probetas, se elaboró un círculo con divisiones cada 60° para marcar en estas los puntos donde se tomarían las lecturas a lo largo de toda la fase experimental (Ver figura 6). Se usaron para esta prueba dos probetas de concreto, a las cuales no se les hicieron pruebas adicionales a las de cambios de masa y volumen.

Para garantizar la confiabilidad de las medidas tomadas se usó un calibrador digital con una exactitud de una centésima de milímetro, marca UPM (United Precision Machine, Inc) y se tomaron 3 medidas de diámetro por cada cara y 6 de altura.

Figura 6. Registro dimensiones de las probetas



Fuente. Los Autores

3.4.2 Cambios de Masa

Para la prueba de cambios de masa se usaron las mismas probetas que para el ensayo anterior, ya que estas no iban a ser usadas para los ensayos de resistencia a la compresión ni en los ensayos de velocidad de pulso.

Se usó una balanza digital con una exactitud de un gramo y se tomaron tres lecturas para cada probeta. En la figura 7 se ilustra la prueba.

Figura 7. Registro masa de las probetas



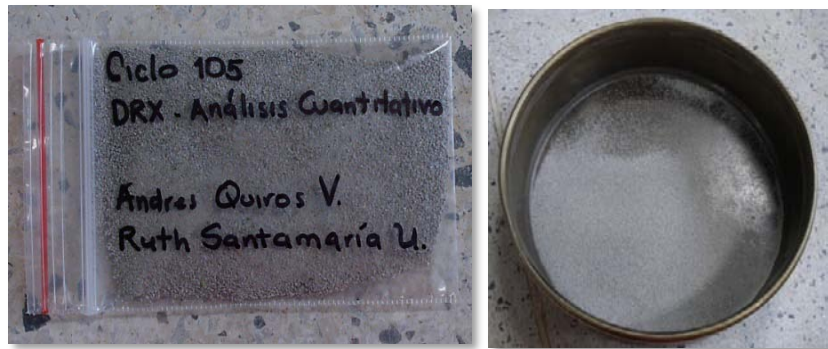
Fuente. Los Autores

3.4.3 Difracción de Rayos X

El ensayo de difracción de rayos X (DRX) fue realizado por el Laboratorio de Difracción de Rayos X, grupo de investigación en química estructural (GIQUE) de la Universidad Industrial de Santander. Esta prueba permite conocer las fases cristalinas presentes en el concreto a medida que avanza el ataque, siempre y cuando estén presentes en un porcentaje superior al 1%, sin embargo si la fase es muy cristalina como por ejemplo el cuarzo se puede detectar desde porcentajes del 0.2 %.

La muestra para dicha prueba se tomó de una de las probetas sometidas al ensayo de resistencia a la compresión. Se escogió una muestra representativa, se trituró e hizo pasar por un tamiz No 40, y se entregó al laboratorio una muestra del material que quedó en el fondo de aproximadamente 5 g, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Muestra para ensayo DRX



Fuente. Los Autores

3.4.4 Resistencia a la Compresión

Este ensayo se aplicó bajo la norma ASTM C39/C39M^[3] a dos probetas de concreto diferentes en cada sesión de pruebas, ya que es un ensayo destructivo.

Inicialmente se pulieron las superficies planas de las probetas para garantizar que sus caras estuvieran paralelas al momento de ser falladas, además se tomaron medidas del diámetro, para calcular el área de aplicación de carga.

Para la realización del ensayo se usó la maquina AMSLER (Alfred J. Amsler y Cia), la cual aplica una carga de compresión axial para determinar la máxima carga soportada por el espécimen. Una imagen de esta máquina y de las probetas usadas para este ensayo se muestran en la figura 9.

Figura 9. Probetas y máquina de ensayos AMSLER



Fuente. Los Autores

3.4.5 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Para realizar esta prueba se utilizó el equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA, con transductores de 54 kHz de frecuencia y se siguieron los lineamientos de la norma ASTM C597^[1].

Se destinaron dos probetas con el propósito de hacer estas mediciones durante todo el ataque y así registrar los cambios en la velocidad de pulso ultrasónico. Adicionalmente se le toman lecturas de VPU a las probetas que se sometieron al ensayo de resistencia a la compresión antes de ser falladas. Una imagen de las probetas y el equipo usado se muestra en la figura 10.

Figura 10. Probetas y equipo de ultrasonido



Fuente. Los Autores

Antes de someter las probetas al ensayo, fue necesario pulir la superficie de las caras donde se ubicaron los transductores, para lo cual se usó una piedra de desbaste (ver figura 11), teniendo en cuenta que las caras deben quedar perfectamente planas.

Figura 11. Preparación superficies de las probetas



Fuente. Los Autores

Para iniciar se conectan los transductores y se enciende el equipo. Se revisan en el menú inicial los parámetros de trabajo (SETUP) y los parámetros de TIEMPO, como se muestra en la tabla 11:

Tabla 11. Parámetros de funcionamiento del equipo

1	SETUP	PARAMETROS DE TRABAJO (SETUP)	
2	TIEMPO	Voltaje	500 V
3	LONGITUD	Unidades	Métricas
4	VELOCIDAD	Modo de Pulso	Continuo
5	MODULO DE ELASTICIDAD	Modo de Almacenamiento	Apagado
6	N/A	Pulso de referencia	10 s
7	BATERIA	TIEMPO	
8	CERO	Resolución	0.1 μ s
		Corrección	100%

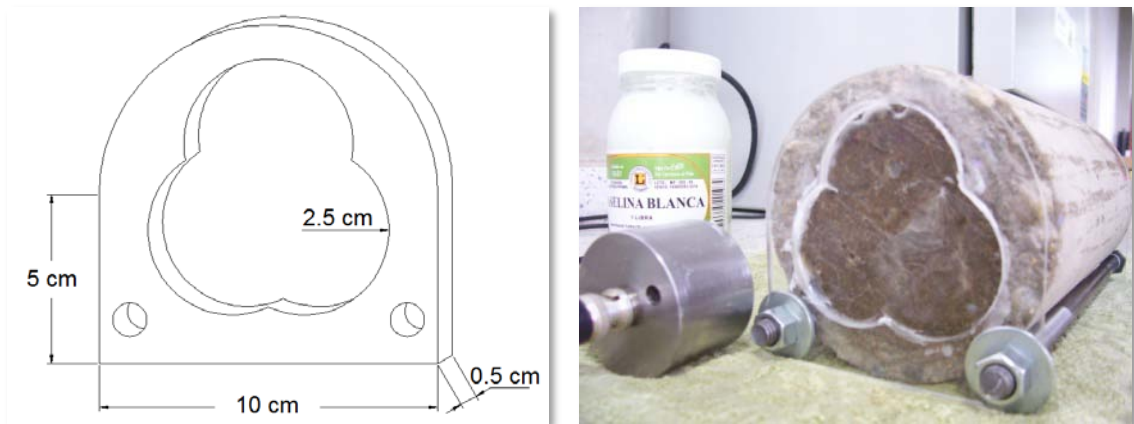
Fuente. Los Autores

Otro parámetro importante es el de la batería, ya que para obtener resultados confiables el equipo se debe usar con un nivel de batería superior a 9.2.

Antes de empezar a tomar datos, se debe dar el cero al equipo, para esto se aplica una delgada capa de acoplante (vaselina blanca) a los transductores y se ponen en contacto; se hace pasar un pulso usando la secuencia del menú 8 y luego 1 en el equipo, lo que nos deja el equipo en cero y listo para iniciar las lecturas.

Durante la medición de VPU se utiliza una guía fabricada en acrílico cuya función es sostener los transductores y ubicarlos uno en frente del otro, ya que se usó el modo de transmisión directo, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Plano e imagen de las guías usadas para la toma de datos de VPU



Fuente. Los Autores

Después de ubicar los transductores y aplicar la presión requerida para asegurar un buen acople entre transductor y probeta, se hacen pasar pulsos ultrasónicos hasta que la medida de tiempo se estabilice, este será el dato requerido, y se repite el procedimiento hasta tener todos los datos.

Se tomaron dos lecturas por cada uno de los tres puntos de prueba y se comprobó que el porcentaje de error entre lecturas no superara el 2%, para determinar su validez. Otro factor a tener en cuenta está relacionado con la necesidad de aplicar acoplante tanto al transductor como a la zona de la probeta donde se tomara la lectura antes de cada toma de datos.

3.5 Análisis de Resultados

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

3.6 Elaboración del Informe Final

Se presenta un informe detallado de la investigación que contiene tanto el marco teórico y metodología como los resultados, conclusiones y recomendaciones derivadas de la fase experimental y análisis de resultados.

4 ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales, el diseño de mezcla, la curva de enfriamiento y los demás ensayos aplicados como son cambios de masa y volumen, difracción de rayos x, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y registro visual del estado de las probetas. Adicionalmente se hace el análisis de estos resultados y se establecen algunas relaciones.

4.1 Caracterización de los materiales

En la tabla 12 se presentan las características principales de los agregados fino y grueso, obtenidos en la caracterización de los mismos.

Tabla 12. Características obtenidas para los agregados fino y grueso

	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Unitario Suelto	1,4	1,378
Peso Unitario Compacto	1,585	1,5
% de Absorción	1,347	1,255
% de Vacíos	40,076	42,551
Gravedad Específica Real	2,767	2,664
Gravedad Específica Aparente	2,577	2,578
Gravedad Específica Aparente SSS	2,645	2,611

Con el objetivo de conocer el módulo de finura del agregado fino usado para la mezcla, se realizó el análisis granulométrico como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis granulométrico del agregado fino

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4	12.8	1.28	1.28	98.72
8	24.8	2.48	3.76	96.24
16	78.0	7.80	11.56	88.44
30	223.2	22.32	33.88	66.12
50	354.8	35.48	69.36	30.64
100	197.7	19.77	89.13	10.87
FONDO	108.6	10.86	99.99	0.01
TOTAL	999.9	99.99	PESO MUESTRA	1000 gr

$$\text{Modulo de finura} = \frac{(\Sigma\% \text{ RETENIDO ACUMULADO} - \text{FONDO})}{100} = 2.09$$

4.2 Diseño de Mezcla

A partir de los resultados obtenidos anteriormente y del diseño de mezcla realizado se obtuvo la dosificación de la mezcla necesaria para fabricar 25 probetas de concreto con un volumen total de $V = 0.039275 \text{ m}^3$, la cual se presenta en la tabla 14.

Tabla 14. Dosificación de la mezcla

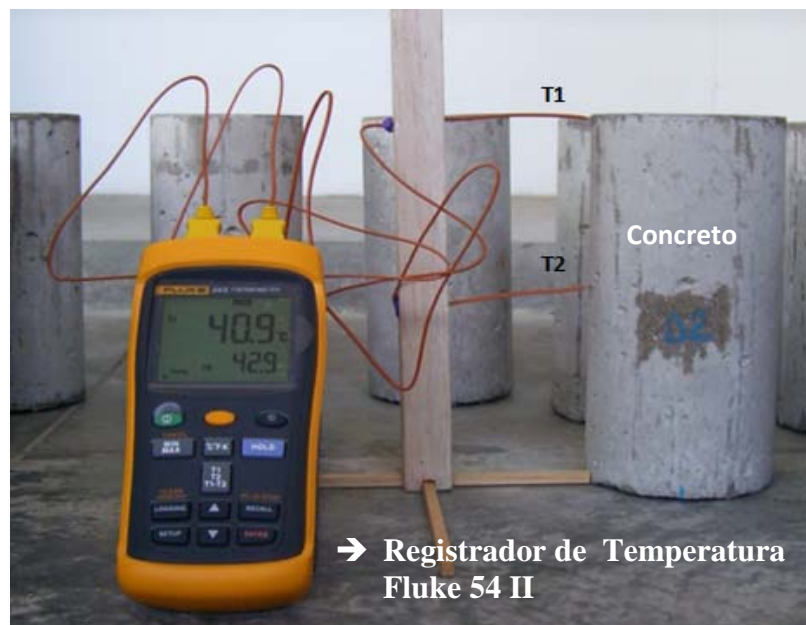
MATERIAL	RELACIÓN AGUA/CEMENTO = 0.5	
	EN PESO (kg)	EN PORCENTAJE (%)
CEMENTO	15.710	16.997
ARENA	28.213	30.524
GRAVA	40.650	43.980
AGUA	7.855	8.499

4.3 Determinación de la Curva de Enfriamiento

Como se mencionó en la metodología, un ciclo de ataque acelerado consta de inmersión, secado y enfriamiento de las probetas. Este último proceso inicia al apagar el horno, dejando las probetas en su interior durante dos minutos, seguidamente se abre la puerta del horno y se dejan por tres minutos más; transcurrido este tiempo se procede a sacar las probetas del horno y ubicarlas frente a los ventiladores, en este punto se inicia la determinación de la curva de enfriamiento. Este proceso toma alrededor de 45 minutos y se realizó con el propósito de controlar que no se generen daños adicionales al concreto por la variación en la temperatura.

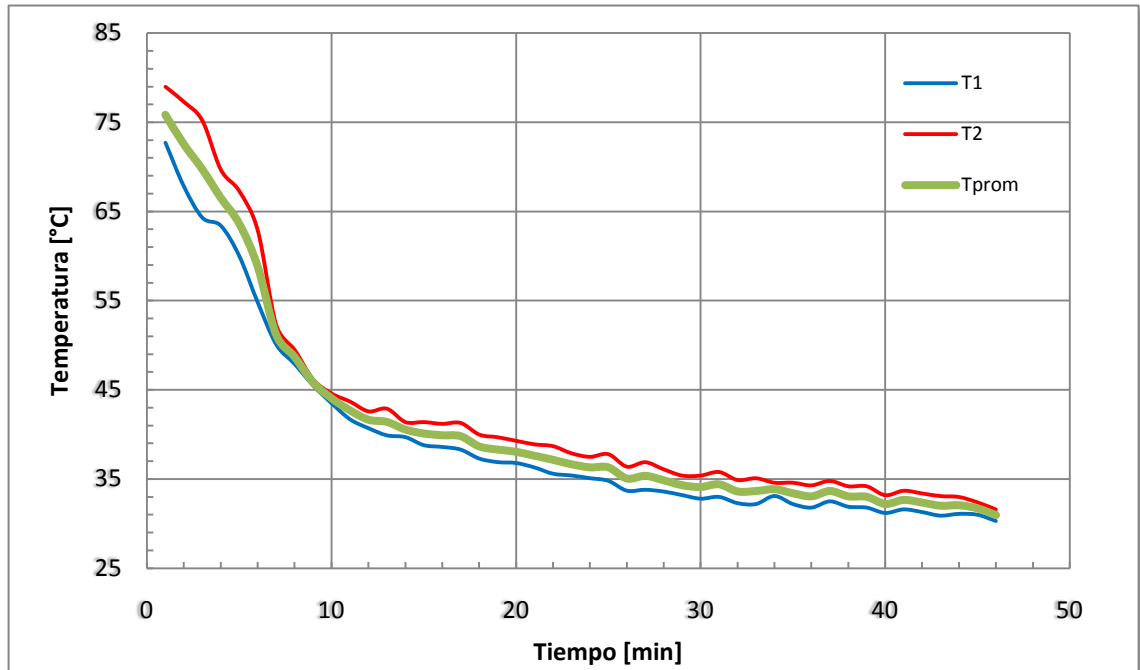
Se tomaron lecturas en dos puntos de la probeta simultáneamente, uno en la zona cercana a una de las caras (T1) y el otro de la zona media (T2). Una imagen del montaje realizado y el equipo usado se muestra en la figura 13.

Figura 13. Montaje para la determinación de la curva de enfriamiento de las muestras de concreto



Los resultados del seguimiento se presentan en la gráfica 1, donde se muestra que el mayor cambio en la temperatura se presenta en los primeros 10 minutos de enfriamiento mostrando un $\Delta T \approx 35^\circ\text{C}$ equivalente a una velocidad de enfriamiento de $v = 0.058^\circ\text{C/s}$. Esta condición no representa un valor alto ya que el concreto no sufre cambios de fase debido a la temperatura a valores de ésta inferiores a los 100°C ni a velocidades inferiores a los 0.167°C/s . [15][29]

Gráfica 1. Curva de enfriamiento



4.4 Ensayos Experimentales

En esta etapa se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de cambios de volumen, cambios de masa, difracción de rayos x, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, realizadas a lo largo del ataque.

4.4.1 Cambios de Volumen

Para la determinación de ésta característica se llevó el registro de alturas y diámetros de las dos probetas destinadas a este propósito durante toda la fase experimental, con ésta información se halló el porcentaje de expansión tanto de altura como de diámetro. Los valores obtenidos se muestran en las tablas 15 y 16 y las variaciones en expansión tanto en altura como en diámetro se presentan en la gráfica 2. Adicionalmente en la gráfica 3 se presentan las líneas de tendencia de éstas.

Tabla 15. Registro de alturas, altura promedio y % de expansión

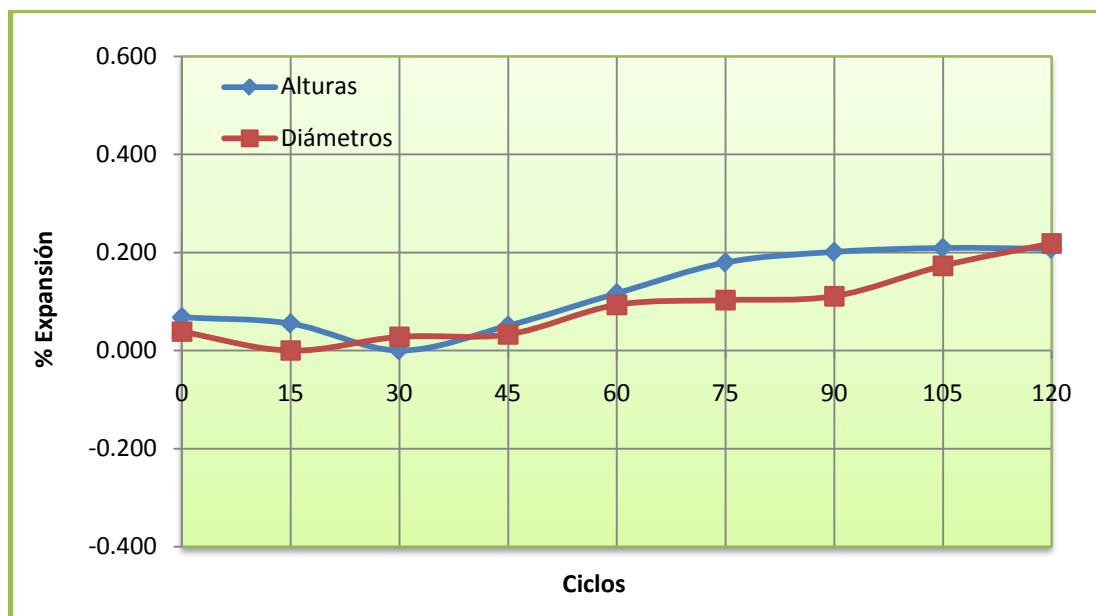
Ciclos	Alturas [mm]			
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio	% Expansión
0	208,587	207,782	208,184	0,068
15	208,577	207,738	208,158	0,055
30	208,452	207,635	208,043	0,000
45	208,553	207,743	208,148	0,050
60	208,687	207,885	208,286	0,117
75	208,783	208,050	208,417	0,179
90	208,845	208,078	208,462	0,201
105	208,923	208,033	208,478	0,209
120	208,850	208,100	208,475	0,207

De las gráficas 2 y 3 se puede observar que las expansiones se presentaron de manera uniforme tanto en la altura como en el diámetro, puesto que los valores obtenidos de estas son muy cercanos, lo que se ve reflejado en el valor de la pendiente de sus líneas de tendencia. Sin embargo cabe notar que se presentaron algunas expansiones localizadas que podrían representar una expansión mayor, como se muestra en la figura 14 del numeral 4.5.

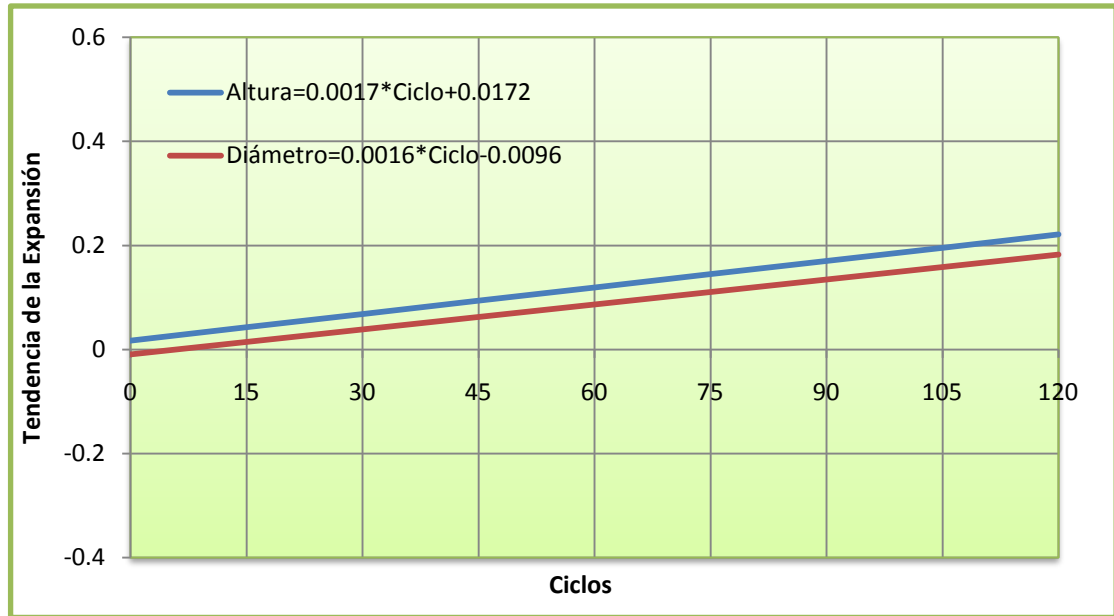
Tabla 16. Registro de diámetros, diámetro promedio y % de expansión

Ciclos	Diámetros [mm]			
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio	% Expansión
0	103,818	103,750	103,784	0,039
15	103,780	103,708	103,744	0,000
30	103,813	103,733	103,773	0,028
45	103,820	103,737	103,778	0,033
60	103,852	103,830	103,841	0,093
75	103,852	103,850	103,851	0,103
90	103,908	103,810	103,859	0,111
105	103,980	103,867	103,923	0,173
120	104,047	103,895	103,971	0,218

Gráfica 2. % de expansión de las probetas en altura y diámetro



Gráfica 3. Líneas de tendencia del % de expansión en altura y diámetro



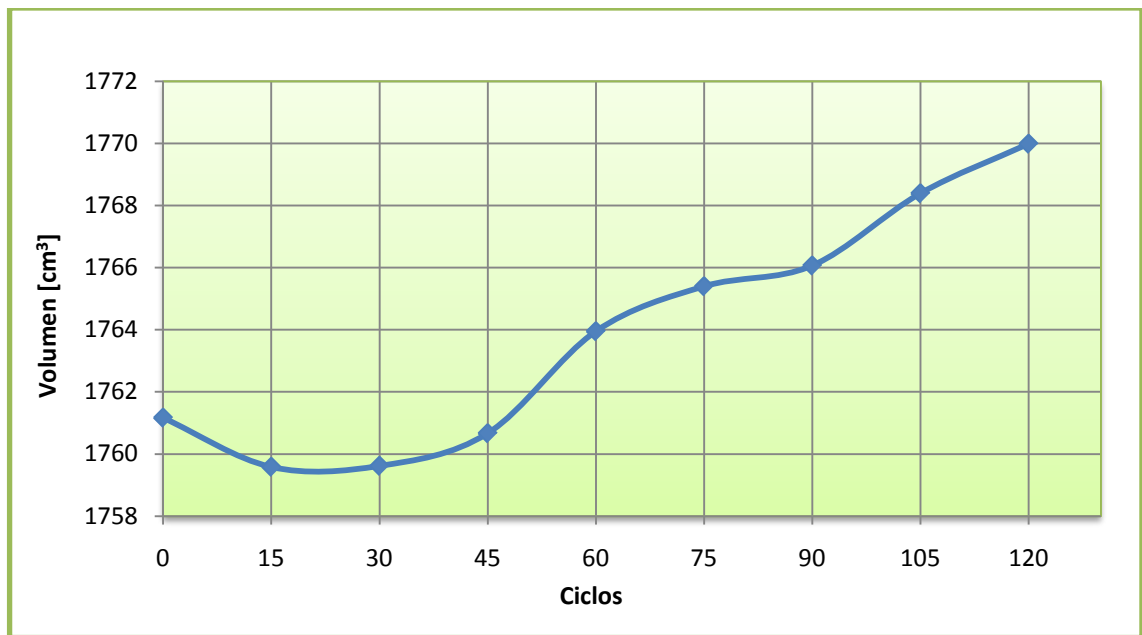
Con los diámetros y las alturas de cada probeta se determinó su volumen para cada una de las nueve sesiones de pruebas, como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Registro del volumen de cada probeta y promedio

Ciclos	Volumen [cm ³]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
0	1765,731	1756,602	1761,166
15	1764,343	1754,825	1759,584
30	1764,418	1754,798	1759,608
45	1765,505	1755,826	1760,666
60	1767,712	1760,187	1763,949
75	1768,531	1762,263	1765,397
90	1770,984	1761,145	1766,065
105	1774,093	1762,687	1768,390
120	1775,745	1764,214	1769,980

El comportamiento del volumen a lo largo del ataque observado en la gráfica 4 muestra que la tendencia de éste es a aumentar y que ésta se mantuvo de esta forma hasta la última sesión de pruebas, lo que es un indicativo de la presencia de productos expansivos, tales como la Etringita y el Yeso.

Gráfica 4. Comportamiento del volumen a lo largo del ataque



4.4.2 Cambios de Masa

De acuerdo con la bibliografía consultada los cambios en la masa se pueden presentar como producto de a) pérdida debida al ataque (descascamientos, fisuras) o b) aumento en la masa debido a la cristalización de sales, las cuales ocupan poros de las probetas. ^{[27][15]} En la tabla 18 se presenta el registro de los valores de masa obtenidos para las dos probetas destinadas a esta prueba y el promedio de masa de las mismas para cada una de las sesiones de pruebas (cada 15 ciclos).

Tabla 18. Registro de la masa de cada probeta y promedio

Ciclos	Masa [g]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
0	3991	3986	3988,5
15	3992	3984	3988
30	4056	4010	4033
45	4061	4012	4036,5
60	4081	4042	4061,5
75	4073	4029	4051
90	4069	4032	4050,5
105	4063	4035	4049
120	4056	4024	4040

En la gráfica 5 se muestra el promedio de masa a lo largo del ataque. Se observa en ésta gráfica un aumento en el valor promedio de la masa debido a la cristalización de sales (sulfato de sodio) en los poros de las probetas durante los primeros 60 ciclos, luego de esto la masa empieza a disminuir de forma continua como consecuencia de la pérdida de cohesión del material, presentándose descascaramientos.

Con el fin de suministrar más información para el análisis de esta prueba se realizó adicionalmente el pesaje de las probetas al salir de la inmersión y de nuevo al salir del horno, con el fin de conocer las variaciones en la capacidad de absorción del material. Este proceso se hizo cada 5 ciclos a lo largo de todo el ataque. Los resultados se presentan en la tabla 19.

Gráfica 5. Comportamiento de la masa a lo largo del ataque

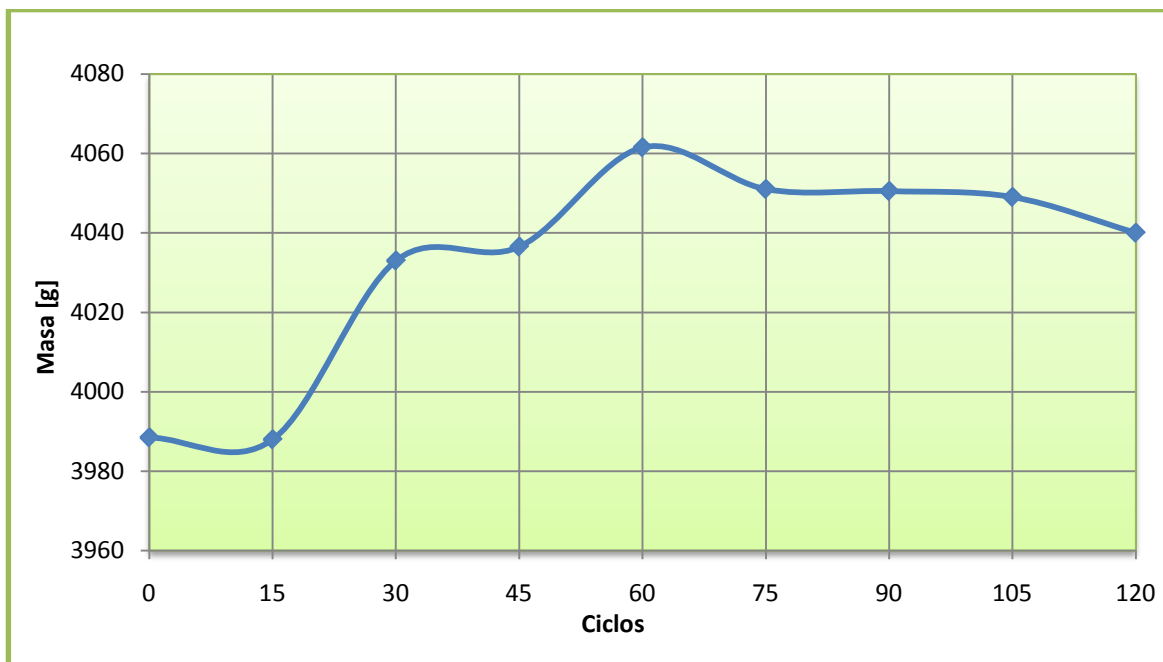
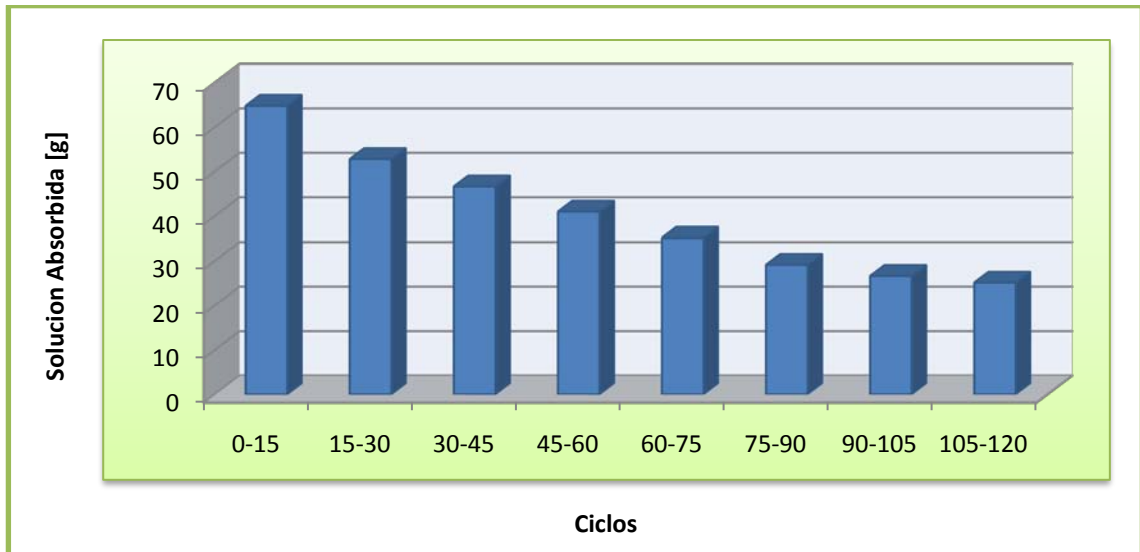


Tabla 19. Promedio en gramos de solución absorbida cada 15 ciclos

Intervalo (ciclos)	S/n absorbida [g]
0-15	64,833
15-30	52,833
30-45	46,667
45-60	41,000
60-75	35,167
75-90	29,167
90-105	26,667
105-120	25,167

En la gráfica 6 se ilustra los cambios de absorción en el concreto a medida que avanza el ataque.

Gráfica 6. Gramos de solución absorbida por el concreto durante el ataque



En la gráfica anterior se observa una disminución notoria de la capacidad de absorción durante los primeros 60 ciclos aproximadamente, lo que sugiere que hubo cristalización de sales de sulfato de sodio, disminuyendo así el espacio disponible para alojar solución y produciendo por ende un aumento en la masa, como se observó en la gráfica 5. Después se observa una tendencia a estabilizar la cantidad de solución absorbida, lo que indica que se están creando nuevos espacios para almacenar solución debido a la aparición de grietas al tiempo que la cristalización de sales continúa.

4.4.3 Difracción de Rayos X

El ensayo de difracción de rayos x permite ver las fases cristalinas presentes en la muestra de concreto estudiada en cada una de las sesiones de prueba. En la tabla 20 se muestran en color las fases cristalinas presentes en cada una de las muestras analizadas y se especifica su procedencia.

Tabla 20. Presencia de fases cristalinas durante el ataque

PROCEDENCIA	FASE CRISTALINA	NOMBRE	Ciclos								
			0	15	30	45	60	75	90	105	120
Agregados y/o Cemento	$\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8)$	Albita									
	$(\text{Na, Ca}) \text{ Al (Si, Al)}_3 \text{ O}_8$	Albita cálcica									
	Ca CO_3	Calcita									
	$\text{Al}_2 \text{ Si}_2 \text{ O}_5 (\text{OH})_4$	Caolinita									
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{OH})_8$	Clinocloro									
	Si O_2	Cuarzo									
	$\text{Ca}_2 \text{ Si O}_4$	Larnita									
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita									
	Ti O_2	Rutilo									
Hidratación del Cemento	Ca (OH)_2	Portlandita									
	$\text{Ca}_4 (\text{Si}_6 \text{ O}_{15}) (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_5$	Tobermorita									
Ataque acelerado	$\text{Ca}_{1,31} \text{Na}_{4,32} (\text{OH})_{,94} (\text{SO}_4)_3$	Cesanita									
	$\text{Ca}_6 \text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12} (\text{H}_2\text{O})_{26}$	Etringita									
	$\text{Ca}_3 \text{Al}_2 (\text{O}_4 \text{H}_4)_3$	Katoita									
	$\text{Na}_2 \text{SO}_4$	Tenardita									
	$\text{Ca (SO}_4) (\text{H}_2\text{O})_2$	Yeso									

Fuente. Laboratorio de difracción de rayos x. Universidad Industrial de Santander

Como se muestra en la tabla anterior, los resultados de difracción de rayos x registran la presencia de fases cristalinas procedentes tanto de los materiales usados en la fabricación de concreto y las de hidratación del cemento, como de las producidas como resultado de las reacciones entre el sulfato del sodio y los componentes del concreto.

Los productos de hidratación del cemento presentados en el informe corresponden a los esperados de acuerdo a la bibliografía citada en el marco teórico.^[28] Es importante aclarar que las fases cristalinas Etringita y Yeso se presentan tanto en la hidratación del cemento como producto del ataque.^[27]

Como resultado de las reacciones entre el sulfato de sodio y algunos componentes de concreto se generaron fases cristalinas como la cesanita, la etringita, la katoita y el yeso. En la mayoría de las muestras se aprecia la

presencia de etringita, esta fase en gran medida es la responsable de las expansiones en el concreto.

En cuanto a la katoita (producto de hidratación del concreto a altas temperaturas) se presenta en todas las muestras sometidas al ataque, debido a que requirió de la temperatura de secado (105 °C) para su formación.

Finalmente se reportó la presencia de cesanita, cuya compleja fórmula ($\text{Ca}_{1.31} \text{Na}_{4.32} (\text{OH})_{.94} (\text{SO}_4)_3$) sugiere la presencia tanto yeso (CaSO_4) como de hidróxido de sodio (NaOH), fases generadas a partir de reacciones de expansión en el concreto^[27].

La presencia de tenardita (sulfato de sodio) a partir del momento en que se inicia el ataque confirma el hecho de que no todo el sulfato reacciona para generar otras fases, sino que parte de él se cristaliza y acumula en los poros generando cambio en las propiedades del concreto como se había mencionado anteriormente.

En el anexo C se presenta el perfil de difracción tanto de la muestra sin ataque como de una atacada (75 ciclos de ataque), además la superposición de los perfiles de difracción de todas las muestras sometidas a ataque.

4.4.4 Resistencia a la Compresión

Se usaron en total 18 probetas, distribuidas en 2 probetas falladas por cada sesión de pruebas. El cálculo del valor de resistencia máxima a la compresión f'_c se hace mediante la ecuación 2^[3], donde P es la fuerza máxima soportada por el espécimen leída en la prueba y A es el área de la sección transversal del mismo.

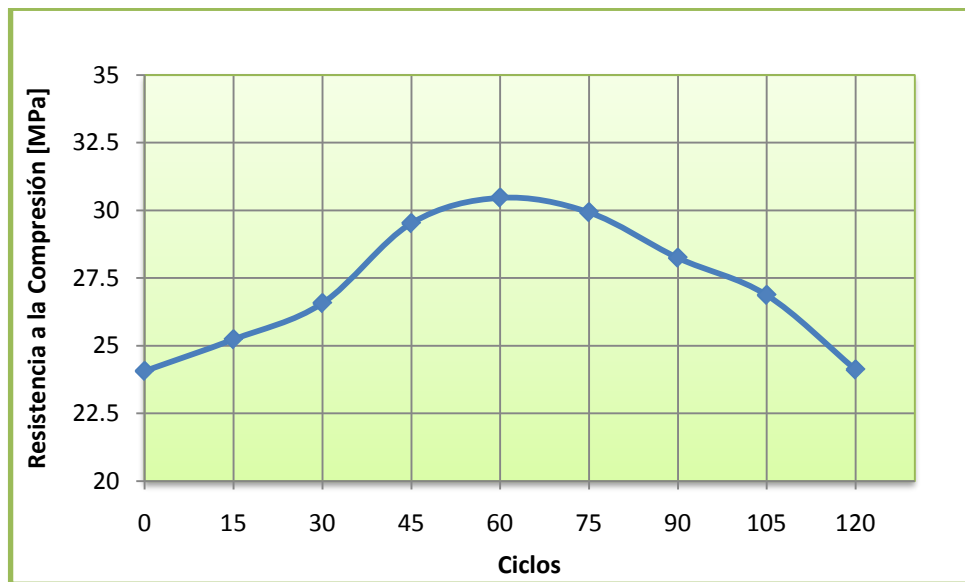
$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Los resultados de éste cálculo para cada probeta y el promedio de ellas, se presentan en la tabla 21. El comportamiento de la resistencia promedio a lo largo del ataque se muestra en la gráfica 7.

Tabla 21. Registro de la resistencia de cada probeta y promedio

Ciclos	Resistencia a la Compresión [MPa]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
0	23,276	24,650	23,963
15	24,704	25,549	25,127
30	26,227	26,689	26,458
45	28,987	29,808	29,397
60	30,689	29,981	30,335
75	28,921	30,682	29,801
90	27,761	28,492	28,126
105	26,374	27,138	26,756
120	23,669	24,358	24,014

Gráfica 7. Cambios en la resistencia a la compresión a lo largo del ataque



En la gráfica anterior se observa que ocurre un aumento en la resistencia durante la primera mitad del ataque, esto es producto de la cristalización del sulfato de sodio en los poros de las probetas, ya que disminuye su porosidad, lo que genera aumento en su resistencia, además del hecho que el concreto gana resistencia a lo largo de toda su vida. Después de esta primera fase la resistencia empieza a disminuir lo que sugiere la presencia de productos expansivos que generan grietas que debilitan la pieza de concreto, y a la formación de yeso que produce pérdida en la cohesión.

4.4.5 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Para este ensayo se usaron dos probetas a lo largo de la fase experimental, a las que se les tomaron lecturas de tiempo de vuelo; con este valor y la altura de las probetas se determinó la velocidad de pulso ultrasónico para cada una de ellas usando la ecuación 1, presentada en la metodología.

En la tabla 22 se presenta el registro de las velocidades obtenidas para cada probeta en cada una de las sesiones de pruebas, y el promedio de ellas.

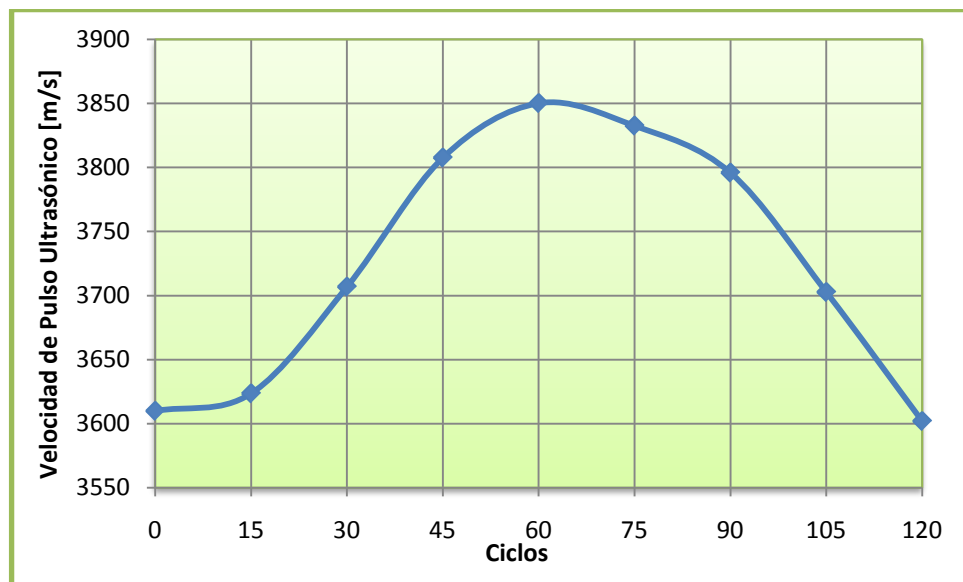
Tabla 22. Registro de la VPU de cada probeta y promedio

Ciclos	Velocidad de Pulso Ultrasónico [m/s]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
0	3569,598	3650,176	3609,887
15	3583,011	3664,099	3623,555
30	3695,835	3717,721	3706,778
45	3797,127	3817,926	3807,527
60	3839,388	3860,797	3850,093
75	3820,412	3844,561	3832,486
90	3787,447	3804,222	3795,835
105	3673,708	3731,566	3702,637
120	3533,438	3670,454	3601,946

En la gráfica 8 se muestra el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico promedio a lo largo del ataque. En ésta gráfica se observa que la técnica es sensible a las variaciones sufridas por el material como producto del ataque; muestra un comportamiento similar al mostrado en la gráfica 8, de resistencia a la compresión.

El aumento en la velocidad en la primera parte del ataque se debe a la cristalización de sales en los poros, esto permite que el pulso pase a través de la pieza en un tiempo menor lo que implica una velocidad mayor. Aunque éste fenómeno no deja de ocurrir a lo largo de todo el ataque, en la segunda mitad del mismo se observa de acuerdo a los resultados obtenidos, que priman los efectos de la formación de productos expansivos y de yeso, ya que se produce un aumento en el tiempo de vuelo del pulso a través de la probeta. Estos productos generan grietas y disminución en la densidad debida a la pérdida de cohesión.

Gráfica 8. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico a lo largo del ataque



4.5 Registro visual del estado de las probetas

En ésta etapa se presenta un registro visual de los cambios ocurridos a las probetas como producto del ataque. Los principales cambios observados fueron cambios de color de la muestra, presencia de Expansiones, Fisuraciones y Descacaramientos.

- Expansiones:

Es importante notar que se presentaron expansiones localizadas como la observada en la figura 14, esto sugiere que la formación de productos expansivos no se desarrolla de manera uniforme dentro de los especímenes sino que puede presentarse afectando en mayor grado un sector.

Figura 14. Fotografía comparativa de muestras con y sin ataque. Presencia de expansión localizada (ciclo 105)



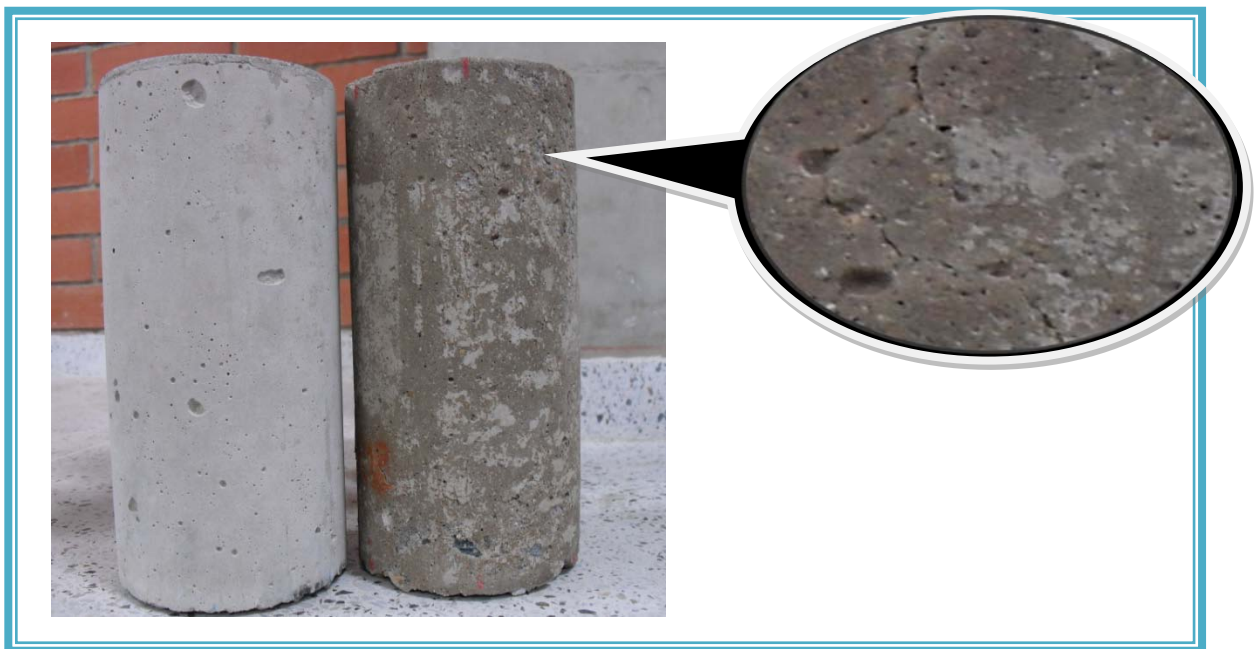
Fuente. Los Autores

- Fisuras:

Se pudo observar la aparición de grietas en las probetas después de transcurrida aproximadamente la primera mitad del ataque, éstas son consecuencia de la formación de productos expansivos como resultado de la reacción entre los componentes de la pasta y el sulfato de sodio usado en el ataque acelerado.

Estos productos expansivos como lo es la Etringita generan tensiones internas que al superar el esfuerzo máximo soportado por el material generan fisuras, como la mostrada en la figura 15.

Figura 15. Fotografía comparativa de muestras con y sin ataque. Presencia de fisuras (ciclo 90)



Fuente. Los Autores

- Descascaramientos:

Los descascaramientos como el observado en la figura 16 se presentan como producto de la pérdida de cohesión en el material. Esta pérdida de material se origina principalmente por la formación de yeso, lo que genera la disminución del poder aglomerante de la pasta, facilitando el desprendimiento de material componente de la probeta.

Figura 16. Descascaramiento (ciclo 105)



Fuente. Los Autores

4.6 Correlación entre la Resistencia a la Compresión y la Velocidad de Pulso Ultrasónico

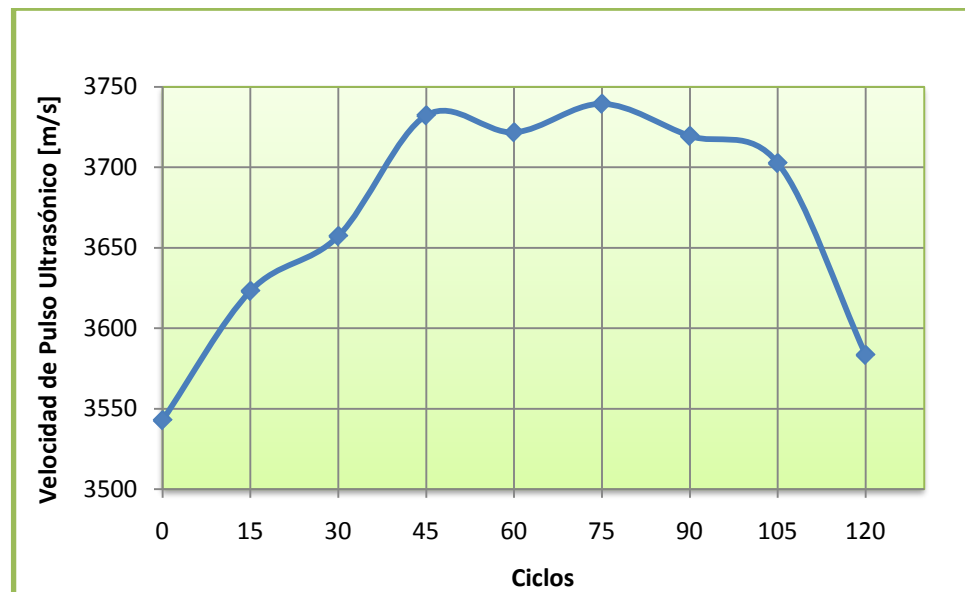
El valor de la velocidad de pulso ultrasónico usado para hallar la correlación se determinó de las probetas a las cuales se les realizó la prueba de resistencia a la compresión. En la tabla 23 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 23. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de las probetas de resistencia a la compresión antes de ser falladas

Ciclos	Velocidad de Pulso Ultrasónico [m/s]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
0	3547,669	3538,160	3542,915
15	3626,168	3620,102	3623,135
30	3658,786	3655,759	3657,273
45	3749,423	3715,043	3732,233
60	3706,846	3736,578	3721,712
75	3708,435	3770,393	3739,414
90	3721,414	3717,481	3719,448
105	3697,914	3707,262	3702,588
120	3541,272	3625,596	3583,434

En la gráfica 9 se presenta el comportamiento de la velocidad de pulso obtenido de las probetas usadas en la prueba destructiva de resistencia a la compresión.

Gráfica 9. Desarrollo de la velocidad de pulso ultrasónico para probetas destinadas a la prueba de resistencia a la compresión durante el ataque



La gráfica anterior muestra el comportamiento seguido por las diferentes probetas usadas para cada día de pruebas, el cual es muy similar al presentado en la gráfica 8 para las probetas a las que se les hizo seguimiento a lo largo de todo el ataque.

En la tabla 24 se presentan los valores promedios de resistencia y velocidad empleados para hallar la correlación de los mismos, ésta se realizó usando el programa estadístico StatGraphics.

Tabla 24. Registro de VPU promedio y resistencia promedio

Ciclos	Velocidad _{prom}	Resistencia _{prom}
0	3542,915	23,963
15	3623,135	25,127
30	3657,273	26,458
45	3732,233	29,397
60	3721,712	30,335
75	3739,414	29,801
90	3719,448	28,126
105	3702,588	26,756
120	3583,434	24,014

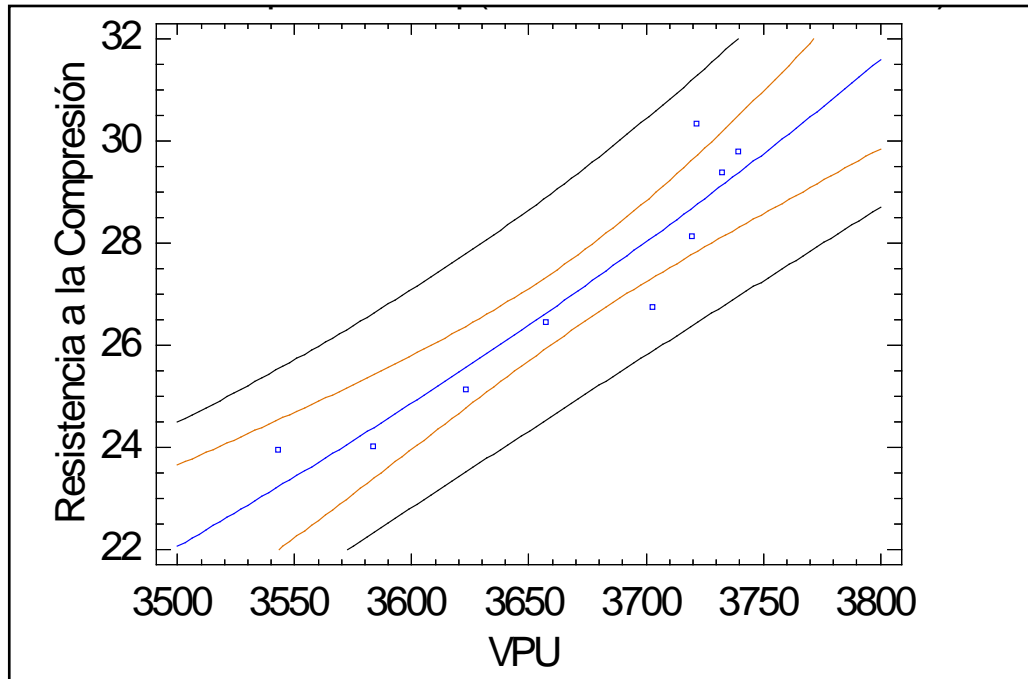
Con esta información se gráfica la resistencia a la compresión vs la velocidad de pulso ultrasónico como se muestra en la gráfica 10 y se halla un coeficiente de correlación igual a 0.9413 con $R^2 = 88.61 \%$ y R^2 (ajustado para g.l) = 86.98 % para un modelo exponencial.

Para estimar la resistencia a la compresión de un concreto con las características usadas en esta investigación y bajo un ataque acelerado con sulfato de sodio con base en la velocidad de pulso ultrasónico se puede usar la expresión 1

$$f'_c = e^{-1.0878 + 0.0012 VPU}$$

Expresión 1

Gráfica 10. Modelo ajustado que correlaciona la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico



Las líneas de color naranja muestran el intervalo de confianza y las líneas de color negro representan el intervalo de predicción.

4.7 Correlación entre la densidad (masa/volumen) del concreto y la Velocidad de Pulso Ultrasónico

Con el propósito de verificar la relación existente entre la velocidad de pulso ultrasónico y la densidad del concreto, se tomaron datos de masa, altura y diámetros de las probetas destinadas a pruebas de velocidad de pulso. Después de procesar los datos se obtuvieron los valores de densidad para los diferentes ciclos,

estos resultados junto con los de velocidad de pulso ultrasónico son mostrados en la tabla 25.

La gráfica 11 presenta la correlación determinada mediante el software estadístico StatGraphics entre los datos obtenidos de densidad y velocidad de pulso ultrasónico, donde se obtiene un valor de correlación de 0.8515 con un valor de $R^2 = 72.51\%$ y R^2 (ajustado para g.l) = 68.58, lo cual confirma la sensibilidad de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico a los cambios de densidad generados a lo largo del ataque.

Del análisis anterior se obtiene la expresión 3 para relacionar la velocidad de pulso ultrasónico con la densidad así:

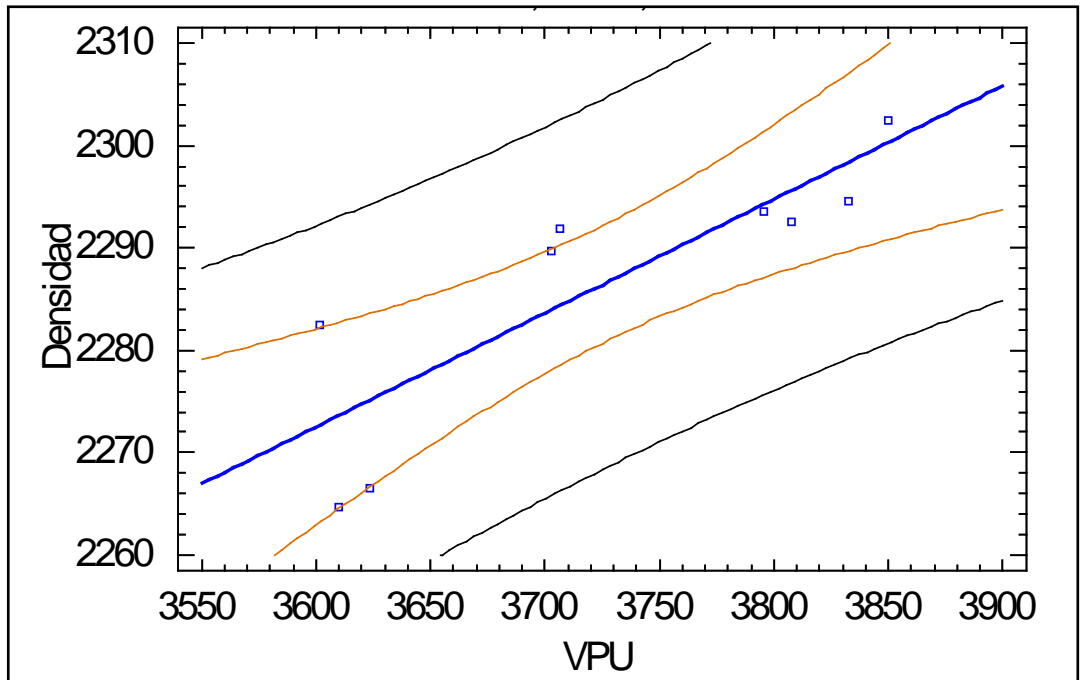
$$\rho = 0.111261 VPU + 1871.98$$

Expresión 2

Tabla 25. Registro de la densidad promedio y VPU promedio

Ciclo	Densidad [kg/m ³]	Velocidad [m/s]
0	2264,704	3609,887
15	2266,455	3623,555
30	2291,969	3706,778
45	2292,578	3807,527
60	2302,490	3850,093
75	2294,653	3832,486
90	2293,506	3795,835
105	2289,652	3702,637
120	2282,507	3601,946

Gráfica 11. Modelo ajustado que correlaciona la densidad con la velocidad de pulso ultrasónico



5 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de aplicar un ataque acelerado con sulfato de sodio a especímenes de concreto con relación agua cemento de 0.5 y tamaño máximo de agregado grueso de $\frac{3}{4}$ " se puede concluir que:

Se evaluaron los cambios sufridos por el concreto debidos al ataque acelerado por sulfatos, por medio de ensayos de resistencia a la compresión, difracción de rayos x, cambios de masa y cambios de volumen realizados a lo largo de todo el experimento. Estos ensayos permitieron determinar la presencia de sales cristalizadas en los poros, y esto produce aumento en la resistencia a la compresión y en la masa. Esto mismo se confirma mediante los resultados de difracción de rayos x, los cuales registran la presencia de tenardita (sulfato de sodio) durante todo el ataque.

Otra característica típica de un concreto atacado por sulfatos, que concuerda con lo reportado en la bibliografía, es la formación de productos expansivos como la Etringita y el Yeso. La presencia de estos productos expansivos se evidencia por la detección de etringita en casi todos los ciclos como se aprecia en los resultados de difracción de rayos x. La disminución en la resistencia a la compresión y en la masa además de la pérdida de cohesión y la presencia de fisuras permiten comprobar la presencia de estos productos.

Se evaluaron los cambios en la velocidad de pulso ultrasónico a lo largo de toda la fase experimental sobre las probetas de concreto. La VPU mostró ser sensible a los cambios ocurridos en el concreto debido al ataque, y presentó un comportamiento muy similar al mostrado por las pruebas de resistencia a la compresión y cambios de masa y también concuerda con los perfiles de difracción de rayos x obtenidos.

Se relacionó la velocidad de pulso ultrasónico con la resistencia a la compresión del concreto bajo un ataque acelerado de sulfatos, mediante un modelo exponencial dado por la expresión $f'_c = e^{-1.0878 + 0.0012 VPU}$ con un valor de $R^2=88.61$ por ciento. De igual manera se relacionó la velocidad de pulso con la densidad (masa/volumen), mediante un modelo lineal dado por la expresión $\rho = 0.111261 VPU + 1871.98$ con un valor de $R^2=72.51$ por ciento.

De los resultados obtenidos de esta investigación se concluye que la velocidad de pulso ultrasónico es una técnica apropiada para estimar la resistencia a la compresión de concreto sometido a ataque por sulfatos.

6 RECOMENDACIONES

A partir de la investigación realizada se recomienda continuar con el estudio de la velocidad de pulso ultrasónico en concretos atacados por sulfatos variando las condiciones de curado y/o ampliando los tiempos de ataque acelerado con el fin de estimar el grado de daño a través de ésta técnica no destructiva.

Cambiar el tipo de cemento utilizado por un cemento resistente a sulfatos, con el fin de estimar el comportamiento de la velocidad en concretos diseñados para soportar ataques de este tipo.

Usar sulfato de magnesio en vez de sulfato de sodio, ya que éste origina además de los daños ya estudiados en este trabajo una disminución en el pH del concreto, exponiendo al refuerzo del mismo a deterioros, en el caso de que este lo contenga. Los resultados de este nuevo estudio permitirían efectuar comparaciones entre los efectos causados en el concreto por los diferentes tipos de sulfatos y la variación de la VPU causada por estos.

Estudiar el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico al realizar variaciones en los factores asociados al concreto tales como: la relación agua cemento, el tamaño máximo del agregado grueso, modulo de finura del agregado fino y uso de aditivos y adiciones.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C597 (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Significance and Use.
- [2] _____. ASTM C1157 (2009). Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.
- [3] _____. ASTM C39/C39M (2009). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [4] _____. ASTM C597 (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Significance and Use.
- [5] BARBOSA DE SOUSA, RUI. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado. Tesis de maestría en ingeniería. Universidad politécnica de Sao Pablo. 2006. 131p.
- [6] BUITRAGO MEDRANO, Carlos A. Y ORTIZ RUBIO, Douglas. Metodología para evaluar la susceptibilidad del concreto expuesto a soluciones de sulfatos. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. 2002. 173p.
- [7] ESTRADA, M. ALONSO, E. et al. Hidratación del cemento portland, fase etringita; monosulfatos y trisulfatos. EN. 1° foro académico de la DES de ingenierías y arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. (30 de noviembre a 2 de diciembre de 2005. Morelia, Michoacán, México). p. 231-239.
- [8] FLORES GUTIERREZ, Jesús. Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico. Tesis de maestría en ciencias. Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional. 2006. 120p.

- [9] GIRALDO M, Manuel Alejandro. TOBON Jorge Iván. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. En: DYNA. Marzo, 2006, vol. 73 N°148, p. 70-71.
- [10] GOMA, F. El cemento portland y otros aglomerantes. Editores técnicos asociados, S.A. Barcelona. 1979. 232p. ISBN 84-7146-192-7.
- [11] GUIDEBOOK ON NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURES. IAEA, Vienna, 2002. p. 100, 106-107 ISSN 1018–5518.
- [12] GUTIERREZ de LOPEZ, Libia. Concreto y otros Materiales para la Construcción. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Segunda edición. 2003. p. 46
- [13] INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO. Revista construcción y tecnología. Disponible en: <www.imcyc.com/revistacyt/abr10/posibilidad.htm>. Visitado en septiembre de 2010.
- [14] KUMAR MEHTA, P. Y MONTEIRO, Paulo J. Concrete. Microstructure, Properties and Materials. University of California at Berkeley. Third Edition. Mc Graw Hill. 2006. p. 3-8, 11-12, 27, 159, 207, 405
- [15] NEWMAN, John. Y SENG CHOO, Ban. Advanced Concrete Technology. Testing and Quality. Elsevier. 2003 p. 113, 116, 123
- [16] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 174 (1994). Concretos. Especificaciones para los agregados para concreto.
- [17] _____. NTC 3459 (2001). Concretos. Agua para la elaboración de concreto.
- [18] _____. NTC 5551 (2007). Durabilidad de estructuras de concreto. Clasificación de la agresividad química. Norma Técnica Colombiana.

- [19] _____. NTC 121 (1995). Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas.
- [20] _____. NTC 321 (1995). Cemento Portland. Especificaciones Químicas.
- [21] _____. NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado.
- [22] _____. NTC 176 (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso.
- [23] _____. NTC 237 (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción de agregados finos.
- [24] _____. NTC 550 (2003). Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra.
- [25] _____. NTC 1377 (1994). Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio.
- [26] SANJUAN BARBUDO, Miguel Angel, CASTRO BORGES, Pedro, "Problemas, Causas y Soluciones. Cemento y concreto resistentes a sulfatos", Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 2001
- [27] SEGARRA FORADADA, Judit. Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón. Universidad Politécnica de Catalunya. Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3315>> Visitado en septiembre de 2010.
- [28] SKALNY, Jan, MARCHAND, Jacques Y ODLER, Ivan. Sulfate Attack on Concrete. Spon Press. 2002. p. 22
- [29] VERKEHRSBLATT-SAMMLUNG Nr. S1056: ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, Stand 12/2007

ANEXOS

ANEXO A. Metodología y cálculo de diseño de mezcla

Con esta metodología se busca determinar la dosificación de los materiales, en función de la resistencia mecánica deseada, la trabajabilidad y durabilidad.

I. Selección del Asentamiento

El asentamiento del concreto es una característica que se relaciona con la cantidad de agua presente en la mezcla. A más alto valor de asentamiento más fluidez (consistencia y plasticidad) tendrá la mezcla. En la tabla 1 se presentan valores de asentamientos recomendados para diversos tipos de estructuras y sistemas de colocación.

Tabla 1. Asentamientos

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.

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, se determinó usar un asentamiento para consistencia media, con valores de asentamiento de 5.0 a 10 cm.

II. Selección del tamaño de agregado

La selección del tamaño máximo de agregado, se hace teniendo en cuenta las dimensiones del miembro de concreto a fundir, así, el tamaño máximo de agregado no debe sobre pasar $\frac{1}{5}$ de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.



Fuente. Los Autores

Con una dimensión mínima de 100 mm, se determinó el tamaño máximo de agregado a usar igual a $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm)

III. Estimación del contenido de agua

El contenido de agua está relacionado con el asentamiento, el tamaño máximo del agregado, la forma de las partículas y la gradación de los agregados.

Tabla 2. Contenido de agua

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	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

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

Teniendo en cuenta que el asentamiento para nuestro diseño de mezcla se encontraba entre 5 y 10 cm y que el tamaño máximo de agregado seleccionado es 19.05 mm, se halla en la tabla 2 el contenido de agua igual a 200.

IV. Cálculo del contenido de Cemento

Para calcular la cantidad de cemento por unidad de volumen requerida para la mezcla, se debe conocer el contenido de agua y la relación agua/cemento con la que se va a diseñar. Para este cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$C = \frac{A}{A/C}$$

Para el caso de nuestro diseño, el contenido de cemento es $C = \frac{200}{0.5} = 400 \text{ kg}$ para un metro cúbico de concreto.

V. Estimación del contenido de agregado grueso

Para estimar el contenido de agregado grueso que requiere la mezcla, se debe tener en cuenta el tamaño máximo del agregado y el modulo de finura del agregado fino.

Tabla 3. Relación b/b_0 Volumen seco y compacto de agregado grueso por volumen unitario de concreto

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

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

El contenido de agregado grueso se calcula usando la siguiente ecuación:

$$b = \left(\frac{b}{b_0} \right) \times b_0$$

donde:

b: Volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto

b/b_0 : Volumen seco y compacto de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

b_0 : Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

El modulo de finura del agregado fino caracterizado para este diseño de mezcla es de 2.1 y el tamaño máximo del agregado grueso de 19.05 mm, usando la tabla 3 e interpolando los valores para el modulo de finura nuestro, se halla la relación b/b_0 igual a 0.69 y b_0 igual a 1500

Con los datos anteriores se puede estimar el contenido de agregado grueso $b = (0.69) \times 1500 = 1035 \text{ kg}$ para un metro cubico de concreto.

VI. Estimación del contenido de agregado fino

El cálculo del contenido de agregado fino se hace restando al volumen total ($1\text{m}^3 = 1000 \text{ L}$) la sumatoria de los volúmenes de los demás materiales presentes en la mezcla, así:

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

donde:

V_{af} : Volumen de agregado fino

V_a : Volumen de agua

V_c : Volumen de cemento

V_{ag} : Volumen de agregado grueso

Cada uno de estos volúmenes es calculado a partir de los pesos hallados en los pasos anteriores y dividido por su respectiva densidad.

Así para nuestro diseño los volúmenes se calculan como sigue:

$$V_a = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{Densidad del agua}} = 200 \text{ L}$$

$$V_c = \frac{\text{Contenido de cemento}}{\text{Densidad del cemento}} = 132.013 \text{ L}$$

$$V_{ag} = \frac{\text{Contenido de agregado grueso}}{\text{Densidad aparente SSS}} = 396.4 \text{ L}$$

$$\rightarrow V_{af} = 1000 - (200 + 132.013 + 396.4) = 271.587 \text{ L}$$

Con el valor del volumen de agregado fino y su densidad aparente SSS, hallamos el contenido de agregado fino igual a 718.348 kg por un metro cúbico de concreto.

Conocidos los pesos por metro cúbico de los materiales y el volumen de mezcla requerida (cantidad de probetas), se halla la dosificación como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Dosificación de la mezcla para 25 probetas

MATERIAL	RELACIÓN AGUA/CEMENTO = 0.5	
	EN PESO (kg)	EN PORCENTAJE (%)
CEMENTO	15.710	16.997
ARENA	28.213	30.524
GRAVA	40.650	43.980
AGUA	7.855	8.499

Fuente. Los Autores

Anexo B: Toma de datos y cálculos efectuados para el análisis de resultados

Para llevar control del avance del ataque acelerado a las probetas, se efectuaron tomas de datos de masa, altura, diámetro, tiempo de vuelo y resistencia a la compresión para las probetas dependiendo de para que prueba estaban destinadas.

En la tabla 1 se presenta un formato de registro de datos típico usado a lo largo de la investigación para las probetas destinadas a pruebas de compresión, ya que estas requerían la toma de todos los datos antes mencionados.

Tabla 1. Formato de registro de datos

Muestras	Masa y Volumen			VPU			f'c
	Masa gr	Alto mm	Diámetro mm	Tiempo μs	%error	Promedio	
R1	3985	207,98	103,61	59,1	1,0152	58,8	20000
		208,03	103,59	58,5			
	3985	208,04	103,64	57,8	0,5164	57,95	
		208,01	103,49	58,1			
	3985	208,03	103,56	59,3	0,5059	59,15	
		207,98	103,59	59			
	3985,0	208,012	103,580			58,633	
R2	3944	207,69	103,53	58,7	1,0118	59	21200
		207,73	103,58	59,3			
	3944	207,65	103,64	59,1	0,6768	58,9	
		207,76	103,67	58,7			
	3944	207,64	103,65	58,5	1,0256	58,2	
		207,67	103,69	57,9			
	3944,0	207,690	103,627			58,700	

A continuación se presenta una breve explicación del procedimiento seguido para realizar los cálculos necesarios en esta investigación:

CALCULOS:

- **Volumen:**

Para el cálculo del volumen se registraban seis lecturas de diámetro y seis de alturas y se hallaba su promedio como se muestra en la tabla 1. Con estos promedios y la ecuación 1 se calculaba el volumen de cada probeta.

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \text{ [cm}^3\text{]} \quad (1)$$

- **Masa:**

Para el cálculo de la masa de las probetas, se promediaron las tres lecturas de peso hechas para cada una de las probetas como se observa en la tabla 1, los resultados se presentan en [g].

- **Densidad:**

Se realizó el cálculo de la densidad a partir de los valores de masa y volumen que se presentaron anteriormente, como se muestra en la ecuación 2.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$

- **Velocidad de Pulso ultrasónico:**

La velocidad de pulso ultrasónico se calcula de acuerdo con la ecuación 3, 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. El valor del tiempo de vuelo usado para el cálculo de la velocidad corresponde al promedio del promedio de cada punto como se observa en la tabla 1.

$$VPU = \frac{a}{t} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

- **Resistencia a la Compresión:**

En el ensayo de resistencia a la compresión se obtiene el valor de la fuerza máxima aplicada a la probeta antes de fallar, este dato se obtiene en [kgf]. Para el cálculo de la resistencia requerimos conocer el valor del área sobre la cual fue aplicada la fuerza, esta se calcula como lo muestra la ecuación 4, con el diámetro promedio.

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4)$$

Una vez hallado el valor del área, usamos la ecuación 5 para calcular el valor de la resistencia a la compresión de cada probeta.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

P: Fuerza aplicada en [N], conociendo que 1 [kgf] = 9.80665 [N]

A: Área en [mm²]

Anexo C. Resultado de las pruebas de difracción de rayos x (ciclos 0 y 75)

A continuación se presentan en las tabla 1 y 2, los resultados de las pruebas de difracción de rayos x para los ciclos 0 y 75, en los cuales se muestran las fases cristalinas presentes en cada uno de ellos.

Tabla 1. Fases cristalinas presentes en el Ciclo 0 (C1ZY)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Ca CO ₃	010-83-0578	Calcita
	Si O ₂	010-86-1560	Cuarzo
	Ca (OH) ₂	010-84-1265	Portlandita
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2035	Moscovita
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-58-2028	Caolinita
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-72-1245	Albita
	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	000-33-0311	Yeso
	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ (H ₂ O) ₂₆	010-75-7554	Etringita
	Ca ₃ Al ₂ (O ₄ H ₄) ₃	010-74-3036	Katoita
	Ca ₂ Na ₃ (SO ₄) ₃ (OH)	000-35-0506	Cesanita
	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	000-29-0701	Clinocloro
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita

Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander

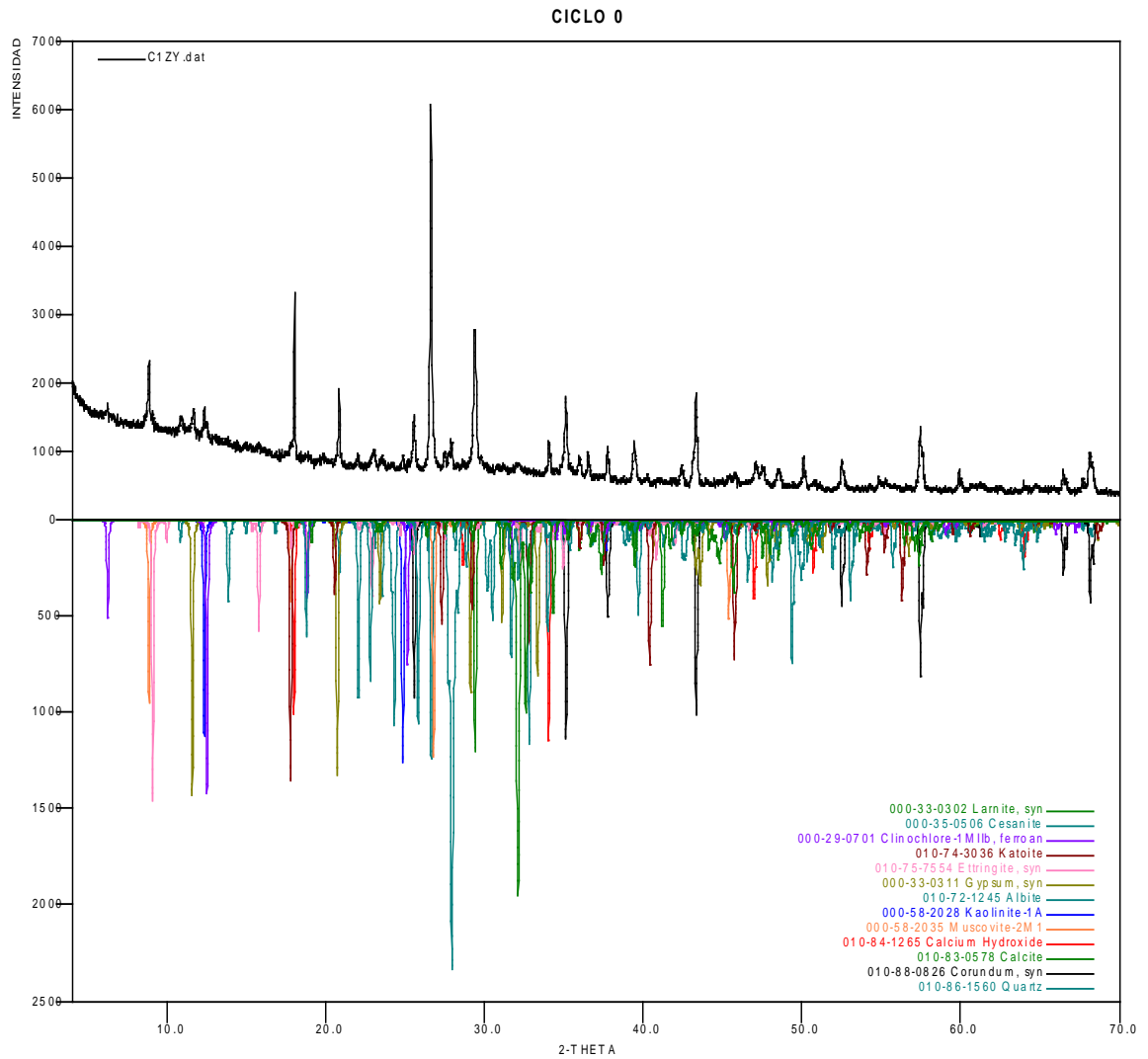
Tabla 2. Fases cristalinas presentes en el Ciclo 75 (C2GM)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	Ca CO ₃	010-75-6049	Calcita
	Si O ₂	000-33-1161	Cuarzo
	Ca (OH) ₂	010-87-0673	Portlandita
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2035	Moscovita
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-58-2028	Caolinita
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6426	Albita
	Ti O ₂	010-75-6234	Rutilo
	Ca _{2.93} Al _{1.97} (Si _{6.4} O _{2.56}) (OH) _{9.44}	010-77-1713	Katoita
	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ (H ₂ O) ₂₆	010-72-0646	Etringita
	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	000-29-0701	Clinocloro
	Ca ₂ Si O ₄	010-73-2091	Larnita
	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	010-76-1746	Yeso
	Na ₂ SO ₄	000-37-1465	Tenardita
	Ca _{1.31} Na _{4.32} (OH) _{.94} (SO ₄) ₃	010-75-1691	Cesanita

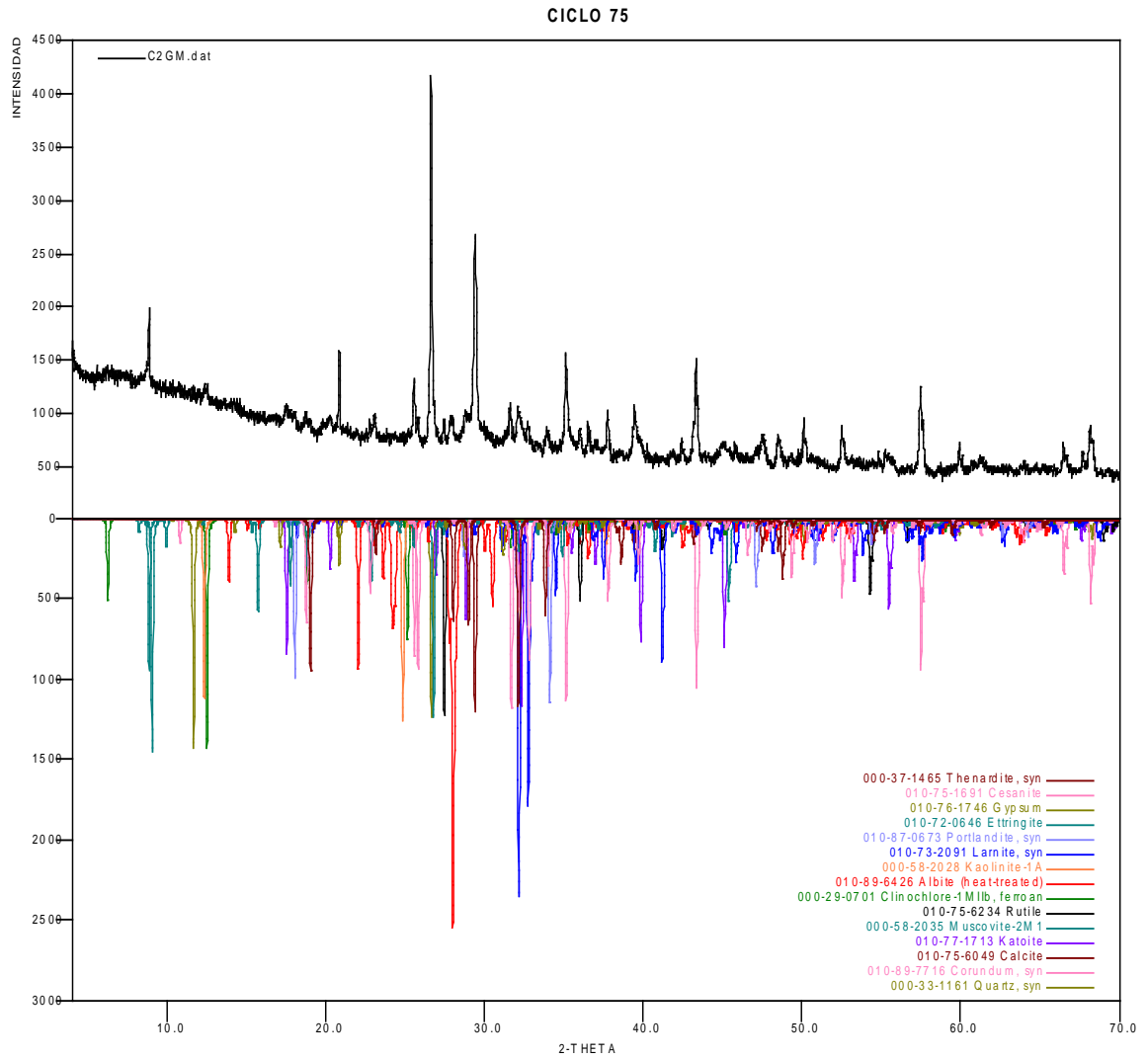
Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander

En las gráficas 1 y 2 se presentan los respectivos perfiles de difracción para los ciclos 0 y 75.

Gráfica 1. Perfil de difracción para la muestra de concreto tomada en el ciclo 0

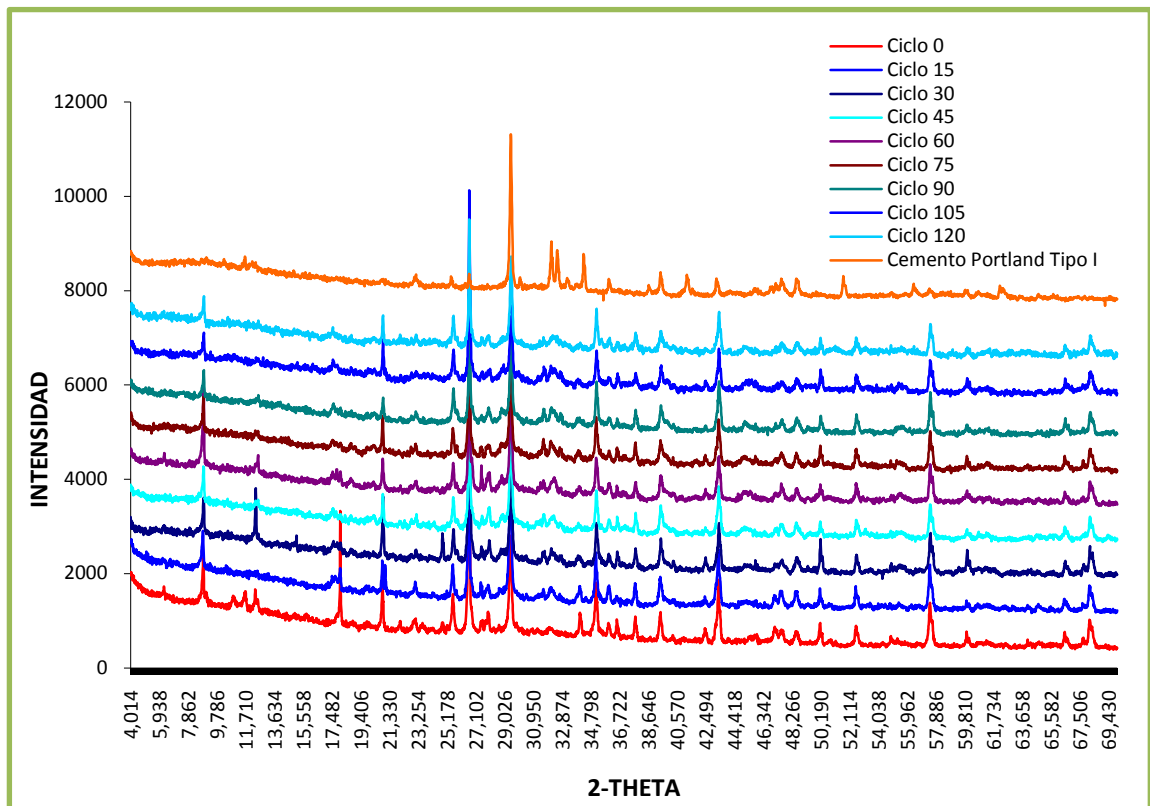


Gráfica 2. Perfil de difracción para la muestra de concreto tomada en el ciclo 75



La gráfica 3 muestra la superposición de los perfiles de difracción para cada una de las muestras analizadas.

Gráfica 3. Superposición de los perfiles de difracción a lo largo del ataque



Anexo D: Imágenes del deterioro causado a especímenes de concreto por ataque acelerado de sulfato de sodio

En la gráfica siguiente se presenta la secuencia visual registrada para los primeros 75 ciclos



A continuación se muestran imágenes del deterioro sufrido por las probetas después del ciclo 75.



