

**“EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN
CONCRETO EXPANDIDO POR EFECTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE
ACELERADA”**

**YURANY SANCHEZ TORRES
LUIS EDUARDO TORRES FLOREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

**“EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN
CONCRETO EXPANDIDO POR EFECTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE
ACELERADA”**

**YURANY SANCHEZ TORRES
LUIS EDUARDO TORRES FLOREZ**

**Trabajo de investigación, presentado como requisito de grado para optar al
título de Ingeniero Metalúrgico**

**Director
Ph.D. RICARDO ALFREDO CRUZ**

**Codirector
MSc. LUZ AMPARO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

Agradezco primeramente a Dios, por ser mi guía, fortaleza
y estar conmigo siempre.

A mis padres y hermanos por darme su apoyo, amor y la
confianza para alcanzar las metas que me he trazado.

A mis demás familiares por creer en mí y mostrarme su
confianza y cariño.

A mis amigos por ser las personas que me acompañaron
con sus risas, ánimo y cariño durante este camino.

YURANY SANCHEZ TORRES

Primero y ante todo dedico a Dios quien ha sido mi refugio y fortaleza, la Virgen por ser la luz que ilumina mi camino y al Doctor José Gregorio Hernández Cisneros por brindarme su conocimiento, apoyo, amistad y por ser prácticamente como un padre.

A mi madre por otórgame su infinito amor, por creer en mí y por enseñarme todo lo bueno que hay en mí

A mi hermana y hermano por ser mi fuente de inspiración y superación.

A Silvia Natalia Fuentes Torres por brindarme su cariño, tolerancia y apoyo incondicional.

A Yurany Sánchez Torres por brindarme su amistad, apoyo, dedicación, esfuerzo y concederme el gusto de trabajar a su lado.

A mis amigos Juan Carlos Anaya, Giovanni Alexander Rivera, Cesar Javier Morantes, Layla María Becerra, Yanid Díaz, Lady Floren Ardila, Edgar Farfán, Oscar Iván Piña, Alexander Arguello, Mario Andrés López y demás compañeros y personas que hicieron posible la culminación de esta etapa. Gracias por su apoyo.

Luis Eduardo Torres Flórez.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por recibirnos y generar en nosotros el espíritu de ser mejores personas y profesionales, por brindarnos la oportunidad de conocer personas de diversas culturas y adquirir conocimientos que enriquecieron nuestras vidas.

Agradecemos a nuestra escuela por guiarnos y apoyarnos en el desarrollo de este trabajo, y a todas las personas que nos brindaron su colaboración.

Agradecemos al Director de Proyecto Ph.D. Ricardo Cruz por su orientación y ayuda, y a nuestra codirectora M.Sc. Luz Amparo Quintero por su entrega, dedicación y compromiso en el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	22
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO	24
2.1.1 COMPOSICIÓN DEL CONCRETO	24
2.1.1.1 CEMENTO	24
2.1.1.2 AGREGADOS	25
2.1.1.3 AGUA	25
2.1.2 RELACIÓN AGUA-CEMENTO	25
2.1.3 REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO	26
2.2 REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE	26
2.2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA REACCIÓN	28
2.2.1.1 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS	29
2.2.1.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO (ÁLCALIS)	34
2.2.1.3 HUMEDAD AMBIENTAL	35
2.2.1.4 TEMPERATURA	36
2.3 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	36
2.3.1 PRINCIPIO FUNDAMENTAL	36
2.3.2 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL PULSO	37
2.3.3 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	39
2.3.3.1 EFECTOS POR LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO	39
2.3.3.2 OTROS FACTORES	41

2.4 VIDRIO.....	43
2.4.1 DEFINICIÓN	43
2.4.2 INFLUENCIA DEL VIDRIO EN LA ASR.....	43
3. METODOLOGIA	45
3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	46
3.2 ETAPA 2: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE REACCIÓN ACELERADA	46
3.3 ETAPA 3: FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO.....	46
3.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	47
3.3.2 DISEÑO DE MEZCLA.....	48
3.3.3 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	48
3.3.4 FRAGUADO Y CURADO.....	49
3.4. ETAPA 4: EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS AL AMBIENTE DE REACCIÓN ACELERADA	51
3.5 ETAPA 5: ENSAYOS EXPERIMENTALES A MUESTRAS CON Y SIN EXPOSICIÓN A ARS ACELERADA	52
3.5.1 INSPECCIÓN VISUAL	52
3.5.2 CAMBIOS DIMENSIONALES	52
3.5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	53
3.5.4 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	54
3.6 ETAPA 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
3.7 ETAPA 7: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	57
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	57
4.1.1 CEMENTO	57
4.1.2 AGREGADOS FINO Y GRUESO	59
4.1.3 VIDRIO.....	60
4.2 DISEÑO DE MEZCLA.....	62
4.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES	63
4.3.1 INSPECCIÓN VISUAL.....	63

4.3.2 CAMBIOS DIMENSIONALES	65
4.3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	68
4.3.4 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	70
4.3.5 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	72
4.3.6 ENSAYO DE POROSIDAD.....	73
4.4 RELACIÓN ENTRE LA EXPANSIÓN Y LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO	75
4.5 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	78
5. CONCLUSIONES	82
6. RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis de control de calidad de agua	48
Tabla 2. Resultados del análisis del cemento por la Técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva	58
Tabla 3. Características del agregado fino y grueso	59
Tabla 4. Análisis granulométrico para el agregado fino	59
Tabla 5. Análisis granulométrico para el vidrio	60
Tabla 6. Análisis elemental del vidrio utilizado en la mezcla de concreto	61
Tabla 7. Diseño de mezcla para 16 probetas inocuas	62
Tabla 8. Diseño de mezcla para 16 probetas alteradas	62
Tabla 9. Registro de longitudes, longitud promedio y % de expansión	65
Tabla 10. Registro de diámetros, diámetro promedio y % de expansión	66
Tabla 11. Resistencia a la compresión de las probetas inocuas	68
Tabla 12. Resistencia a la compresión de las probetas alteradas	69

Tabla 13. Valores de VPU para las probetas en cada tiempo de prueba	70
Tabla 14. Análisis de Difracción de Rayos X probeta I1	72
Tabla 15. Análisis de Difracción de Rayos X probeta A4	73
Tabla 16. Diámetro y longitud promedio, y, volumen total de cada muestra	74
Tabla 17. Valores de X, volumen de grano y porcentaje de porosidad para cada muestra ensayada	75
Tabla 18. Porcentajes de expansión en longitud y diámetro, y, velocidad de pulso ultrasónico en las probetas inocuas en cada sesión de pruebas	76
Tabla 19. Porcentajes de expansión en longitud y diámetro, y, velocidad de pulso ultrasónico en las probetas alteradas en cada sesión de pruebas	76
Tabla 20. Valores promedio de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en las probetas inocuas	79
Tabla 21. Valores promedio de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en las probetas alteradas	79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo idealizado de micro y macrofisuras causadas por la reacción álcali sílice en hormigón	29
Figura 2. Ataque de los álcalis en sílice bien cristalizada (A) y en sílice amorfa (B)	30
Figura 3. Modelo gráfico de una relación de proporción pésima simple	31
Figura 4. Métodos de transmisión del pulso, T: Transmisor, R: Receptor. a). Transmisión directa; b). Transmisión semidirecta; c). Transmisión indirecta	38
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto	45
Figura 6. Fraguado de las probetas al ambiente	50
Figura 7. Curado de probetas en cámara	51
Figura 8. Curado de probetas en condiciones estándar	51
Figura 9. Calibrador digital utilizado para tomar medidas en las probetas testigo	53
Figura 10. Máquina de ensayo AMSLER	54
Figura 11. Equipo de ultrasonido	55
Figura 12. Probeta sobre el soporte acrílico y transductores	56
Figura 13. Apariencia interna de probeta inocua	64
Figura 14. Apariencia interna de probeta alterada	64
Figura 15. Equipo utilizado en el ensayo de porosidad	74

LISTA DE GRÀFICAS

	Pág.
Gràfica 1. Porcentaje de expansión en longitud de las probetas inocuas y alteradas	66
Gràfica 2. Porcentaje de expansión en diámetro de las probetas inocuas y alteradas	67
Gràfica 3. Variación de la resistencia a la compresión para las probetas alteradas e inocuas al transcurrir el tiempo en condiciones de ASR acelerada y condiciones estándar	69
Gràfica 4. Comportamiento de la VPU para las probetas alteradas e inocuas en condiciones de ASR acelerada y condiciones estándar	71
Gràfica 5. Relación entre la expansión en longitud y diámetro con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas inocuas	77
Gràfica 6. Relación entre la expansión en longitud y diámetro con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas alteradas	77
Gràfica 7. Relación entre la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas inocuas	80
Gràfica 8. Relación entre la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas alteradas	80

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Cálculo para el diseño de mezcla	89
ANEXO B: Toma de datos y cálculos efectuados para el análisis de resultados	94
ANEXO C: Resultado del Análisis de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva del Cemento	97
ANEXO D: Resultados de Difracción de Rayos X	98
ANEXO E: Características, toma de datos y cálculos para el ensayo de porosidad	103
ANEXO F: Resultados de la prueba de Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS)	107

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO EXPANDIDO POR EFECTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE ACELERADA.*

AUTORES: SANCHEZ TORRES, Yurany. TORRES FLÓREZ, Luis Eduardo.**

PALABRAS CLAVES: concreto, reacción álcali sílice, expansión, velocidad de pulso ultrasónico.

RESUMEN

Esta investigación evaluó la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo, cuando es expandido por el desarrollo de la reacción álcali sílice acelerada. El material se expuso en condiciones de temperatura entre 32-35°C y humedad superior al 80% en una cámara adecuada, además se adicionó vidrio reciclado como agregado fino e hidróxido de sodio en el agua para la preparación de la mezcla de concreto. En la evaluación se realizaron pruebas tales como inspección visual, cambios dimensionales, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, para un total de 32 probetas, de las cuales 16 fueron alteradas (vidrio y NaOH) y puestas en condiciones de reacción acelerada dentro de la cámara y las demás se mantuvieron bajo condiciones estándar. Además se realizaron pruebas de difracción y fluorescencia de rayos X, espectrometría de energía dispersiva y porosidad. Se determinó la resistencia a la compresión del concreto fabricado con vidrio y NaOH comparado con un concreto sin estos aditivos, con lo cual se determinó, que la adición de vidrio disminuye esta propiedad, y, además aumenta la porosidad en el material. Por otro lado, se relacionó la expansión en longitud y diámetro generada por la reacción álcali sílice con la velocidad de pulso ultrasónico en el material, encontrándose, que en las probetas alteradas al aumentar la expansión disminuye la velocidad de pulso ultrasónico, mientras que en las probetas inocuas, que no tuvieron expansiones considerables la velocidad de pulso ultrasónico aumenta.

*Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Director: Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz. Co director: M.Sc. Luz Amparo Quintero.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF ULTRASONIC PULSE VELOCITY IN CONCRETE EXPANDED BY EFFECT ALKALI SILICA REACTION ACCELERATED.*

AUTORES: SANCHEZ TORRES, Yurany. TORRES FLÓREZ, Luis Eduardo.**

KEY WORDS: concrete, alkalisilicareaction, expansion, ultrasonic pulse velocity.

ABSTRACT

This research evaluated the ultrasonic pulse velocity in concrete without reinforcement, when expanded by the development of the alkali silica accelerated. The material was exposed at temperatures between 32-35 ° C and humidity above 80% in an appropriate chamber for these parameters; recycled glass and sodium hydroxide also were added as fine aggregate in water for preparing the concrete mixture. Tests such as visual inspection, dimensional changes, resistance to compression and ultrasonic pulse velocity were done to a total of 32 specimens, where 16 of them were altered (glass and NaOH) and placed in conditions of rapid reaction in camera and the others were kept under standard conditions. X-ray diffraction, X-ray fluorescence and porosity tests were also carried out. The compressive strength of concrete was determined for concrete with glass and NaOH, and compared to concrete without these additives, which showed that the addition of glass decreases this property, and also increases the porosity in the material. On the other hand, the expansion in length and diameter generated by the alkali silica was related with ultrasonic pulse velocity in the material, and it was found that the specimens affected by increasing the expansion, slow ultrasonic pulse velocity, while the innocuous specimens that did not have significant expansions ultrasonic pulse velocity increased.

*Research Work.

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

INTRODUCCIÓN

El concreto es reconocido como un material de construcción durable. La durabilidad es la capacidad de resistencia del material a lo largo del tiempo, en relación con las condiciones del medio ambiente, como también con las condiciones de servicio de las estructuras. Las características propias del concreto como son: resistencia, manejabilidad, forma de producción, facilidad de tomar la forma del molde donde se deposita, durabilidad, etc., le han permitido ser el material de construcción más usado a través del tiempo.

En el año de 1940 el investigador Thomas Stanton pudo demostrar la existencia de la reacción álcali-agregado, como un proceso intrínseco de degradación del concreto, dejando en claro que las condiciones del medio ambiente en que se encuentran las estructuras son tan importantes como lo es el cemento y los agregados, reafirmando el verdadero papel que los agregados desempeñan como componentes activos, utilizados en la dosificación del concreto.

La reacción álcali-sílice, de la más frecuente en el concreto, se origina por la interacción de los hidróxidos álcalis provenientes de la hidratación del cemento portland con los materiales silíceos de los agregados. Esta reacción puede originar expansión, que con el tiempo puede fisurar y agrietar el concreto.

El deterioro que se presenta en el material a causa de esta reacción y sus efectos se puede evaluar utilizando métodos no destructivos, éstos pueden utilizarse sin ocasionar daños en las estructuras, y una técnica muy utilizada es la de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), la cual se utiliza para evaluar la calidad del concreto y determinar la relación que existe con la reacción álcali sílice sin ocasionar daños estructurales en el material.

El presente trabajo de investigación se realiza con el fin de contribuir en el estudio del efecto que tiene sobre el concreto la ocurrencia de la reacción álcali-sílice, por medio de la velocidad de pulso ultrasónico; en el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para alcanzar el objetivo propuesto. Se evalúa la expansión que genera la reacción en el concreto fabricado con adición de vidrio y NaOH en el agua de mezcla, expuesto a condiciones de temperatura y humedad, las cuales aceleran la reacción, y, un concreto sin estos aditivos, expuesto en condiciones estándar, a lo largo de toda la fase experimental. Además de la evaluación de la VPU, se realizaron ensayos de inspección visual, resistencia a la compresión, cambios dimensionales, y, adicionalmente se hicieron análisis de fluorescencia y difracción de rayos X, espectrometría de energía dispersiva y porosidad. Los resultados obtenidos, junto con sus respectivos análisis se presentan en el capítulo 4, y, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones obtenidas durante la realización de este proyecto.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 Planteamiento del Problema

Uno de los principales procesos de degradación del concreto es la reacción con los áridos que puede provocar expansiones y posteriormente fisuraciones, siendo tres las reacciones que pueden ocurrir: reacción álcali-sílice (ASR), reacción álcali-carbonato (ACR) y ataque por sulfatos. Debido a que estas reacciones comprometen el funcionamiento estructural del concreto es de gran importancia estudiar su ocurrencia y los efectos que ocasiona.

Con mayor frecuencia se presenta la reacción álcali-sílice, la cual será el principal objeto de estudio de esta investigación. En esta reacción intervienen los hidróxidos álcalis y el material silíceo de los agregados del concreto, este fenómeno es particularmente expansivo, ya que tiene la capacidad de desarrollar suficiente presión de dilatación para fisurar y romper el concreto. Generalmente la reacción progresa lentamente permitiendo que las expansiones sean previstas algunos años antes de que el daño en la estructura sea grave.

Por lo anterior, es importante evaluar el avance y los efectos que causa esta reacción utilizando métodos no destructivos, ya que prever o evitar los daños en la estructura sería de ayuda para no incrementar costos, ya sea en reparación o demolición de la misma. La técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico es una de las más utilizadas en la evaluación de la calidad del concreto, y, con ella se busca determinar la relación que existe con la reacción álcali sílice sin comprometer la integridad estructural del concreto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la velocidad de pulso ultrasónico en concreto (sin refuerzo con relación agua cemento 0.5) expandido por efecto de la reacción álcali sílice acelerada.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto del tiempo de exposición sobre la velocidad de pulso ultrasónico y la expansión del concreto (sin refuerzo con relación agua cemento 0.5), cuando es sometido a condiciones aceleradas de reacción álcali sílice.
- Determinar la resistencia a la compresión del concreto en estudio con relación agua cemento 0.5 con y sin exposición a la reacción álcali sílice acelerada.
- Establecer relaciones entre los resultados obtenidos (resistencia a la compresión y expansión) con la velocidad de pulso ultrasónico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del Concreto

El concreto actualmente es el material para la construcción más empleado después del acero; esto se debe principalmente a sus propiedades físicas y mecánicas, tales como su capacidad de resistencia a lo largo del tiempo, en relación con las condiciones del medio ambiente y bajo condiciones de servicio de las estructuras, es decir, su durabilidad.

Es un material compuesto por cemento, arena, grava y agua, que al reaccionar y endurecer forman una piedra artificial con un comportamiento que se acepta como homogéneo. Otras características propias del concreto son: resistencia, manejabilidad, forma de producción, facilidad de tomar la forma del molde donde se deposita, le han permitido ser el material de construcción más usado a través del tiempo. [6]

2.1.1 Composición del Concreto

2.1.1.1 Cemento

Los cementos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. El más utilizado es el cemento Portland, el cual tiene propiedades de adhesión y cohesión, que permiten aglutinar los agregados para conformar el concreto. [4]

2.1.1.2 Agregados

El agregado es el material granular como la arena y la grava. El término agregado grueso (grava) refiere a partículas de un tamaño mayor a 4.75mm (Malla No.4) y el agregado fino (arena) para partículas menores de 4.75mm, pero mayores a 75 micrómetros (Malla No.200). Tanto el agregado grueso como el agregado fino pueden ser natural o producto del procesamiento industrial de las rocas. [9]

2.1.1.3 Agua

El agua como componente del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que éstas desarrollen sus propiedades aglutinantes. Al mezclarse con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos fluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua permanece en la estructura rígida de la pasta (agua de hidratación), y el resto es agua evaporable. [4]

2.1.2 Relación Agua-Cemento

Es uno de los parámetros más importantes de la tecnología del concreto, pues influye principalmente en la resistencia final del mismo. Expresa la relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Una relación agua/cemento baja conduce a un hormigón de mayor resistencia que una relación agua/cemento alta, pero entre más alta esta relación, el concreto se vuelve más trabajable.

2.1.3 Reacción Álcali-Agregado

La reacción álcali-agregado se identifica como un proceso fisicoquímico en el cual intervienen principalmente los minerales que constituyen la roca utilizada como agregado, según sea su naturaleza cristalina o amorfa y los hidróxidos alcalinos del concreto que pueden ser aportados, bien por el cemento, por los mismos agregados o por algún agente externo.[6]

Gran parte de los agregados utilizados en la dosificación del concreto con cemento portland son químicamente estables y sin interacción deletérea con otros ingredientes del concreto, sin embargo este no es el caso de los que contienen ciertos minerales que reaccionan con los álcalis solubles en el concreto. Esta reacción que se genera es denominada en forma general como álcali agregado identificándose tres diferentes tipos de reacción como son: Alcali- Carbonato, Ataque por Sulfatos y Álcali-Sílice. [6]

2.2 Reacción Álcali Sílice

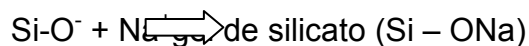
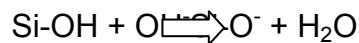
La reacción álcali-sílice (ASR) es la más común y estudiada de las reacciones álcali-árido. En la fabricación del hormigón, la hidratación del cemento da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta de volumen. Anteriormente se creía que el mecanismo de la reacción era distinto para las rocas con minerales silíceos cristalizados que para las rocas con estructura más desordenada, distinguiéndose entre reacción álcali – silicato (ASSR) y reacción álcali – sílice (ASR) respectivamente. Sin embargo, se ha demostrado que no es así y que la reacción es la misma, sólo que en función

del grado de cristalización de la sílice, la cinética de la reacción varía, dándose más rápidamente cuanto menor es este grado. [28]

La expansión viene causada por la presión osmótica. Los geles de silicato alcalino pueden ejercer grandes presiones de imbibición durante el proceso expansivo, mayores que la resistencia a tracción del hormigón.[28]

Según el Boletín 79 del ICOLD (1991), las reacciones que se producen son principalmente dos, y lo hacen simultáneamente:

- Reacción 1: Reacción ácido-base, neutralización de los grupos silanol (Si-OH) por la solución alcalina con soda cáustica $\text{NaOH} = \text{Na}^+ \text{OH}^-$. En primer lugar el grupo silanol reacciona con el OH^- , y da como producto Si-O^- , que al reaccionar con el Na^+ , produce un gel de silicato.



- Reacción 2: Ataque de los puentes de siloxeno por la solución alcalina, lo que provoca una desintegración de la estructura y el paso de la sílice en solución al estado de iones positivos (H_2SiO_4).



Mirando la formulación de estas reacciones, se puede apreciar la importancia que tienen los iones OH^- en las mismas, porque para que se produzcan es primordial la presencia de este ión. El desarrollo de la reacción álcali-sílice, requiere la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa. La reacción cesará cuando uno de los

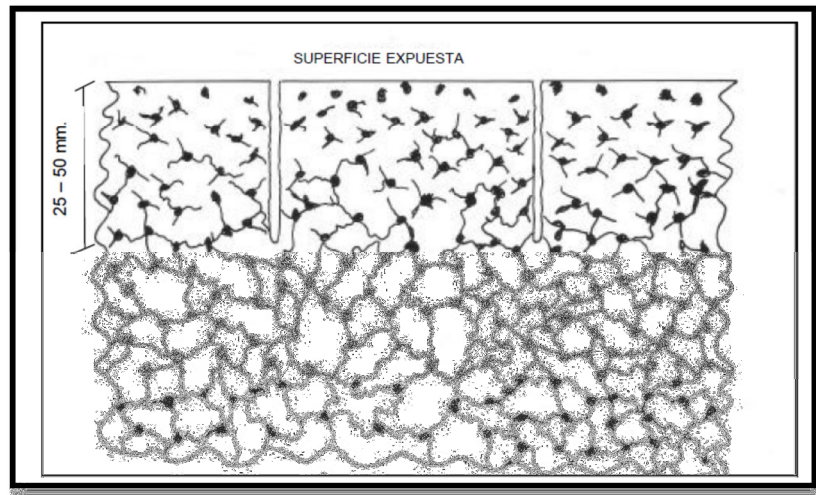
reactivos se consuma o cuando la concentración de ión hidroxilo es tan baja que la sílice reactiva no es atacada. [28]

2.2.1 Factores que Afectan la Reacción

La expansión causada por la ASR se debe a las tensiones inducidas por el crecimiento del gel al absorber el fluido intersticial, que dependerá a su vez del volumen de concentración, de la velocidad de crecimiento y de las propiedades físicas del gel. Siendo lenta la velocidad de crecimiento las fuerzas internas se disipan por la migración del gel a través del hormigón, mientras que si es relativamente rápida, las fuerzas internas pueden llegar a un nivel en el que pueden ocasionar fisuras y la expansión del hormigón. [28]

Por otra parte las fisuras y expansiones que causa la reacción ASR están influenciadas por la geometría de la pieza, la presencia de armadura y la carga aplicada. La anchura de las macrofisuras inducidas por la ASR en la cara expuesta de la pieza de hormigón puede oscilar desde menos de 0,1 mm hasta más de 10 mm en casos extremos. Si la expansión no ha finalizado, las anchuras de las fisuras se incrementarán durante periodos prolongados de tiempo húmedo. Las macrofisuras se localizan normalmente entre 25-50 mm de la superficie expuesta de la pieza de hormigón y están alineadas perpendiculares a la superficie expuesta. Un modelo idealizado de posible micro y macrofisuras causado por ASR (Hobbs, 1988) se muestra en la figura 1. [28]

Figura 1. Modelo idealizado de micro y macrofisuras causadas por la reacción álcali sílice en hormigón



Fuente.Envejecimiento de Presas por reacciones expansivas en hormigón [28]

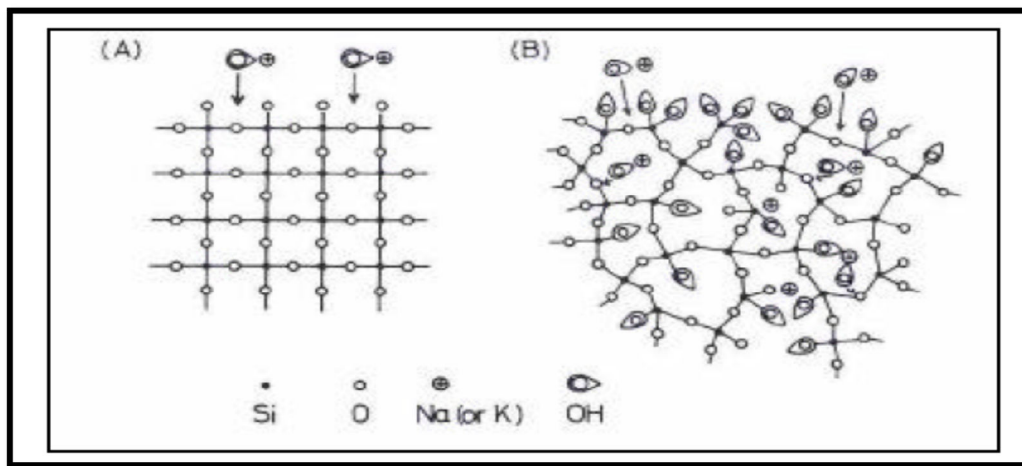
2.2.1.1 Propiedades de los Áridos

- **Composición de los áridos**

Los áridos que se ven afectados por la ASR, son aquellos que en su composición cuentan con minerales silíceos. Los áridos que componen los hormigones vienen de unas rocas que se encuentran en un estado distinto a sus condiciones naturales, por lo que evolucionarán hasta encontrar un nuevo equilibrio. Esto es lo que se conoce como reactividad, y dependerá tanto de los minerales como de las rocas de las que forman parte estos minerales. Por un lado, dependerá del tipo de mineral, y de su historia tectónica; y por otro, de la estructura, tamaño de los granos, porosidad, permeabilidad de la roca y de la composición de la misma. [28]

Hay que tener en cuenta que a la hora de producirse la reacción, ésta será más rápida en tanto más desordenada sea la estructura del mineral: si la forma desílice está bien cristalizada o es relativamente densa, el ataque será superficial, mientras que si está pobremente cristalizada los iones hidroxilos y sodio o potasio entrarán en el interior, esto se puede apreciar en la figura 2, en el caso (A) los iones no pueden penetrar y el ataque se reduce a la superficie, lo contrario sucede en el caso (B). [28]

Figura 2. Ataque de los álcalis en sílice bien cristalizada (A) y en sílice amorfa (B)



Fuente. Envejecimiento de Presas por reacciones expansivas en hormigón [26]

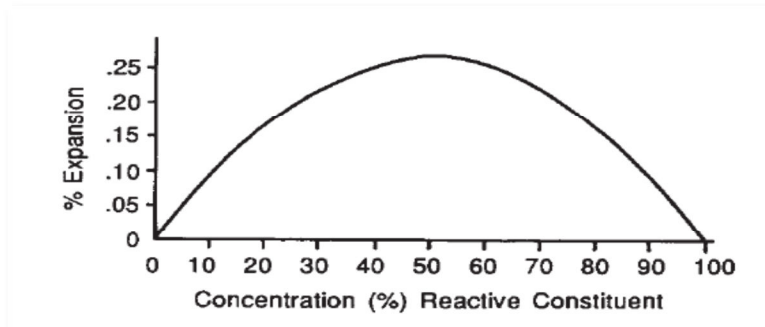
El cuarzo es la forma más común de la sílice y presenta la disposición ordenada de tetraedro de silicio y oxígeno que es estable bajo condiciones normales, mientras que el ópalo es la forma más desordenada, y, por tanto la más reactiva de sílice; el ópalo forma una red aleatoria de tetraedros con espacios entre los grupos de moléculas. [28]

- **Efecto Pésimo**

Proporciones reactivas, álcalis y formas apropiadas de sílice, que están presentes en suficientes concentraciones locales en el concreto hacen que la reacción ASR se produzca. Numerosos estudios han demostrado que existe una cierta concentración o proporción de los agregados reactivos que provoca una expansión máxima en el concreto. Esta proporción de material reactivo que produce un efecto expansivo máximo es denominado como el efecto pésimo, variaciones por encima o por debajo de ese valor reducen o inhiben la expansión.[24]

La relación de proporción pésima puede ser ilustrada con una gráfica modelo en el que la expansión de una serie de prismas de hormigón son similares. Los prismas contienen una concentración fija de álcali, y además contienen un rango de concentraciones de un constituyente agregado reactivo. La reacción procede y produce una expansión en el componente total de reactivos y alcalino utilizado. El álcali remanente en la pasta de cemento después de un momento dado será diferente para cada prisma, con las más altas concentraciones en los prismas que contienen agregados menos reactivos y disminuyendo a medida que el porcentaje de agregado reactivo aumenta. [24]

Figura 3. Modelo gráfico de una relación de proporción pésima simple



Fuente. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.[31]

Con el tiempo procede la reacción y la expansión continua, por lo que para los prismas con pequeños porcentajes de material reactivo tiene cambios en la proporción de álcali a constituyentes reactivos. [24]

Si se comparan las expansiones que se producen al variar las proporciones de árido reactivo, se puede observar que se produce un pico para una proporción determinada. Es decir, que el comportamiento que se da es el siguiente: hasta un determinado porcentaje, la expansión aumenta a medida que lo hace el contenido de árido reactivo, pero se llega a un punto a partir del cual, al seguir aumentando la proporción de árido, la expansión disminuye. [28]

Del mismo modo, con altas concentraciones de agregados reactivos, es que se agotan los álcalis, con la relación de cambio en la dirección opuesta al primer caso. Si la reacción, y por lo tanto, la expansión, se considera que progresa de acuerdo con el balance de álcalis a constituyentes reactivos, un modelo para la forma de un efecto pésimo se puede ilustrar como en la figura 3. El diagrama ilustra el caso más simple, donde la velocidad de reacción y la expansión son controladas por la relación de álcali a sílice o sílice a álcali, ambas concentraciones de reactivos son igualmente importantes para la reacción. [24]

Si un agregado reactivo tiene una mayor tasa de eliminación de las bases que el simple caso ilustra, cada unidad de incremento en el componente reactivo eliminará una mayor proporción de la concentración inicial de álcali. Esto efectivamente mueve el efecto pésimo a la izquierda. La mayoría de los estudios de investigación relacionados con la proporción pésima trata un rango de concentraciones de material agregado reactivo y con un solo nivel alcalino en todas las muestras de hormigón o mortero estudiadas. Variación en la concentración de álcali podría producir un efecto pésimo similar a la variación de los componentes agregados reactivos. Hobbs sugiere que tanto la concentración de álcali y el porcentaje de componente de agregado reactivo debe ser

considerado en conjunto y que habrá una "razón crítica" soluble en agua alcalina a la sílice reactiva para producir la expansión y el agrietamiento de una muestra de mortero en un período de tiempo mínimo. Esta "razón crítica" dependerá de la naturaleza del material reactivo en el mortero o concreto y la movilidad de los fluidos de los poros de la muestra. Esta movilidad, por supuesto, dependerá de la porosidad y la permeabilidad del hormigón, y esto a su vez dependerá de varios factores, pero quizás lo más importante de ellos será la relación agua-cemento. [24]

La cantidad de árido reactivo para la que se produce este pico de la expansión variará en función del tipo de árido con el que nos encontremos. La explicación que se puede dar a este comportamiento es la siguiente: si la proporción de sílice reactiva en el total de los áridos es pequeña y está libre, será consumida rápidamente por la reacción y la cantidad de gel no será suficiente para provocar daños, mientras que si la proporción es grande, la concentración de iones alcalinos en el agua intersticial se reduce debajo de un cierto nivel durante el tiempo de endurecimiento del hormigón y por consiguiente el volumen de gel formado no provoca una expansión total. [28]

- **Granulometría**

La reacción álcali-sílice puede producirse al utilizar arena o bien grava procedente de un árido reactivo. Hay muchos casos en que la expansión y fisuración del hormigón se produce en presencia de áridos reactivos con un tamaño comprendido en el rango de 1 a 5 mm. (es decir, las partículas más gruesas de árido fino), aunque en algunos casos la reacción ha ocurrido en el árido grueso, Metha (1986). Esto se debe a que la cantidad de sílice que reacciona depende de la superficie específica del árido de modo que cuanto mayor sea la relación superficie / volumen, más cantidad estará disponible. En el caso de la fracción arena, experimentalmente se ha comprobado que la expansión del

hormigón es mayor cuanto menor el tamaño de la partícula, hasta llegar al tamaño de 75 µm. Por debajo de este tamaño, la reacción se produce de una manera muy dispersa, sin producir expansiones de importancia y no dando lugar a concentración de tensiones, por lo que la fisuración es menor. [28]

Por otro lado, en cuanto a la gradación de los áridos, cuando un árido fino reactivose combina con un árido grueso inocuo, la porosidad del árido grueso afecta a la reactividad global, pues cuanto mayor es su porosidad, menor es el daño que produce, Alaejos y Bermúdez (2003). Esto es debido a que los poros actúan como cámara de expansión, de modo que los productos de la reacción, al aumentar de volumen, ocupan en primer lugar estos poros sin provocar tensiones adicionales. Cuando se trata de árido grueso reactivo, la expansión es menor a una edad temprana, pero irá aumentando continuamente a lo largo del tiempo debido a que la superficie específica es menor que en un árido fino. [28]

2.2.1.2 Propiedades del Cemento (álcalis)

Los álcalis sodio y potasio en el cemento tienen su origen en las materias primas usadas para la manufactura del cemento Pórtland, arcillas, piedras calizas, tizas, yesquitos y si el carbón se usa como combustible, también pueden venir de las cenizas de éste. Los compuestos alcalinos en el clinker son sulfatos alcalinos, álcali –aluminatos y aluminoferritas, y álcali - silicatos.

El contenido de ácido soluble de un cemento Pórtland se calcula convencionalmente como equivalente en óxido de sodio usando la fórmula siguiente:

$$(Na_2O)_{eq} = Na_2O + 0,658(K_2O) \quad (1)$$

equivalente de óxido de sodio = contenido en óxido de sodio + 0,658 · contenido en óxido de potasio. [28]

Las expansiones son mucho mayores para el caso de cementos con un contenido de álcalis mayor al 0,6%.

2.2.1.3 Humedad Ambiental

Cuando las muestras de hormigón son mantenidas húmedas, almacenándolas en agua o en una cámara húmeda, la velocidad de crecimiento de gel y por lo tanto la expansión, está controlada por la velocidad de la reacción química porque el gel consigue toda el agua que requiere. Mientras que si las muestras de hormigón son conservadas sobre agua, la velocidad de crecimiento del gel está controlada, no por la reacción química, sino por la velocidad a la que el vapor de agua se difunde dentro del hormigón. [28]

Esto se debe a que a edades tempranas, el agua se reduce por hidratación y por la ASR a una velocidad mayor de la que puede ser reemplazada por la difusión de vapor. Por eso, cuando las muestras de hormigón son almacenadas sobre agua, la fisuración y la expansión se retrasan y la medida de la expansión puede ser más sensible a la relación agua / cemento que es en el caso de las muestras de cemento mantenidas en un estado húmedo. [28]

Para que se produzca la reacción álcali - sílice se necesita un cierto contenido de agua. Se considera que no se producirá daño, o que su evolución cesará, si la humedad ambiental es inferior al 80 %, suponiendo el aire como la única fuente de humedad. Hay que tener en cuenta, que determinadas estructuras de hormigón, como las presas, están en contacto permanente con agua. Éstas, tienen por un lado, contacto permanente con la misma en el paramento aguas arriba y por otro, en su interior, dado que el hormigón tiene un cierto grado de permeabilidad, también habrá cierto grado de humedad. [28]

2.2.1.4 Temperatura

Respecto a los métodos de ensayo, el comportamiento expansivo de morteros y hormigones se mide normalmente en muestras almacenadas encima de agua en contenedores cerrados mantenidos a 20 ó 38° C. En general, la velocidad de reacción y la formación de gel aumentan con la temperatura. Pero hay que tener en cuenta que al mismo tiempo, el gel a altas temperaturas es menos viscoso y se introduce mejor por las fisuras y huecos del hormigón, pudiendo disminuirse en parte la expansión. [28]

2.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico

2.3.1 Principio Fundamental

Un pulso de las vibraciones longitudinales es producido por un transductor electroacústico, que se mantiene en contacto con una superficie de concreto bajo prueba. Cuando el pulso generado es transmitido en el concreto desde el transductor utilizando un material de acoplamiento líquido, como grasa o pasta de celulosa, se somete a múltiples reflexiones en los límites de las diferentes fases de material dentro del concreto. Un complejo sistema de ondas de tensión se desarrolla, lo que incluyen tanto las ondas longitudinales y de corte, y se propaga a través del concreto. Las primeras ondas para llegar al transductor receptor son las ondas longitudinales, que se convierten en una señal eléctrica por un segundo transductor. [8]

La velocidad de pulso longitudinal (en Km/s o m/s) está dada por:

$$v = \frac{L}{T} \quad (2)$$

Donde

v es la velocidad de pulso longitudinal.

L es la longitud recorrida.

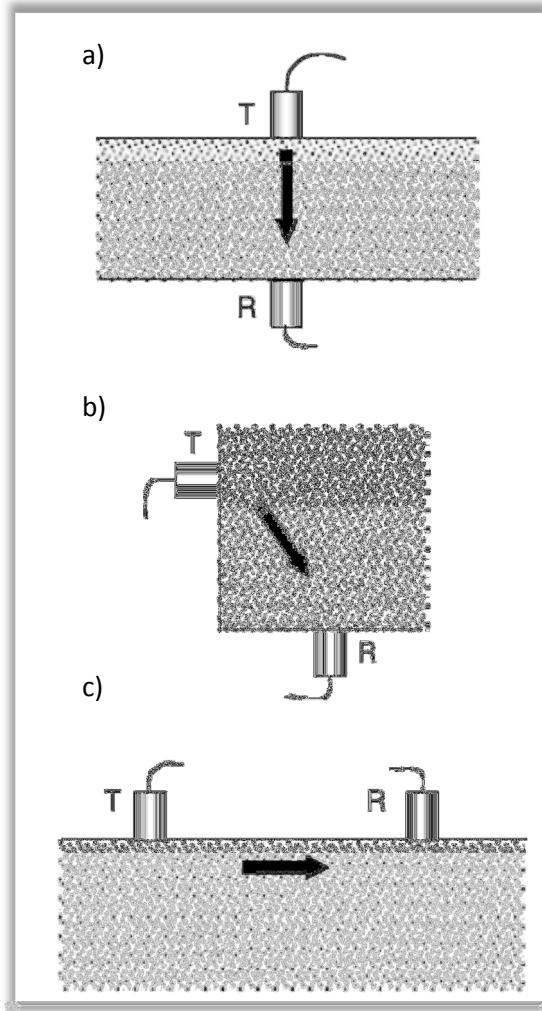
T es el tiempo que tarda el pulso para atravesar esa longitud.

El equipo consiste básicamente de un generador de impulsos eléctricos, un par de transductores, un amplificador y un dispositivo de cronometraje electrónico para medir el intervalo de tiempo entre la inicio de un impulso generado en el transductor de la transmisión y su llegada a otro transductor receptor. [8]

2.3.2 Mecanismos de Transmisión del Pulso

La técnica permite usar tres formas diferentes de transmisión del pulso, esto según la geometría y del acceso a las caras de la pieza de ensayo. A continuación se muestran los diferentes mecanismos:

Figura 4. Métodos de transmisión del pulso, T: Transmisor, R: Receptor. a). Transmisión directa; b). Transmisión semidirecta; c). Transmisión indirecta



Fuente. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures.[8]

El método de transmisión directa es el más conveniente y satisfactorio, porque el máximo de energía del pulso se transmite y se recibe. El método de transmisión semidirecto también se puede utilizar satisfactoriamente. Sin embargo, se debe

tener cuidado que los transductores no estén demasiado lejos, de lo contrario el pulso transmitido podría atenuarse y la señal de pulso podría no ser detectada. Este método es útil para evitar las concentraciones de los refuerzos. El método de transmisión indirecta, es menos satisfactorio, porque la amplitud de la señal recibida es significativamente menor que la recibida por el método de transmisión directa. [32]

2.3.3 Factores que Afectan la Velocidad de Pulso Ultrasónico

Los factores que afectan la velocidad de pulso se dividen en dos categorías, factores que resultan directamente de las propiedades del concreto y otros factores.

2.3.3.1 Efectos por las Propiedades del Concreto

- **Tamaño de los Agregados, Clasificación, Tipo y Contenido**

Muchos investigadores han encontrado que la velocidad del pulso es afectada significativamente por el tipo y la cantidad de agregado. En general, la velocidad del pulso de la pasta de cemento es menor que la del agregado. Por otro lado, para una elevada relación agregado- cemento, se obtienen valores de resistencia a la compresión menores. [32]

- **Tipo de Cemento**

Jones reporta que el tipo de cemento no tiene un efecto significativo sobre la velocidad del pulso. La rata de hidratación, sin embargo, es diferente para

diferentes cementos y esto podría influenciar la velocidad de pulso. Como el grado de hidratación incrementa, el módulo de elasticidad podría incrementarse y la velocidad de pulso incrementaría también. El uso de cementos de endurecimiento rápido resulta en mayor resistencia para dar algún nivel de velocidad de pulso. [32]

- **Relación Agua Cemento**

Kaplan estudió el efecto de la relación agua-cemento (w/c) sobre la velocidad de pulso. Él mostró que al incrementar la relación w/c , la resistencia a la compresión, a la flexión y la velocidad de pulso disminuye, no asumiendo otros cambios en la composición del concreto. [32]

- **Aditivos**

La entrada de aire parece no influir en la relación entre la velocidad del pulso y la resistencia a la compresión del concreto. Otros aditivos podrían influenciar en la velocidad del pulso de la misma manera como podrían influir en la rata de hidratación. [32]

- **Edad del Concreto**

El efecto de la edad del concreto sobre la velocidad del pulso es similar al efecto sobre la resistencia que desarrolla. Jones muestra que la velocidad incrementa muy rápido iniciando pero pronto cesa. [32]

2.3.3.2 Otros Factores

- **Contacto de los Transductores**

Si no se tiene el suficiente cuidado al ejercer el contacto entre los palpadores (aplicación de una insuficiente presión), daría como resultado una lectura incorrecta de la velocidad del pulso. [32]

- **Temperatura del Concreto**

Variaciones entre 5 y 30°C no tiene efecto significativo sobre la velocidad del pulso. Para temperaturas fuera de este rango deben hacerse algunas correcciones. [32]

- **Condiciones de Humedad y Curado del Concreto**

La velocidad de pulso para un concreto saturado de humedad es mayor que para un concreto en aire seco. La humedad generalmente tiene menor influencia sobre la velocidad para un concreto con alta resistencia que para uno con menor resistencia, por la diferencia en la porosidad. [32]

- **Longitud Recorrida**

En la práctica pequeñas longitudes de trayectoria tienden a generar variación y una leve elevación de la velocidad del pulso por la naturaleza heterogénea del concreto. [32]

- **Tamaño y Forma del Espécimen**

En muchos casos, la velocidad del pulso no depende del tamaño y la forma del espécimen. El requisito para satisfacer una dimensión finita requiere que la dimensión lateral más pequeña del espécimen sea más grande que la longitud de onda del pulso. [32]

- **Nivel de Esfuerzos**

Generalmente la velocidad del pulso no es afectada por el nivel de esfuerzos en los elementos bajo prueba. Sin embargo, cuando el concreto es sujeto a un alto nivel de esfuerzo estático o repetido, es decir, 65% del esfuerzo último o mayor, se desarrollan microgrietas en el concreto, con lo cual se reduciría considerablemente la velocidad del pulso. [32]

- **Refuerzo de Acero**

Uno de los factores más importantes que influye en la velocidad del pulso en concreto es la presencia de acero como refuerzo. La velocidad del pulso en el acero es de 1,4 a 1,7 veces la velocidad del pulso en el concreto en masa. Por lo tanto, lecturas de pulso de velocidad en las inmediaciones del acero de refuerzo son generalmente más altas que el concreto en masa. Siempre que sea posible, las lecturas de prueba deben hacerse de tal manera que las ondas eviten el camino del refuerzo.

Es importante incluir los diámetros de las barras como un parámetro fundamental en los factores de corrección. Sin embargo, las recomendaciones RILEM implican sólo dos parámetros básicos: la velocidad del pulso en el concreto circundante y las longitudes de recorrido que se encuentra en el acero y el hormigón. [32]

2.4 Vidrio

2.4.1 Definición

El vidrio en general es un material formado por la fusión de una mezcla de materiales como sílice, carbonato de sodio y CaCO_3 a altas temperaturas, seguido de un enfriamiento durante el cual se produce la solidificación sin cristalización. El vidrio es ampliamente utilizado en productos manufacturados, como tubos de vidrio plano, envases y tubos al vacío, entre otros. [22]

2.4.2 Influencia del Vidrio en la ASR

La reacción Álcali-sílice (ASR) es sin duda uno de los más nocivos eventos que pueden ocurrir en el concreto, los productos de reacción son expansivos y conducen a la formación de grietas con efectos perturbadores, por esta razón, los agregados de alta calidad deben ser utilizados en la construcción según lo prescrito por la norma europea EN 12620 "Áridos para hormigones", y EN 13139 "Áridos para mortero", que definen las características y los límites para obtener la certificación CE. Esta marca oficial es particularmente importante si el uso de los áridos reciclados y no convencionales se considera. De hecho, la explotación de áridos no convencionales, ha sido recientemente animada por leyes específicas en toda Europa y ha traído al medio ambiente ventajas, tales como la protección de las materias primas no renovables y disminución de la eliminación en vertederos. [27]

El vidrio reciclado ha sido usado como agregado de concreto, sin embargo, su naturaleza amorfa puede promover y desarrollar la ASR. Como el vidrio reciclado puede provenir de muchas fuentes, es muy importante investigar la forma en que su composición puede influir la ASR. [27]. El vidrio influye en la expansión causada

por la ARS, pero además la temperatura y la disponibilidad de álcalis también lo hacen.

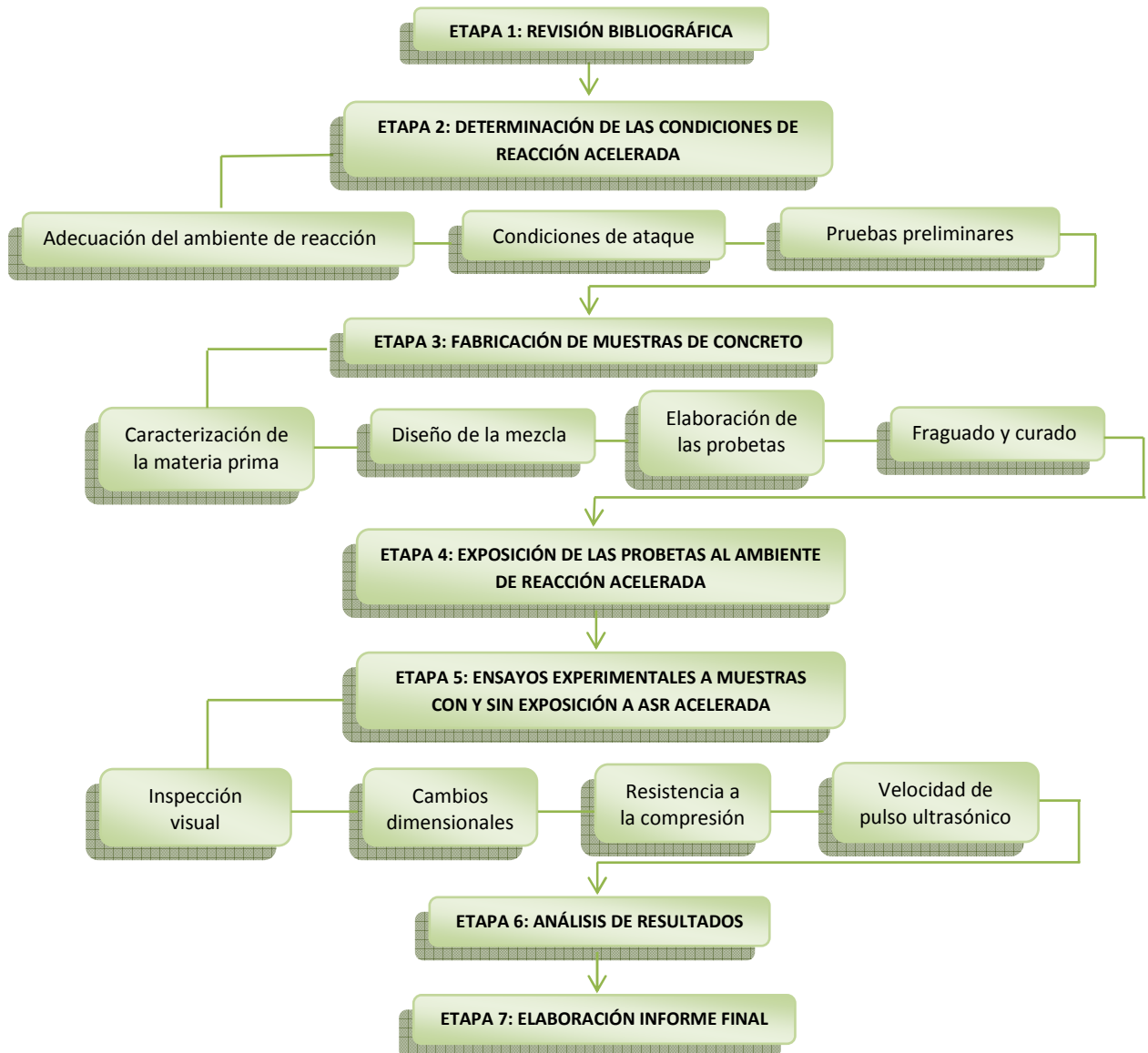
A pesar de compartir características químicas y físicas comunes (desorden de estructura, ausencia de porosidad, gran cantidad de sílice), muestras de vidrio de diferentes composiciones presentan una respuesta muy diferente de ASR. [27]

La primera conclusión que puede extraerse es que un estudio sistemático de diferentes tipos de vidrio debe llevarse a cabo con el fin de identificar la ampliación de las composiciones. Además, definir la calidad, y, el proceso de control debe ser establecido y aplicado en el tratamiento de post-consumo del vidrio. La expansión no es directamente relacionada con el contenido de sílice utilizado como agregado, por esto otros parámetros deben ser por lo tanto responsables de la reactividad: pruebas de solubilidad, han mostrado que existe una correlación directa entre la cantidad de vidrio disuelto (es decir, la cantidad de sílice que esta disponible en una solución para la formación de gel ASR) y el grado de expansión del mortero. Diferentes mecanismos parecen controlar la solubilidad del vidrio, por ejemplo, intercambio iónico. Estos procesos, donde la difusión de iones juega un papel fundamental, son particularmente importantes para este tipo de agregados, completamente libre de porosidades. La presencia de pequeñas cantidades de Fe, Ti y Ba crea una barrera que dificulta la eficacia de la solubilidad del vidrio. También es importante destacar el efecto amortiguador de los iones Ca^{2+} en cuanto a solubilidad se refiere: de hecho, el aumento de la concentración de iones Ca^{2+} disminuye la disolución de vidrio. La presencia de cationes de plomo y/o bario en solución puede disminuir la concentración de los iones calcio, debido a la mayor solubilidad o comparables de sus hidróxidos, por lo tanto este efecto puede producir, en el concreto un mayor incremento en la disolución de vidrio y podría explicar la alta reactividad de vidrio. Sin embargo, todavía se discute, que la presencia de una alta cantidad de iones de calcio crea geles con menor capacidad de hinchamiento. [27]

3. METODOLOGIA

A continuación se muestra la propuesta para el desarrollo de la investigación:

Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto



Fuente. Los Autores

3.1 ETAPA 1: Revisión bibliográfica

Se realizó la lectura y el análisis de la documentación encontrada sobre el concreto (generalidades, propiedades, características, entre otros), sobre el mecanismo de ocurrencia de la reacción álcali sílice, sus factores influyentes y efectos, así como información acerca de la velocidad de pulso ultrasónico. Para esta revisión se utilizaron diferentes textos, artículos acerca del tema, normas aplicadas al concreto y sus ensayos, y, tesis referentes a investigaciones realizadas a este tipo de material.

3.2 ETAPA 2: Determinación de las condiciones de reacción acelerada

Para el desarrollo de esta etapa, inicialmente se adecuó el ambiente necesario para llevar a cabo la reacción acelerada, con unas condiciones de ataque específicas; temperatura entre 20-38°C y humedad no menor al 80%. Para esto se tomó como base la norma ASTM C 1293-07^[2] y demás bibliografía consultada.

Esto se hizo en una cámara, que tiene dispositivos que controlan humedad y temperatura. La cámara cuenta con un compresor conectado a un burbujeador para generar la humedad necesaria para el ensayo, además tiene una resistencia, que produce la temperatura suficiente para realizar las pruebas y tiene un mecanismo de hermeticidad para garantizar que las pérdidas de humedad sean menores del 3%. Posteriormente se realizaron pruebas preliminares para verificar el buen funcionamiento del equipo y garantizar las condiciones del ensayo.

3.3 ETAPA 3: Fabricación de Muestras de Concreto


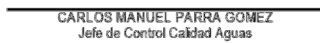
3.3.1 Caracterización de la materia prima

Inicialmente se caracterizó los agregados a utilizar, se estableció un tamaño máximo de agregado grueso igual a 19,05 mm (3/4") y se determinó el módulo de finura del agregado fino igual a 2.4. Los resultados de esta caracterización se presentan en el capítulo siguiente y los cálculos para realizar el diseño de mezcla en el anexo A.

Los materiales utilizados fueron:

- **Cemento:** Se utilizó cemento Portland Tipo I, que cumple con los requisitos establecidos por las normas técnicas colombianas NTC 121^[16] y 321^[17]. Al cual se le realizó análisis de composición por la técnica de Fluorescencia de Rayos X.
- **Agregados:** Se utilizó agregado grueso y fino proveniente del sector de Pescadero, Santander. Se determinaron sus características de acuerdo a las normas NTC 92^[18], 176^[19] y 237^[20].
- **Vidrio:** Se utilizó vidrio reciclado de uso común (utilizado para ventanas). A éste se le hizo un proceso de conminución, consistente primero en la trituración del material, para luego una molienda en molino de bolas. Después se hizo cuarteo del material molido en un cuarteador Riffles y finalmente una distribución granulométrica en mallas TYLER (número 10, 20, 35, 50, 100, 140 y 200) para determinar el módulo de finura igual a 3.3. Además se le hizo análisis de composición por la técnica de Espectrometría de Energía Dispersiva.
- **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 1. Para cierto número de probetas, al agua se le adicionó NaOH en base a la cantidad de cemento requerida para hacer la mezcla de concreto.

Tabla 1. Análisis de control de calidad de agua

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																		
F CC 507-006		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																		
Rev.:0		MUNICIPIO:		BUCARAMANGA	AÑO:		2011													
PARAMETROS	Parámetros Fisicoquímicos												Parámetros Microbiológicos				I. IRCA MENSUAL			
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente Unidades Pt-Co	pH Unidades	Olor y Sabor & Aceptable: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruro mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales		% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
MES																				
Enero	90	0,95	0,80	4,1	7,19	0	0,05	46,1	65,5	3,4	26,7	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,95	0,70	3,5	7,27	0	0,05	51,7	69,5	3,8	26,8	N.D	1,2	N.D	168	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,00	5,9	7,15	0	0,06	44,9	69,1	4,0	27,6	N.D	1,1	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Abril	87	0,93	0,87	6,0	7,14	0	0,04	44,6	69,1	2,4	34,4	N.D	1,2	N.D	174	0	100	0	100	0,00
Mayo	93	1,02	0,69	3,8	7,12	0	0,04	39,5	62,9	2,5	29,8	N.D	1,3	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Junio	90	1,10	0,86	5,0	7,09	0	0,04	41,1	65,0	2,8	27,8	N.D	1,2	N.D	180	0	100	0	100	0,00
PROMEDIO	90	0,98	0,82	4,8	7,16	0	0,05	44,7	66,9	3,1	28,9	N.D	1,2	N.D	179	0,0	100	0,0	100	0,00
Convenciones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad Unidades Pt-Co: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua N.D: No Detectable																			
Nota:	El IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																			
Elaboró:		Leonor Chacón Zárate				Revisó y Aprobó:		 CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas												

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

3.3.2 Diseño de mezcla

Se realizaron dos diseños de mezcla, uno para probetas con vidrio y solución de NaOH como agua de mezcla y otro para probetas sin vidrio y con agua potable. Se fabricaron un total de treinta y dos probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud, con un volumen $V = 0,01571 \text{ m}^3$ y relación agua cemento de 0.5.

3.3.3 Elaboración de las probetas

Los materiales se pesaron previamente de acuerdo a los resultados del diseño de mezcla. Luego se agregaron los materiales finos arena y cemento para las probetas inocuas, y, arena, cemento y vidrio para las probetas alteradas, esto se hizo 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 (agua sola y solución de NaOH respectivamente), se incorporaron hasta obtener una mezcla uniforme.

Para la fabricación de las probetas, se usaron moldes plásticos cilíndricos prefabricados. Los moldes se recubrieron con una capa de ACPM para evitar que el concreto se adhiera a las paredes del molde y facilitar el desmoldeo de la probeta. Luego el llenado de los moldes se hizo agregando mezcla de concreto, y apisonando cada 1/3 de mezcla adicionado. Se apisono 25 veces con una varilla metálica como lo indica la norma NTC 550^[21], y se termina de preparar la probeta con un palustre para darle uniformidad a la superficie. Luego se procedió a golpear el costado del molde con un martillo de caucho, esto con el propósito de sacar el aire atrapado y obtener un concreto más compacto.

De las treinta y dos probetas, a dieciséis se les adicionó vidrio y NaOH al agua de mezcla, y las otras dieciséis se fabricaron con mezcla inocua. Dentro de la cámara se colocaron dieciséis probetas con mezcla alterada a humedad mayor al 80% y temperatura entre 32-35°C; por otro lado en una cuba de acrílico con 100% de humedad se colocaron dieciséis probetas con mezcla inocua.

De las probetas fabricadas se dejaron cuatro probetas testigo para medición de cambios dimensionales y velocidad de pulso ultrasónico durante las ocho semanas de pruebas, dos inocuas (I1 e I2) en la cuba y dos alteradas (A3 y A4) dentro de la cámara.

3.3.4 Fraguado y Curado

Terminado el llenado de los moldes para la fase inicial de hidratación (Fraguado) se ubican las probetas en condiciones estándar y se dejan durante 24 horas.

Figura 6. Fraguado de las probetas al ambiente



Fuente. Los Autores

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

Después dieciséis probetas alteradas se colocaron en la cámara en condiciones de reacción acelerada para su respectivo curado; y, dieciséis probetas inocuas se colocaron en condiciones estándar según lo indica la norma NTC 1377^[22] (100% humedad y temperatura ambiente) durante 28 días.

Figura 7. Curado de probetas en cámara



Fuente. Los Autores

Figura 8. Curado de probetas en condiciones estándar



Fuente. Los Autores

3.4. ETAPA 4: Exposición de las probetas al ambiente de reacción acelerada

Después de las 24 horas de fraguado se colocaron dieciséis probetas con mezcla alterada, estos dieciséis especímenes se dejaron en condiciones de temperatura y humedad dentro de la cámara hasta finalizar las pruebas.

Mientras dieciséis probetas con mezcla inocua se colocaron en la cuba con 100% de humedad durante los 28 días, para luego dejarlas al ambiente hasta finalizar pruebas.

3.5 ETAPA 5: Ensayos experimentales a muestras con y sin exposición a ARS acelerada

Se programó la realización de pruebas cada 15 días, iniciando desde el día cero (transcurridas las 24 horas de fraguado) hasta el día 60.

Con el propósito de evaluar la expansión generada en el material por la ocurrencia de la reacción álcali-sílice se realizaron las siguientes pruebas: Inspección Visual, Cambios dimensionales, Resistencia a la Compresión, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Difracción de Rayos X y Porosidad.

3.5.1 inspección Visual

Esta prueba se realizó a las probetas testigo desde el día cero para observar su estado inicial, y cada 15 días para ver si había variaciones en ellas, las cuales se pudieran observar a simple vista.

3.5.2 Cambios Dimensionales

Con el propósito de determinar la expansión en las probetas se tomó medidas de longitud y diámetro usando un calibrador digital con una exactitud de una centésima de milímetro, marca UPM (United Precision Machine, Inc). Esta prueba se le hizo a las probetas testigo (I1, I2, A3, A4), y, se tomó tres medidas de diámetro y tres de longitud por cada probeta testigo.

Figura 9. Calibrador digital utilizado para tomar medidas en las probetas testigo



Fuente. Los Autores

3.5.3 Resistencia a la Compresión

Este ensayo se aplicó bajo la norma ASTM C39/C39M^[3] a tres probetas de concreto con mezcla alterada y tres con mezcla inocua diferentes en cada día de prueba, ya que es un ensayo destructivo. En total se destinaron doce probetas alteradas y doce probetas inocuas para este ensayo.

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.

Figura 10. Máquina de ensayo AMSLER



Fuente. Los Autores

3.5.4 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 bajo la norma ASTM C597^[1]. Para hacer las mediciones de VPU se utilizaron las probetas testigo (I1, I2, A3, A4).

Figura 11. Equipo de ultrasonido



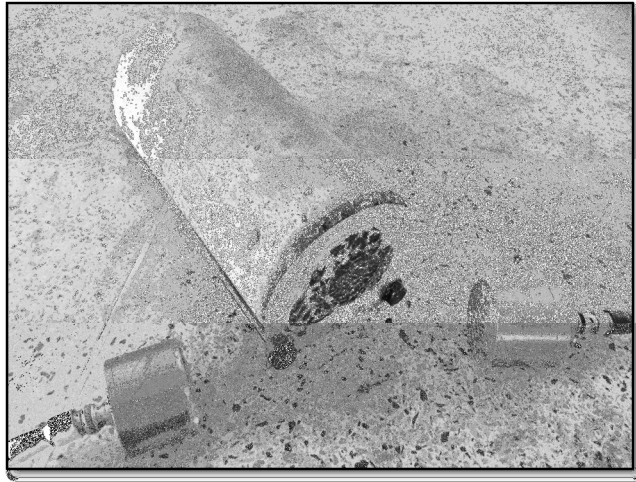
Fuente. Los Autores

Para realizar el ensayo se pulieron las superficies de las caras de las probetas donde fueron ubicados los transductores, teniendo en cuenta que las caras deben quedar perfectamente planas. 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.

Es importante verificar que la batería este por encima de un valor igual a 9.2, esto para obtener lecturas confiables del equipo de VPU.

Antes de empezar a tomar datos, se debe calibrar el equipo, para esto se aplicaacoplante (vaselina blanca) a los transductores y se ponen en contacto; luego 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. Para la medición de VPU se utiliza una guía (soporte para la probeta de concreto) fabricada en acrílico cuya función es sostener los transductores y ubicarlos uno en frente del otro, ya que se usó el mecanismo de transmisión directa.

Figura 12. Probeta sobre el soporte acrílico y transductores



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.

3.6 ETAPA 6: Análisis de Resultados

En esta etapa se analizan los datos obtenidos en las pruebas realizadas y se correlacionan con la finalidad de evaluar los cambios ocurridos en el concreto debido a la expansión generada por la ocurrencia de la ASR.

3.7 ETAPA 7: Elaboración del Informe Final

Se realiza un informe de la investigación que contiene con detalle marco teórico, metodología, resultados, análisis de los resultados, conclusiones y recomendaciones a partir de la investigación y el trabajo experimental realizado.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta parte del informe se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales, el diseño de mezcla, los ensayos realizados como son inspección visual, cambios dimensionales, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, fluorescencia y difracción de rayos X, espectroscopia de energía dispersiva y porosidad de las probetas. Además se hace el análisis de estos resultados y se establecen algunas relaciones.

4.1 Caracterización de la materia prima

4.1.1 Cemento

Se tomó una muestra del cemento Portland Tipo I utilizado en la mezcla de concreto, se analizó por Fluorescencia de Rayos X para determinar su composición, y así conocer la cantidad de álcalis presentes utilizando la ecuación 1. Los resultados de este análisis se presentan en el anexo D.

Tabla 2. Resultados del análisis del cemento por la Técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva

Composición					
Nombre	Analito(óxido)	Resultado (%)	Analito	Resultado (%)	Des. Estándar
Calcio	CaO	48.57	Ca	34.69	0.07
Silicio	SiO ₂	13.07	Si	6.11	0.06
Aluminio	Al ₂ O ₃	3.65	Al	1.93	0.05
Azufre	SO ₃	2.621	S	1.048	0.017
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.098	Fe	1.467	0.011
Magnesio	MgO	2.02	Mg	1.22	0.07
Titanio	TiO ₂	0.199	Ti	0.120	0.009
Potasio	K ₂ O	0.146	K	0.122	0.008
Estroncio	SrO	0.146	Sr	0.124	0.001
Cromo	Cr ₂ O ₃	0.023	Cr	0.016	0.004
Manganeso	MnO	0.021	Mn	0.016	0.003
Níquel	NiO	0.017	Ni	0.013	0.001
Cobre	CuO	0.016	Cu	0.013	0.001

Fuente. Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X. Centro de Desarrollo Productivo de Joyería

Los álcalis se calculan con base al óxido de potasio, ya que el análisis del cemento no demostró presencia de óxido de sodio:

$$(Na_2O)_{eq} = 0,658 \times (0,146) = 0,096$$

Para que la ASR se lleve a cabo deben existir en el cemento los álcalis suficientes que interactúen con el material silíceo de los agregados, estos álcalis deben ser principalmente de sodio y potasio. A partir de la composición del cemento, observamos que no hay presencia de óxido de sodio, y que la cantidad de álcalis aportada por el óxido de potasio es muy pequeña, lo cual no favoreció en gran proporción el desarrollo de la ASR, ya que las expansiones son mayores cuando se utiliza cemento con alto contenido de álcalis, superior al 0,6%.

4.1.2 Agregados Fino y Grueso

En la Tabla 3 se presentan las características principales de los agregados fino y grueso, obtenidos en la caracterización de los mismos.

Tabla 3. Características del agregado fino y grueso

	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso unitario suelto [Kg/m ³]	1373,02	1466,66
Peso unitario compactado [Kg/m ³]	1585,04	1592,24
% Absorción	2,249	1,419
% Vacíos	40,07	39
Gravedad específica real	2,747	2,672
Gravedad específica aparente	2,587	2,574
Gravedad específica aparente SSS	2,645	2,611

Fuente. Los Autores

Se realizó la distribución granulométrica para la arena con el fin de conocer su módulo de finura calculado por medio de la ecuación 3. La distribución respectiva se muestra a continuación:

Tabla 4. Análisis granulométrico para el agregado fino

Tamiz	Peso Retenido [g]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
4	52,8	5,28	5,28	94,72
8	48,1	4,81	10,09	89,91
16	104,3	10,43	20,52	79,48
30	228,4	22,84	43,36	56,64
50	238,9	23,89	67,25	32,75
100	260,6	26,06	93,31	6,69
Bandeja	63	6,3	99,61	0,39
Peso Muestra				1000 [g]

Fuente. Los Autores

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\sum \% \text{Retenido Acumulado (antes de la bandeja)}}{100} \quad (3)$$

$$\text{Módulo de Finura} = 2.4$$

4.1.3 Vidrio

También se realizó el análisis granulométrico para el vidrio utilizado en la mezcla de concreto, y su módulo de finura se determinó con la ecuación 3.

Tabla 5. Análisis granulométrico para el vidrio

Tamiz TYLER	Peso Retenido [g]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
10	62	11,88	11,88	88,12
20	26	4,98	16,86	83,14
35	38	7,28	24,14	75,86
50	87,1	16,69	40,83	59,17
100	134,2	25,72	66,55	33,45
140	73	13,99	80,54	19,46
200	50,7	9,72	90,26	9,74
Bandeja	50,8	9,74	100	0
Peso Muestra				500 [g]

Fuente. Los Autores

$$\text{Módulo de Finura} = 3.3$$

Con el módulo de finura igual a 3,3 indica que las partículas de vidrio son más finas que las partículas de arena, lo que hace que haya una mayor relación superficie/volumen permitiendo mayor disponibilidad de sílice para reaccionar con los álcalis del material.

Se tomó una muestra del vidrio molido, y se hizo un análisis de composición por medio de la técnica de Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS). A continuación se muestran los resultados del análisis hecho a nueve puntos o regiones (R) diferentes del mismo vidrio molido. Los detalles de esta prueba se muestran en el anexo F.

Tabla 6. Análisis elemental del vidrio utilizado en la mezcla de concreto

Elemento	Procedencia	Porcentaje en Peso [%]								
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Oxígeno (O)	SiO ₂	44,47	58,48	48,66	44,27	43,95	53,82	53,66	2,79	56,06
Sodio (Na)	Albita	7,37	8,91	5,00	6,61	7,38	8,48	7,78		8,89
Magnesio (Mg)	MgO	1,67	1,42	1,18	1,88	1,73	1,82	1,75		1,99
Aluminio (Al)	Al ₂ O ₃	0,40	1,14		0,41	0,91		0,43		0,31
Silicio (Si)	SiO ₂	37,51	25,30	18,93	38,14	38,72	30,38	30,85	1,05	28,20
Potasio (K)	MAD-10 Feldespato			1,11		0,81				
Calcio (Ca)	Wollastonita	8,58	4,75	13,65	8,69	6,51	5,50	5,53		4,56
Azufre (S)	FeS ₂			10,27						
Hierro (Fe)	Fe			1,20					76,79	
Cromo (Cr)	Cr								9,76	
Carbono (C)	CaCO ₃								9,61	

Fuente. Espectrometría de Energía Dispersiva. Universidad de Antioquía

A partir de los resultados obtenidos del análisis del vidrio, se observa que hay mayor presencia de O, Na, Mg, Al, Si y Ca. A su vez, el O y Si se encuentran en mayores proporciones, seguidos del Ca y Na, lo cual es de esperarse ya que el vidrio está compuesto en su mayoría de sílice, carbonatos de sodio y calcio, lo cual le da el carácter amorfo.

4.2 Diseño de Mezcla

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización de la materia prima se obtuvo el diseño de mezcla para fabricar 32 probetas de concreto con un volumen por probeta igual a 0.001571 m^3 .

Tabla 7. Diseño de mezcla para 16 probetas inocuas

MATERIAL	Relación Agua/Cemento=0.5
	Peso [Kg]
AGUA	5.323
CEMENTO	10.646
GRAVA	27.692
ARENA	18.274

Fuente. Los Autores

Tabla 8. Diseño de mezcla para 16 probetas alteradas

MATERIAL	Relación Agua/Cemento=0.5
	Peso [Kg]
AGUA	5.323
CEMENTO	10.646
GRAVA	27.692
ARENA	16.446
VIDRIO	1.827
NaOH	0.133

Fuente. Los Autores

El vidrio se utilizó como agregado fino para la mezcla, y, la cantidad adicionada se determinó por el rango de valores de árido reactivo en los cuales comienza la expansión, según la bibliografía consultada se determinó que este valor fuera del 10% de la cantidad total de agregado fino necesario para la mezcla. [24]

La cantidad de NaOH es de 1.25% en base a la cantidad de cemento utilizada para hacer la mezcla de concreto, según la bibliografía consultada. [2]

4.3 Ensayos Experimentales

En esta etapa se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de inspección visual, cambios dimensionales, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, difracción de rayos X y porosidad realizadas.

4.3.1 Inspección Visual

- **Cambios Superficiales**

Durante las ocho semanas de prueba no se observó cambios ni daños superficiales en las muestras de concreto.

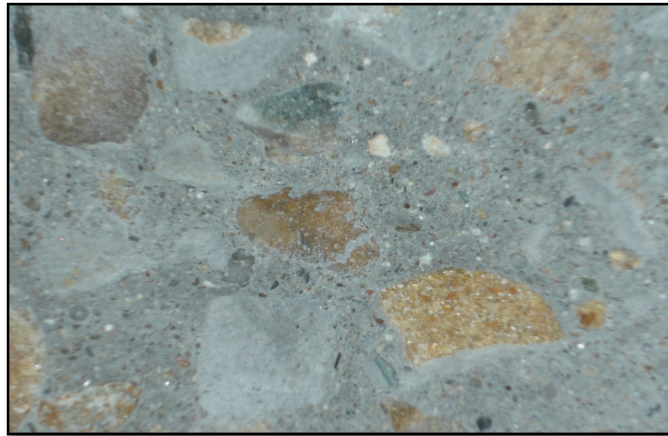
- **Expansiones**

Transcurridas las primeras dos semanas y al realizar el ensayo de compresión se observó que las probetas con adición de vidrio y NaOH en el agua de mezcla se habían expandido, ya que los especímenes no encajaban en los soportes circulares para hacer éste ensayo, por lo cual fue necesario pulir un poco los bordes de las probetas para que quedaran precisas en los soportes. Es decir, se presentó expansión en toda la muestra de concreto, lo que sugiere que se desarrolló de manera uniforme afectando todo el espécimen. Por otro lado, las probetas inocuas no tuvieron los cambios expansivos mencionados anteriormente.

- **Formación de Gel**

Al finalizar las pruebas se tomó una probeta inocua y una alterada para hacer un corte longitudinal en cada una y observar su interior. Lo cual no arrojó observación alguna de la formación del gel producto de la ASR.

Figura 13. Apariencia interna de probeta inocua



Fuente. Los Autores

Figura 14. Apariencia interna de probeta alterada



Fuente. Los Autores

Se observa en las figuras 13 y 14 diferencia de coloración en el interior de cada uno de los especímenes; la probeta que fue alterada presenta una coloración más oscura en comparación con la probeta inocua. Debido a la diferencia de humedad en cada uno de los medios en los cuales fueron expuestas.

4.3.2 Cambios dimensionales

Para la determinación de los cambios dimensionales que tuvieron los especímenes por la expansión generada por el desarrollo de la ASR, en las probetas alteradas y en las inocuas se tomó registro de longitudes y diámetros de las cuatro probetas destinadas a este propósito durante toda la fase experimental, registrándose el valor promedio medido en cada probeta, y luego se toma el valor promedio entre los dos elementos de prueba testigo, con ésta información se halló el porcentaje de expansión tanto en longitud como en diámetro. Los valores obtenidos se muestran en las tablas 9 y 10, y, las variaciones en expansión tanto en longitud como en diámetro se presentan en las gráficas 1 y 2.

Tabla 9. Registro de longitudes, longitud promedio y % de expansión

Longitudes [mm]								
Semana	I1	I2	Promedio	% Expansión	A3	A4	Promedio	% Expansión
0	206,44	206,45	206,45	0,00	206,34	206,33	206,33	0,00
2	207,53	205,99	206,76	0,15	208,35	206,93	207,64	0,63
4	207,47	206,07	206,77	0,16	208,33	206,45	207,39	0,51
6	207,37	206,01	206,69	0,12	208,17	206,54	207,36	0,50
8	207,31	205,95	206,63	0,09	208,20	206,65	207,42	0,53

Fuente. Los Autores

Gráfica 1. Porcentaje de expansión en longitud de las probetas inocuas y alteradas

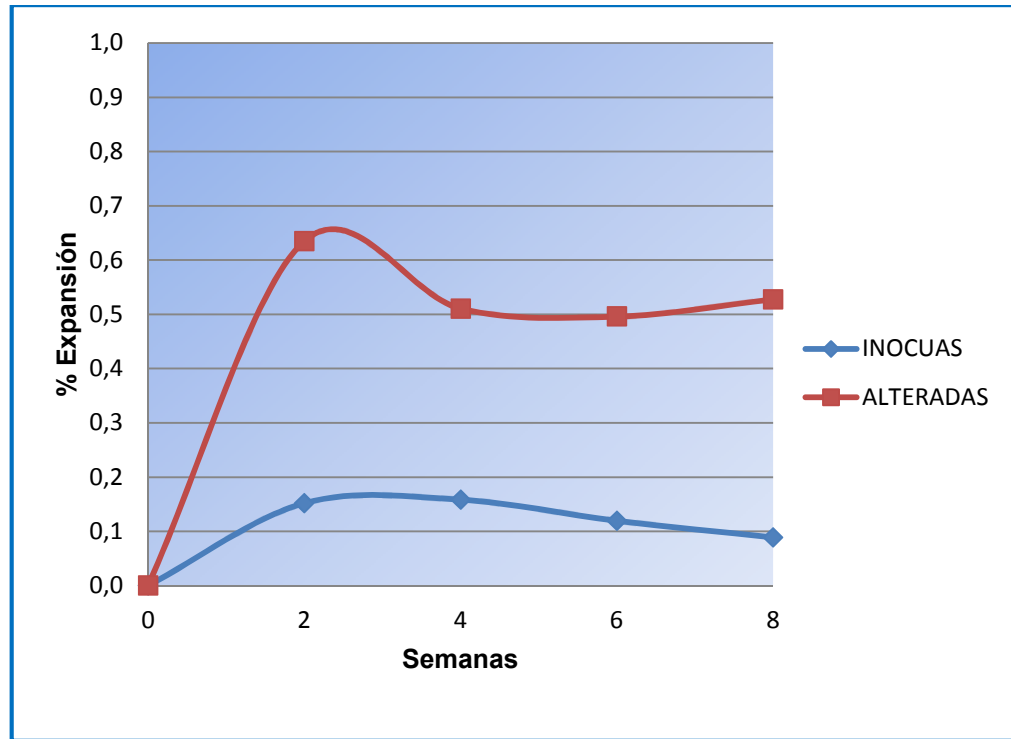
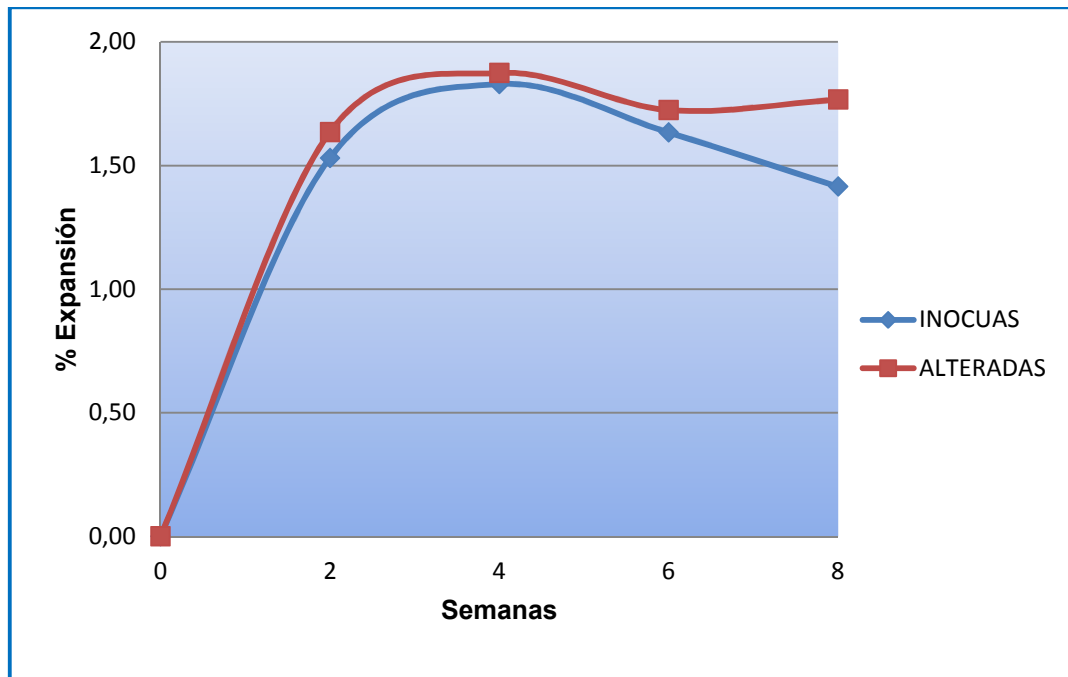


Tabla 10. Registro de diámetros, diámetro promedio y % de expansión

Diámetros [mm]								
Semana	I1	I2	Promedio	%Expansión	A3	A4	Promedio	%Expansión
0	102,12	102,17	102,15	0,00	102,09	102,27	102,18	0,00
2	103,71	103,72	103,71	1,53	103,66	104,04	103,85	1,63
4	104,14	103,90	104,02	1,83	104,33	103,86	104,10	1,87
6	103,86	103,77	103,82	1,63	104,04	103,85	103,94	1,72
8	103,66	103,53	103,59	1,41	103,86	104,11	103,99	1,77

Fuente. Los Autores

Gráfica 2. Porcentaje de expansión en diámetro de las probetas inocuas y alteradas



De las gráficas 1 y 2 se puede observar que las expansiones en las dos primeras semanas de pruebas fueron más notorias, y, mayores para las probetas alteradas con adición de vidrio y NaOH en al agua de mezcla y mantenidas a temperatura de 32°C y humedad mayor al 80%, que para las probetas inocuas. Esto debido a las reacciones de hidratación del concreto a edades tempranas, también que cuando las muestras son mantenidas húmedas, como en la cámara, la velocidad de crecimiento de gel y por lo tanto la expansión, está controlada por la velocidad de la reacción química, porque el gel consigue el agua que necesita, y además, a la disponibilidad inicial que se tiene de los álcalis aportados por el NaOH y el cemento para reaccionar con el material reactivo, en este caso el vidrio y los agregados. Hacia la semana 8, las expansiones aunque no fueron mayores que al principio siguen la tendencia de aumentar para las probetas alteradas y disminuir

para las probetas inocuas tanto en longitud como en diámetro a medida que aumenta el tiempo de exposición.

4.3.3 Resistencia a la compresión

Se destinaron 12 probetas alteradas y 12 inocuas, distribuidas en 6 probetas falladas por cada sesión de pruebas. El cálculo del valor de resistencia máxima a la compresión $f'c$ se hace mediante la ecuación 4, 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.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Los resultados de éste cálculo para las probetas inocuas y alteradas, y su promedio se presentan en lastablas 11 y 12 respectivamente.

Tabla 11. Resistencia a la compresión de las probetas inocuas

Resistencia a la Compresión [MPa]				
Semana	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
2	28,690	29,795	23,778	27,421
4	27,636	28,244	27,213	27,698
6	36,856	39,600	34,716	37,058
8	38,901	35,702	35,339	36,647

Fuente. Los Autores

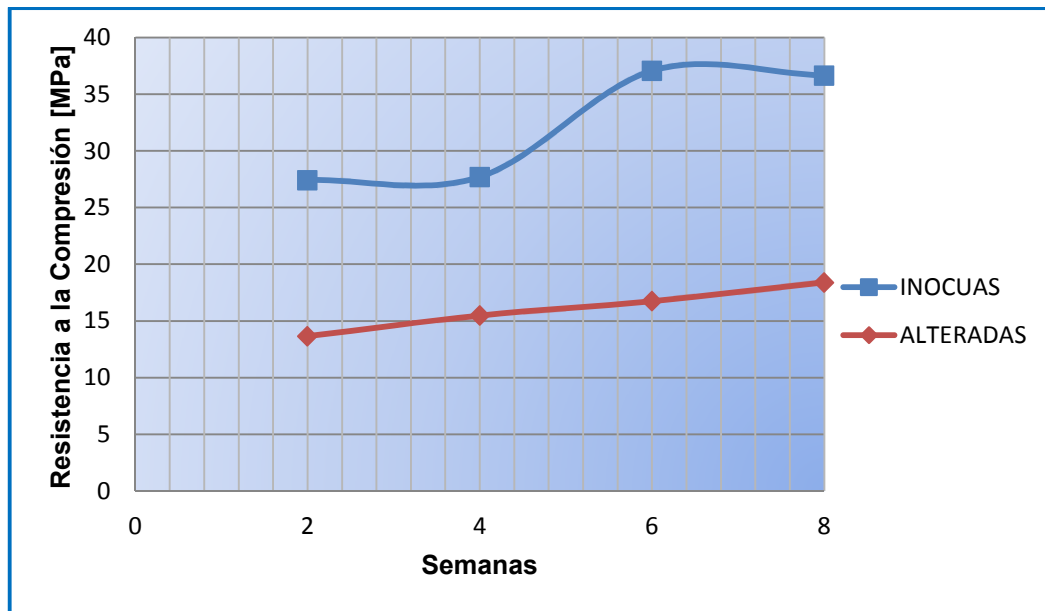
Tabla 12. Resistencia a la compresión de las probetas alteradas

Resistencia a la Compresión [MPa]				
Semana	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
2	13,898	14,118	12,959	13,658
4	15,068	15,201	16,165	15,478
6	17,963	17,727	14,545	16,745
8	17,105	16,023	22,070	18,399

Fuente. Los Autores

El comportamiento de la resistencia a la compresión promedio se muestra en la gráfica3, a continuación:

Grafica 3. Variación de la resistencia a la compresión para las probetas alteradas e inocuas al transcurrir el tiempo en condiciones de ASR acelerada y condiciones estándar



A partir de la gráfica 3 se observa que la resistencia a la compresión tiene un comportamiento ascendente tanto para las probetas inocuas como para las alteradas a medida que transcurre la edad de las mismas. Sin embargo, es evidente la diferencia en los valores, debido a que las probetas alteradas tienen una menor resistencia que las inocuas, esto se explica por la adición de vidrio en las muestras alteradas, ya que disminuye la fuerza de adhesión entre la superficie de las partículas de vidrio y el cemento.

4.3.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Para esta prueba se destinaron cuatro probetas durante toda la fase experimental, a las cuales se les tomaron lecturas de tiempo de vuelo; con este valor y la longitud de las probetas se determinó la velocidad de pulso ultrasónico para cada una de ellas usando la ecuación 2.

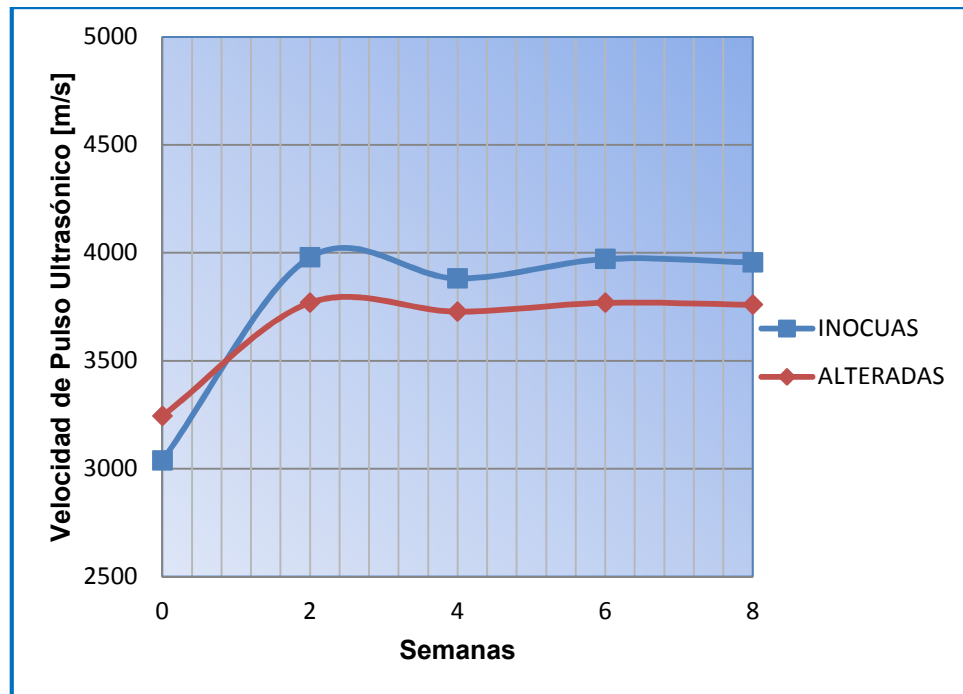
En la tabla 13 se presenta el registro de las velocidades obtenidas para cada probeta en cada sesión de pruebas, y el promedio de ellas.

Tabla 13. Valores de VPU para las probetas en cada tiempo de prueba

Velocidad de Pulso Ultrasónico [m/s]						
Semana	I1	I2	Promedio	A3	A4	Promedio
0	3041,149	3035,980	3038,565	3256,234	3232,324	3244,279
2	3989,683	3967,640	3978,662	3757,499	3779,604	3768,552
4	3893,775	3868,648	3881,212	3734,568	3720,877	3727,723
6	3971,401	3970,639	3971,020	3783,762	3753,059	3768,411
8	3947,445	3963,117	3955,281	3763,724	3754,936	3759,330

Fuente. Los Autores

Gráfica 4. Comportamiento de la VPU para las probetas alteradas e inocuas en condiciones de ASR acelerada y condiciones estándar



En la gráfica 4 se muestra el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico promedio de las probetas en condiciones de ASR acelerada y las probetas en condiciones estándar. En ésta gráfica se observa que esta técnica es sensible a las alteraciones en la mezcla de las probetas que estuvieron en la cámara en comparación con las probetas inocuas, así como también se observaron las diferencias en la resistencia a la compresión en la gráfica 3.

Las probetas inocuas muestran un comportamiento de aumentar la velocidad del pulso a medida que transcurre el tiempo de pruebas, pero, por otra parte las probetas alteradas, primero tienen una mayor velocidad, pero esta sigue una tendencia descendente a medida que transcurre el tiempo de exposición a condiciones de temperatura y humedad controladas, que favorecen la expansión desarrollada por efecto de la ASR, lo cual también influye en la velocidad, y,

además la adición del agregado reactivo como el vidrio tiene influencia en la velocidad medida, ya que está tiende a decrecer cuando se usa agregados reactivos.

4.3.5 Difracción de Rayos X

Se destinaron dos probetas, una inocua (I1) y una alterada (A4) para análisis de difracción de rayos X, las características de este ensayo se presentan en el anexo C.

En las tablas 14 y 15 se muestran los resultados del análisis de las probetas testigo I1 y A4 respectivamente.

Tabla 14. Análisis de Difracción de Rayos X probeta I1

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO %
CRISTALINOS	SiO_2	Cuarzo	28,8
	CaCO_3	Calcita	9,7
	$\text{Na (AlSi}_3\text{O}_8)$	Albita	11,2
	$\text{K Al}_2(\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Moscovita	12,1
	Ca (OH)_2	Portlandita	4,4
	$\text{Ca}_6(\text{Al (OH)}_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{26}$	Ettringita	2,6
	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	5,9
	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Caolinita	N.C
	$(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Clinocloro	4,0
	$\text{K(Al,Fe)Si}_2\text{O}_8$	Ortoclasa	6,3
	Ca_2SiO_4	Lamita	3,6
	Total Cristalinos		
Amorfos y otros			11.4

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

Tabla 15. Análisis de Difracción de Rayos X probeta A4

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO %
CRISTALINOS	SiO_2	Cuarzo	19.8
	CaCO_3	Calcita	15.3
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02}) (\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$	Albita	9.5
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	10.8
	$\text{Ca} (\text{OH})_2$	Portlandita	3.4
	$\text{Ca}_6 (\text{Al} (\text{OH})_6)_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{H}_2\text{O})_{26}$	Ettringita	2.8
	$\text{Ca SO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	4.0
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	Caolinita	N.C
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	Clinocloro	3.9
	$\text{K} (\text{Al, Fe}) \text{Si}_2 \text{O}_8$	Ortoclasa	8.0
	$\text{Ca}_2 \text{SiO}_4$	Lamita	4.8
Total Cristalinos			82.3
Amorfos y otros			17.7

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

A partir de los resultados que se muestran en las tablas 13 y 14, se observa que no hay variación significativa en las fases cristalinas presentes en las muestras de concreto inocua y alterada. Sin embargo se evidencia una diferencia en la cantidad de amorfos presentes, debido a la adición de vidrio en las muestras alteradas.

4.3.6 Ensayo de Porosidad

Se destinaron dos probetas, una inocua (I2) y una alterada (A3) para el ensayo de porosidad, el cual se realizó utilizando un porosímetro marca CORE PET, las características de este ensayo se presentan en el anexo E.

Figura 15. Equipo utilizado en el ensayo de porosidad



Fuente. Los Autores

De cada probeta se extrajeron dos núcleos de 1 pulgada de diámetro y 1.5 pulgada de longitud. Para obtener el volumen total de cada cilindro, se tomaron cuatro medidas de diámetro y cuatro medidas de longitud, utilizando para los cálculos, el promedio de las cuatro medidas en cada dimensión, estos datos se presentan en el anexo E.

Tabla 16. Diámetro y longitud promedio, y, volumen total de cada muestra

	I2 (1)		I2 (2)		A3 (1)		A3 (2)	
	D [cm]	L [cm]	D [cm]	L [cm]	D [cm]	L [cm]	D [cm]	L [cm]
Promedio	2,53	3,74	2,53	3,84	2,50	4,17	2,54	3,98
Volumen Total [cm ³]	18,80		19,30		20,47		20,17	

Fuente. Los Autores

Con los volúmenes y las presiones medidas con el equipo se obtiene el valor de X, y, con este valor se calcula el volumen de grano (Vg), y, finalmente se obtiene el valor de la porosidad del concreto en porcentaje (%). Los datos y las fórmulas utilizadas para estos cálculos se muestran en el anexo E.

Tabla 17. Valores de X, volumen de grano y porcentaje de porosidad para cada muestra ensayada

	I2 (1)	I2 (2)	A3 (1)	A3 (2)
X	2,44	2,43	4,60	5,09
Volumen de grano (Vg)	17,09	17,11	18,07	17,57
Porosidad α [%]	9,065	11,357	11,724	12,849
Promedio α [%]	10,211		12,287	

Fuente. Los Autores

Con los resultados obtenidos, luego de realizar el ensayo de porosidad, se observa que el concreto fabricado con adición de vidrio y NaOH en el agua de mezcla, tiene un porcentaje de porosidad igual a 12,287%, mayor a la porosidad del concreto con mezcla normal. Lo cual da validez a que la VPU en las muestras alteradas sean menores en comparación con las muestras inocuas, además, esta porosidad se ve influenciada por la adición de vidrio, lo cual también influye en la resistencia a la compresión.

4.4 Relación entre la Expansión y la Velocidad del Pulso Ultrasónico

Con los valores obtenidos de porcentajes de expansión en longitud y diámetro se grafican respecto los valores de velocidad de pulso ultrasónico promedio de las probetas testigos inocuas y alteradas que se utilizaron a lo largo de toda la fase experimental.

En las tablas 18 y 19 se muestran los valores utilizados para graficar expansión y VPU.

Tabla 18. Porcentajes de expansión en longitud y diámetro, y, velocidad de pulso ultrasónico en las probetas inocuas en cada sesión de pruebas

INOCUAS			
Semana	Expansión [%] Longitud	Expansión [%] Diámetro	VPU Promedio [m/s]
2	0,15	1,53	3978,662
4	0,16	1,83	3881,212
6	0,12	1,63	3971,020
8	0,09	1,41	3955,281

Fuente. Los Autores

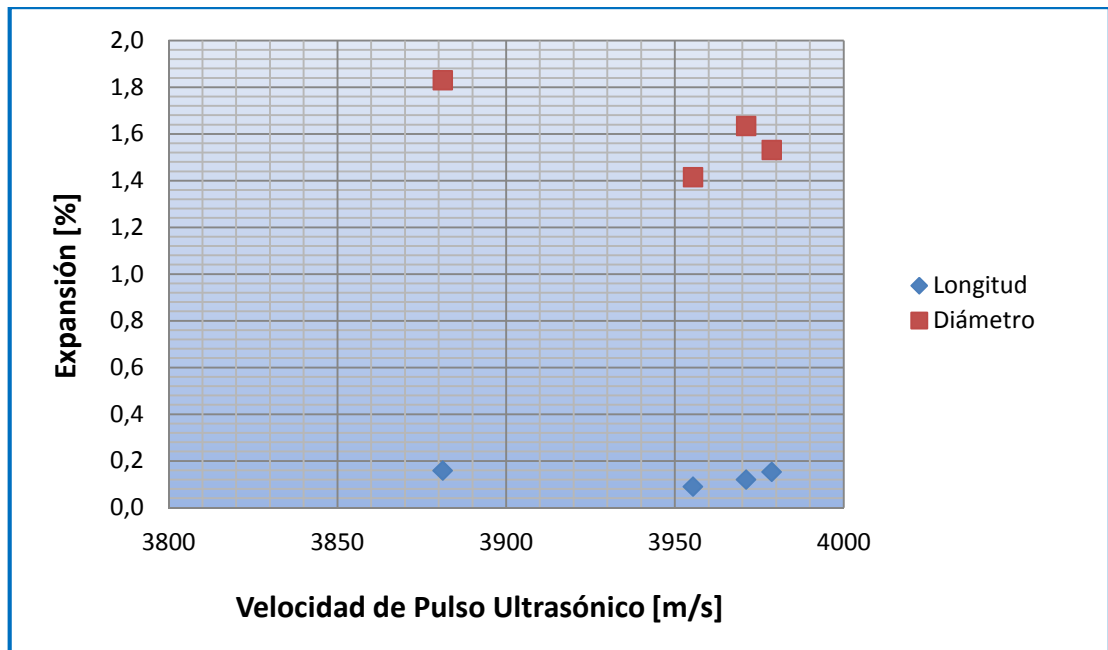
Tabla 19. Porcentajes de expansión en longitud y diámetro, y, velocidad de pulso ultrasónico en las probetas alteradas en cada sesión de pruebas

ALTERADAS			
Semana	Expansión [%] Longitud	Expansión [%] Diámetro	VPU Promedio [m/s]
2	0,63	1,63	3768,552
4	0,51	1,87	3727,723
6	0,50	1,72	3768,411
8	0,53	1,77	3759,330

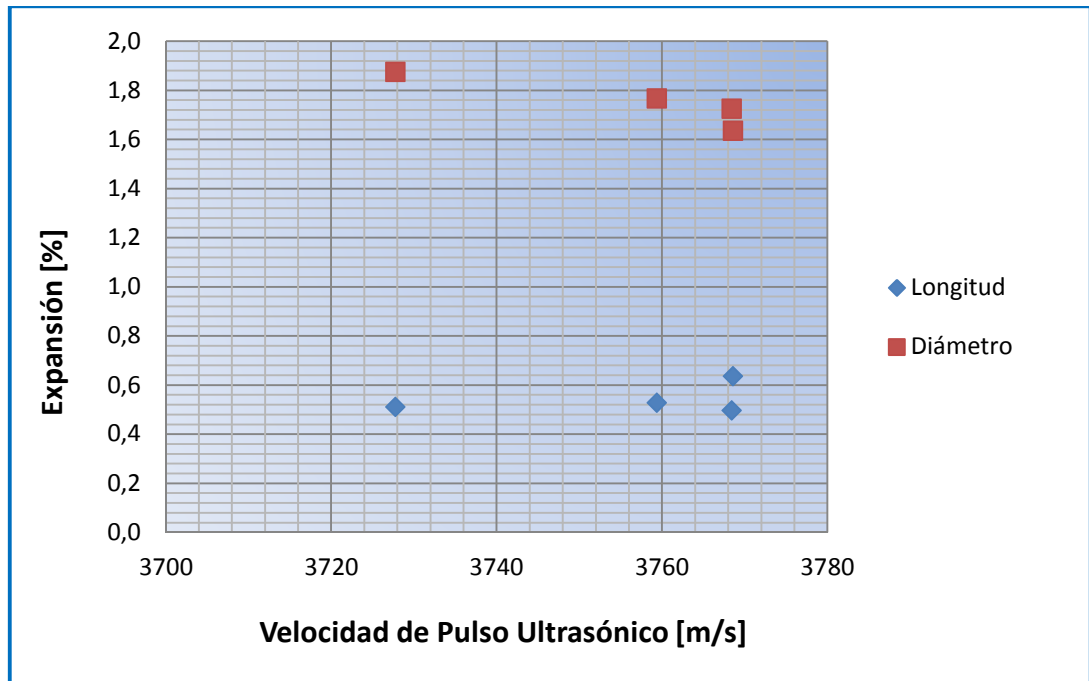
Fuente. Los Autores

Con esta información se gráfica el porcentaje de expansión en longitud y en diámetro vs la velocidad de pulso ultrasónico, como se muestra en las gráficas 5 y 6 para muestras inocuas y alteradas, respectivamente.

Gráfica 5. Relación entre la expansión en longitud y diámetro con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas inocuas



Gráfica 6. Relación entre la expansión en longitud y diámetro con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas alteradas



En los gráficos se observa la dispersión que existe entre los datos obtenidos en las mediciones de expansión y VPU, debido a que en las ocho semanas de pruebas sólo se obtuvieron cuatro datos, lo cual hace necesario que en estudios posteriores para esta reacción, la evaluación de las características se realice en un tiempo de exposición mayor, para así obtener un rango amplio de datos que permita establecer una relación más clara entre estas dos características.

Sin embargo, en los resultados obtenidos se observa la influencia que tienen los cambios de expansión en la velocidad del pulso, esto se observa en las gráficas 5 y 6, ya que para las probetas alteradas, las cuales tuvieron expansiones mayores en longitud como en diámetro, por efecto del desarrollo de la ASR, muestran valores de VPU entre 3700 y 3800 m/s, mientras que las probetas inocuas, las cuales no tuvieron expansiones considerables, tienen valores de VPU entre 3800 y 4000 m/s; es decir, que estas dos características son inversamente proporcionales, a mayores expansiones menores valores de VPU, y viceversa, lo que evidencia la sensibilidad que tiene la técnica de VPU a la expansión producto de la ASR.

4.5 Relación entre la Resistencia a la Compresión y la Velocidad de Pulso Ultrasonico

Se utilizaron los valores promedio de velocidad del pulso medido en las probetas testigo, durante toda la fase experimental, para relacionarlos con los valores promedio de resistencia a la compresión medidos en probetas destinadas para este ensayo, que estuvieron bajo las mismas condiciones en cada sesión de pruebas.

En las tablas 20 y 21 se muestran los valores utilizados para relacionar resistencia a la compresión y VPU.

Tabla 20. Valores promedio de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en las probetas inocuas

INOCUAS		
Semana	Resistencia a la Compresión Promedio [MPa]	VPU Promedio [m/s]
2	27,421	3978,662
4	27,698	3881,212
6	37,058	3971,020
8	36,647	3955,281

Fuente. Los Autores

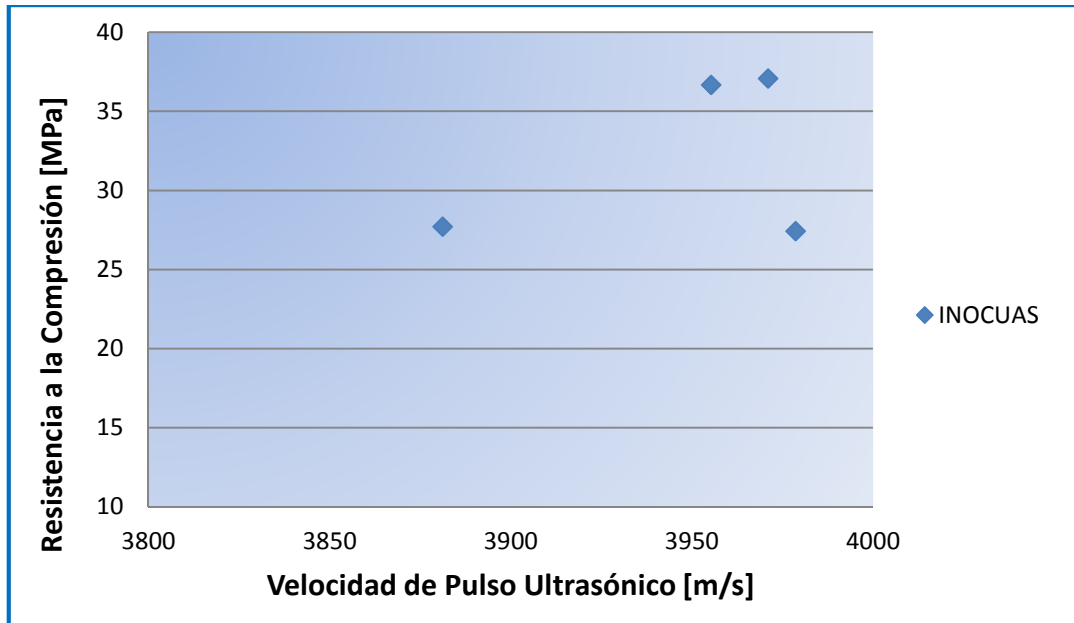
Tabla 21. Valores promedio de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en las probetas alteradas

ALTERADAS		
Semana	Resistencia a la Compresión Promedio[MPa]	VPU Promedio [m/s]
2	13,658	3768,552
4	15,478	3727,723
6	16,745	3768,411
8	18,399	3759,330

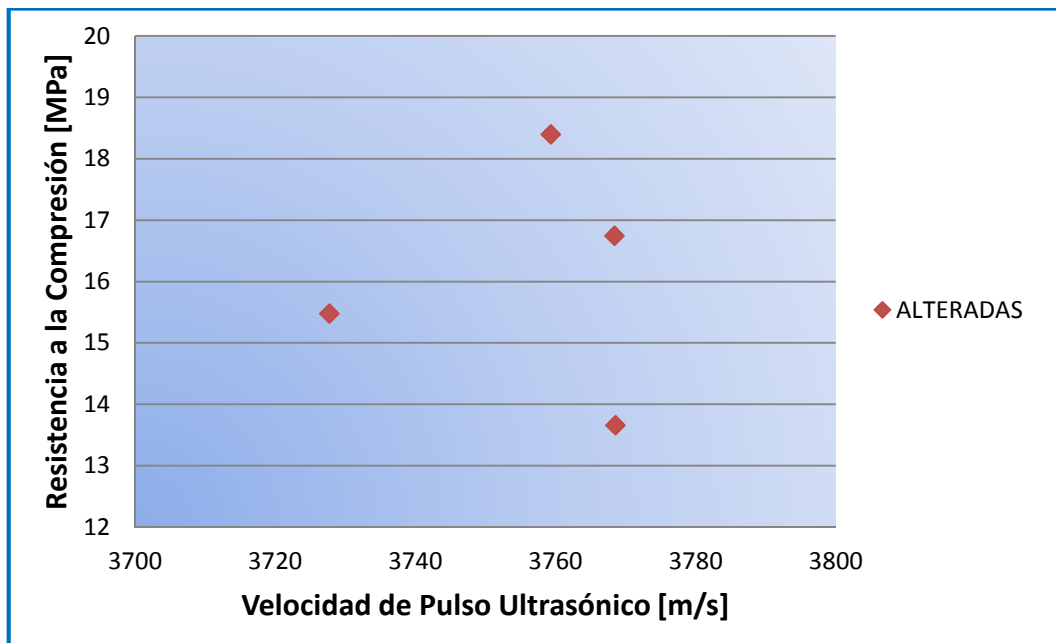
Fuente. Los Autores

En las gráficas 7 y 8 se observa la resistencia a la compresión con respecto a la VPU.

Gráfica 7. Relación entre la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas inocuas



Gráfica 8. Relación entre la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico para probetas alteradas



A partir de las gráficas 7 y 8 se observa que existe una gran dispersión entre los valores de resistencia a la compresión y VPU. A medida que transcurrió el tiempo de exposición la resistencia del concreto tanto para probetas inocuas como alteradas aumentaba, pero la VPU mostraba variaciones de acuerdo a la expansión que tenía el material, para las probetas inocuas aumentaba y para las alteradas disminuía, por esto no puede establecerse una relación clara entre estas dos características. Además por la dispersión y cantidad de los datos, no es posible dar un juicio de valor sobre el comportamiento de estas dos características en el material.

5. CONCLUSIONES

Luego de analizar los resultados obtenidos al evaluar la expansión en el concreto, producida por efecto de la reacción álcali sílice acelerada se puede concluir que:

Se evaluaron la expansión producida y la velocidad de pulso ultrasónico en las probetas inocuas y alteradas a lo largo de toda la fase experimental. En las probetas alteradas, la expansión generada por la reacción álcali sílice, aumentaba a medida que transcurría el tiempo de exposición, y, la velocidad de pulso ultrasónico mostró ser sensible a éste efecto, disminuyendo su magnitud. Mientras que las probetas inocuas no tuvieron apreciables expansiones, y, la magnitud de la VPU aumento a medida que transcurría el tiempo de exposición en condiciones estándar.

Se determinó la resistencia a la compresión de las probetas alteradas e inocuas, encontrándose que las probetas alteradas expuestas a condiciones de ASR acelerada tenían baja resistencia a la compresión, con valores entre 13 y 19 [MPa], en comparación con las probetas inocuas expuestas a condiciones estándar con valores entre 27 y 37 [MPa]. Esta propiedad del concreto, es afectada en las probetas alteradas, debido a que la presencia de vidrio, disminuye la resistencia a la compresión, lo cual es reportado en la bibliografía.

Se relacionó la expansión en longitud y diámetro de las probetas inocuas y alteradas con la VPU, encontrándose que a medida que la expansión aumenta, la VPU disminuye para el caso de las probetas alteradas, mientras que para las probetas inocuas, la cuales no tuvieron expansiones apreciables los valores de VPU fueron mayores. Por otro lado, no se observó una relación clara entre la resistencia a la compresión y la VPU, ya que esta última característica varía de

acuerdo a la expansión, para las probetas inocuas aumentaba, y para las probetas alteradas disminuía, mientras que la resistencia aumentaba para ambos casos a medida que transcurría el tiempo de exposición.

Se evaluaron los cambios en el concreto debido a las condiciones de reacción establecidas, y, a la adición de vidrio y NaOH, por medio de inspección visual, cambios dimensionales, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico a lo largo del desarrollo de esta investigación.

El ensayo de cambios dimensionales evidenció expansión cuando se utilizan agregados reactivos que interaccionan con los álcalis presentes en el cemento en la fabricación de concreto, y, su influencia en la velocidad de pulso ultrasónico, disminuyéndola, lo que comprueba lo reportado en la bibliografía.

6. RECOMENDACIONES

Seguir con el estudio de la velocidad de pulso ultrasónico en concretos afectados por la reacción álcali sílice, variando las condiciones de reacción establecidas y la proporción de agregado reactivo.

Evaluar el avance de la reacción álcali sílice por un tiempo de exposición mayor, que permita obtener más resultados para establecer relaciones claras entre expansión y resistencia a la compresión con la VPU.

Determinar la solubilidad del vidrio reciclado, debido a que el grado de reactividad depende de está, y a su vez, la solubilidad depende de su composición.

A partir del estudio realizado se recomienda un estudio de la reactividad de los agregados utilizados, por medio del método que presenta la norma ASTM C289-07. Adicionalmente hacer estudios de petrografía (norma ASTM C295) y difracción de rayos X a los agregados para conocer su génesis y características físico químicas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Significance and Use. ASTM C597 (2009).

[2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. ASTM C1293-08b.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39/C39M (2009).

[4] Asociación Colombiana de Productores de Concreto, ASOCRETO. Manual Tecnología y Propiedades. Segunda Edición, 1997.

[6] COTTIER CAVIEDES, Juan Luis, Efectos de la reacción álcali agregado en el concreto.

[7] Fournier, B. and Malhotra, V. M. Evaluation of Laboratory Test Methods for Alkali-Silica Reactivity. Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, Vol. 21, No. 2. Dec. 1999. p. 173–184.

[8] Guidebook on non destructive testing of concrete structures. Industrial Applications and Chemistry Section International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002. p. 100-107 ISSN 1018–5518.

[9] KUMAR MEHTA, P. Y MONTEIRO, Paulo J. Concrete. Microstructure, Properties and Materials. University of California at Berkeley. Third Edition. McGraw Hill. 2006. p. 3-8, 11-12, 27, 159, 207, 405.

[10] MALHOTRA V. M. (1985). Non-destructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.

[11] NEWMAN, John. Y SENG CHOO, Ban. Advanced Concrete Technology. Testing and Quality. Elsevier. 2003 p. 113, 116, 123.

[12] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Especificaciones para los Agregados para Concreto. NTC 174.

[13] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Método de Ensayo Para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos. NTC 77.

[14] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Método para Determinar por Lavado el Material que Pasa el Tamiz 75 μ m en Agregados Minerales. NTC 78.

[15] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Agua para la Elaboración de concreto. NTC 3459.

[16] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas. NTC 121.

[17] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Cemento Portland. Especificaciones Químicas. NTC 321.

[18] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Determinación de la Masa Unitaria y los Vacíos entre Partículas de Agregado Compactado. NTC 92.

- [19] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y Absorción del Agregado Grueso. NTC 176.
- [20] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y Absorción de Agregados Fino. NTC 237.
- [21] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra. NTC 550.
- [22] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayos de Laboratorio. NTC 1377.
- [23] PARK, Seung Bum. LEE, Bong Chun. KIM, Jeong Hwan. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. En: Cement and Concrete Research. February, 2004. p. 2181-2189.
- [24] POOLE, A.B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. Copyright 1992 Blackie and Son Ltd.
- [25] POUTOS, K.H. ALANI, A.M. WALDEN, P.J. SANGHA, C.M. Relative temperature changes within concrete made with recycled glass aggregate. Construction and Building Materials. 2008. p. 557–565.
- [26] RIVARD Patrice, SAINT-PIERRE Francois. Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive methods: From the lab to the field. Construction and Building Materials. 2009. p. 902-909.
- [27] SACCANI, Andrea. BIGNOZZI, Maria Chiara. ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. En: Cement and Concrete Research. 2010. p. 531-536.

[28] SEGARRA FORADADA, Judit, Envejecimiento de Presas por reacciones expansivas en hormigón, Tesis de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2005. Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3315>>

[29] Stark, David. Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsideration. Cement, Concrete, and Aggregates. CCAGDP, Vol. 2, No. 2. Winter 1980. p. 92-94.

[30] Swamy, R. N. and Wan, W. M. R. Use of Dynamic Nondestructive Test Methods to Monitor Concrete Deterioration Due to Alkali-Silica Reaction, Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, Vol. 15, No. 1. Summer 1993. p. 32-49.

[31] Swamy, R. N..The Alkali Silica Reaction in Concrete.Department of Mechanical and Process Engineering University of Sheffield.New York, 1992.

[32] TARUN, R. Naik. MALHOTRA, Mohan V. POPOVICS, John S. The Ultrasonic Pulse Velocity Method.

ANEXOS

ANEXO A. Cálculo para el diseño de mezcla

I. Selección del Asentamiento

El asentamiento del concreto es una característica que se relaciona con la cantidad de agua presente en la mezcla. A mayor asentamiento mayor fluidez (consistencia y plasticidad) tendrá la mezcla. En la tabla 1 se presentan valores de asentamientos.

Tabla 1. Asentamiento recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad

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 el enfoque de la investigación, se determinó un asentamiento para una consistencia media, con valores de asentamiento de 5.0 a 10 cm.

II. Selección del tamaño máximo de agregado

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

La formaleta utilizada tiene 200mm de longitud por 100mm de diámetro, así, con una dimensión mínima de 100 mm, se determinó el tamaño máximo de agregado a usar igual a $\frac{3}{4}$ de pulgada (19.05 mm).

III. Estimación del contenido de agua

El contenido de agua para un asentamiento dado, depende del tamaño máximo del agregado, la forma de las partículas y la gradación de los agregados.

Tabla 2. Agua en Kg por m³ de concreto para los tamaños máximos de agregado indicados

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento [cm]	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3.0-5.0	205	200	185	180	160	155	145
5.0-10.0	225	215	200	195	175	170	180
15.0-18.0	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire [%]	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

Teniendo en cuenta que el asentamiento para el diseño de mezcla se encontraba entre 5 y 10 cm y que el tamaño máximo de agregado seleccionado es 19.05 mm, el contenido de agua es igual a 202, esto por efecto de los decimales.

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 hacer el diseño de mezcla. Para este cálculo se usa la siguiente ecuación:

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

Para el caso de nuestro diseño, el contenido de cemento es $C = \frac{202}{0.5} = 404$ Kg por metro cúbico de concreto.

V. Estimación del contenido de agregado grueso

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

Tabla 3. Relación $\frac{b}{b_0}$, volumen de agregado grueso seco y compactado 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	3.0
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:

$$b = \frac{b}{b_o} \times b_o$$

Donde

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

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

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

El módulo de finura del agregado fino caracterizado para es 2.4 y el tamaño máximo del agregado grueso de 19.05 mm, usando la tabla 3 se determina la relación b/b_o igual a 0.66 y b_o igual a 1592,24.

Con los datos anteriores se puede estimar el contenido de agregado grueso $b=(0.66) \times 1592,24=1050,878$ Kg por metro cubico de concreto.

VI. Estimación del contenido de agregado fino

El cálculo del contenido de agregado fino se hace restando al volumen total (1m³=1000 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 se calcula a partir de los pesos hallados anteriormente y dividido por su respectiva densidad, así:

$$V_a = \text{Contenido de agua} / \text{Densidad del agua} = 202 \text{ L}$$

$$V_c = \text{Contenido de cemento} / \text{Densidad del cemento} = 133,33 \text{ L}$$

$$V_{ag} = \text{Contenido de agregado grueso} / \text{Densidad aparente SSS} = 402,48 \text{ L}$$

Entonces $V_{af} = 1000 - (202 + 133,33 + 402,48) = 262,2 \text{ L}$

Con el valor del volumen de agregado fino y su densidad aparente SSS, hallamos el contenido de agregado fino igual a 693,481 Kg por un metro cúbico de concreto.

Conocidos los pesos por metro cúbico de los materiales y para 16 probetas y volumen de molde igual a 0,001647 m³, se halla la dosificación como se muestra a continuación:

Tabla 4. Dosificación de la mezcla para 16 probetas

Constituyente	Masa [Kg] por m ³ de concreto	Masa [Kg] total probetas
Agua	202	5,323
Cemento	404	10,646
Agregado Grueso	1050,878	27,692
Agregado Fino	693,481	18,274

Fuente. Los Autores

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

DATOS

Para llevar control de la expansión por efecto de la ASR se tomaron medidas de altura, diámetro y tiempo de vuelo a las probetas testigo. En la tabla 1 se presenta un formato de registro de datos típico usado a lo largo de las pruebas para estas probetas.

Tabla 1. Formato de registro de datos para cambios dimensionales y velocidad de pulso ultrasónico

Semana 0	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Tiempo de Vuelo [μ s]			Promedio
A3	206,25	102,06	A	63,1	63,6	63,35
	206,35	102,12	F	64,7	63,7	64,2
	206,41	102,08	T	62,7	62,4	62,55
Promedio	206,34	102,09				63,36
I1	206,35	102,03	A	67,3	66,4	66,85
	206,53	102,15	F	68,4	68,4	68,4
	206,45	102,19	T	68,4	68,4	68,4
Promedio	206,44	102,12				67,88

Fuente. Los Autores

A unas probetas diferentes a las testigo se les hizo ensayo de resistencia a la compresión y se tomaron datos del diámetro promedio y la carga aplicada en la prueba, en la tabla 2 se muestra el formato de registro llevado para estos datos.

Tabla 2. Formato de registro de datos para resistencia a la compresión

PROBETAS ALTERADAS			PROBETAS INOCUAS	
Semana	Diámetro	Carga	Diámetro	Carga
0	promedio [mm]	aplicada [Kgf]	promedio [mm]	aplicada [Kgf]
Probeta 1	103,83	12000	103,68	24700
Probeta 2	104,30	12300	103,78	25700
Probeta 3	103,65	11150	103,50	20400

Fuente. Los Autores

CÁLCULOS

- Velocidad de Pulso Ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico se calcula de acuerdo con la ecuación 1, 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. 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.

$$V = \frac{A}{T}[\text{m/s}](1)$$

- Resistencia a la Compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión se obtiene el valor de la carga máxima aplicada a la probeta antes de fallar, este valor esta dado en [Kgf]. Para el cálculo de la resistencia debemos conocer el valor del área sobre la cual fue aplicada la carga, esta se calcula como lo muestra la ecuación 2, con el diámetro promedio.

$$A = \pi(d/2)^2[\text{m}^2](2)$$

Conociendo el valor del área, se utiliza la ecuación 3 para calcular el valor de la resistencia a la compresión de cada probeta.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

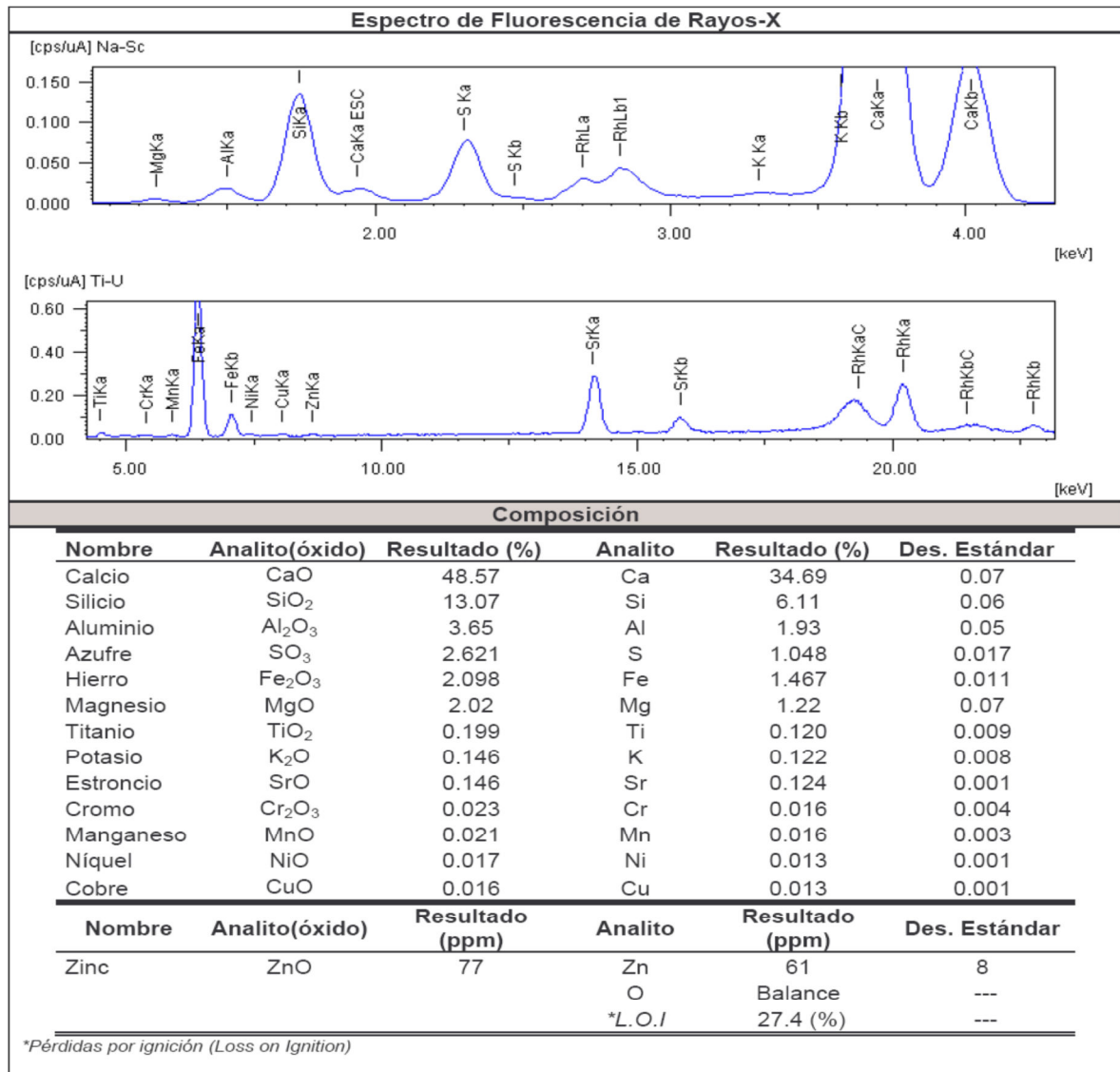
P: Fuerza aplicada en [N],

Sabiendo que 1 [kgf] = 9.80665 [N]

ANEXO C: Resultado del Análisis de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva del Cemento

En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos del análisis de la muestra de cemento.

Figura 1. Espectro y composición obtenidos de la prueba de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva



Fuente. Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X. Centro de Desarrollo Productivo de Joyería

ANEXO D: Resultados de Difracción de Rayos X

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de difracción de rayos X realizadas a dos muestras de concreto, una muestra inocua y una muestra alterada.

METODOLOGÍA

- **Preparación y Montaje de las muestras**

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μm (malla 400). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra mediante la técnica de llenado frontal.

- **Toma de datos de difracción**

Se realizó en un difractómetro de polvo marca SIEMENS modelo D500 bajo las siguientes condiciones:

Tabla 1. Parámetros del ensayo de Difracción de Rayos X

Voltaje	400 KV
Corriente	30 mA
Rendija de Divergencia	0.15 mm
Rendijas Soller Primario	2°
Muestreo	0.02° 2 theta
Rango de Medición	2-70° 2 theta
Radiación	CuK α 1
Monocromador	Grafito
Detector Centelleo	Centello
Tipo de barrido Continuo	Continua
Tiempo de muestreo 1 segundo	1 Segundo

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

- **Tipo de Análisis**

Análisis Cualitativo

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

Análisis Cuantitativo

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

RESULTADOS

Tabla 2. Análisis de Difracción de Rayos X muestra control (C3HJ)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	010-85-0794	Cuarzo	28.8 % (D.E = 0.7)
	Ca CO ₃	010-72-4582	Calcita	9.7 % (D.E = 0.5)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6429	Albita	11.2 % (D.E = 0.9)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2035	Moscovita	12.1 % (D.E = 0.5)
	Ca (OH) ₂	010-76-0571	Portlandita	4.4 % (D.E = 0.1)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	010-72-0646	Ettringita	2.6 % (D.E = 0.2)
	Ca SO ₂ . 2H ₂ O	000-06-0046	Yeso	5.9 % (D.E = 0.2)
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	010-74-1784	Caolinita	N.C
	(Mg, Fe) ₅ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₆	000-29-0701	Clinocloro	4.0 % (D.E = 0.2)
	K (Al, Fe) Si ₂ O ₈	000-08-0048	Ortoclasa	6.3 % (D.E = 0.4)
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita	3.6 % (D.E = 0.2)
Total Cristalino				88.6 %
Amorfos y otros				11.4 %

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

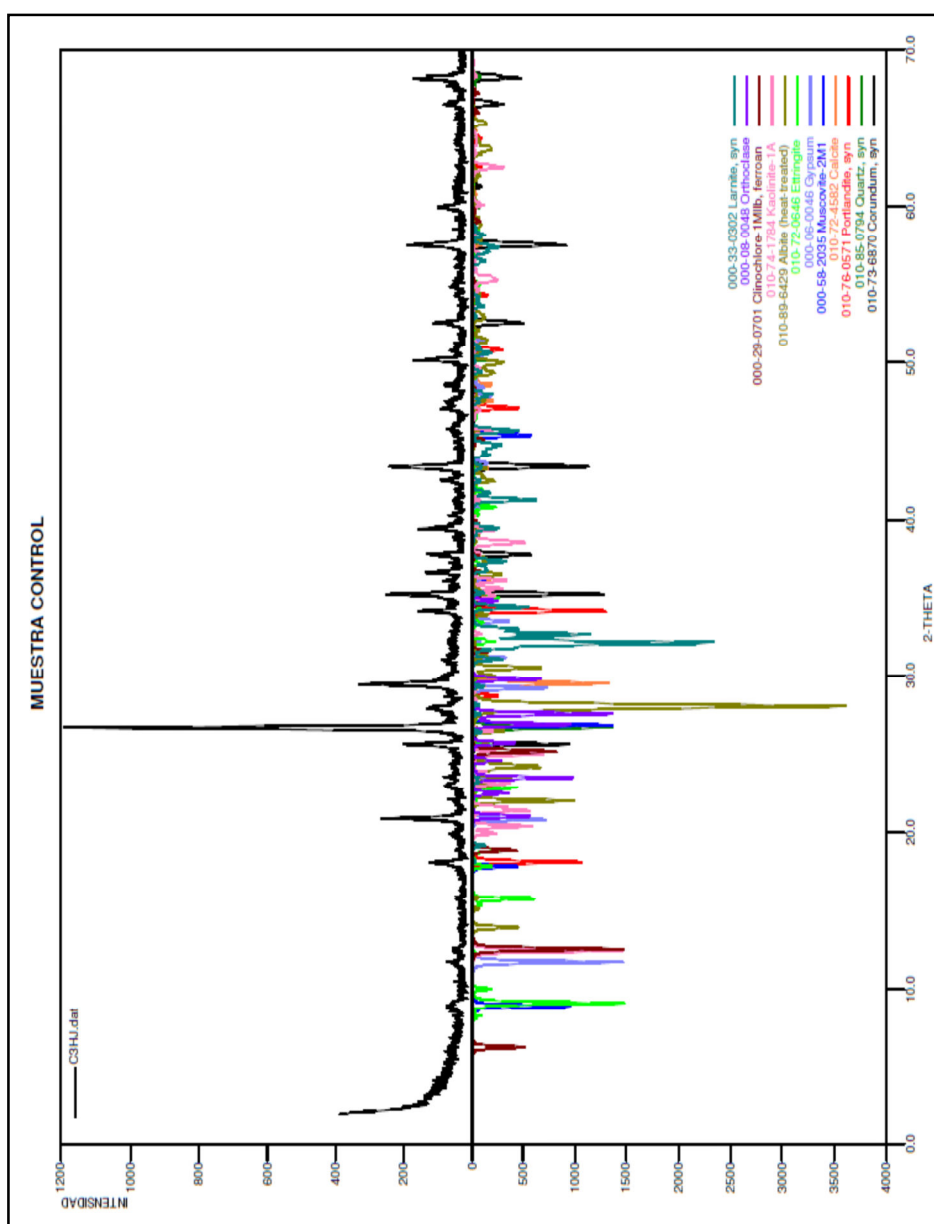
Santander

Tabla 3. Análisis de Difracción de Rayos X muestra alterada (C3HK)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	010-87-2096	Cuarzo	19.8 % (D.E = 0.8)
	Ca CO ₃	010-83-0578	Calcita	15.3 % (D.E = 0.9)
	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al Si ₃ O ₈)	010-70-3752	Albita	9.5 % (D.E = 0.4)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita	10.8 % (D.E = 0.5)
	Ca (OH) ₂	000-44-1481	Portlandita	3.4 % (D.E = 0.1)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	010-75-7554	Ettringita	2.8 % (D.E = 0.3)
	Ca SO ₂ . 2H ₂ O	010-74-1905	Yeso	4.0 % (D.E = 0.3)
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	010-75-1593	Caolinita	N.C
	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	000-16-0351	Clinocloro	3.9 % (D.E = 0.3)
	K (Al, Fe) Si ₂ O ₈	010-71-0956	Ortoclasa	8.0 % (D.E = 0.5)
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita	4.8 % (D.E = 0.3)
Total Cristalino				82.3 %
Amorfos y otros				17.7 %

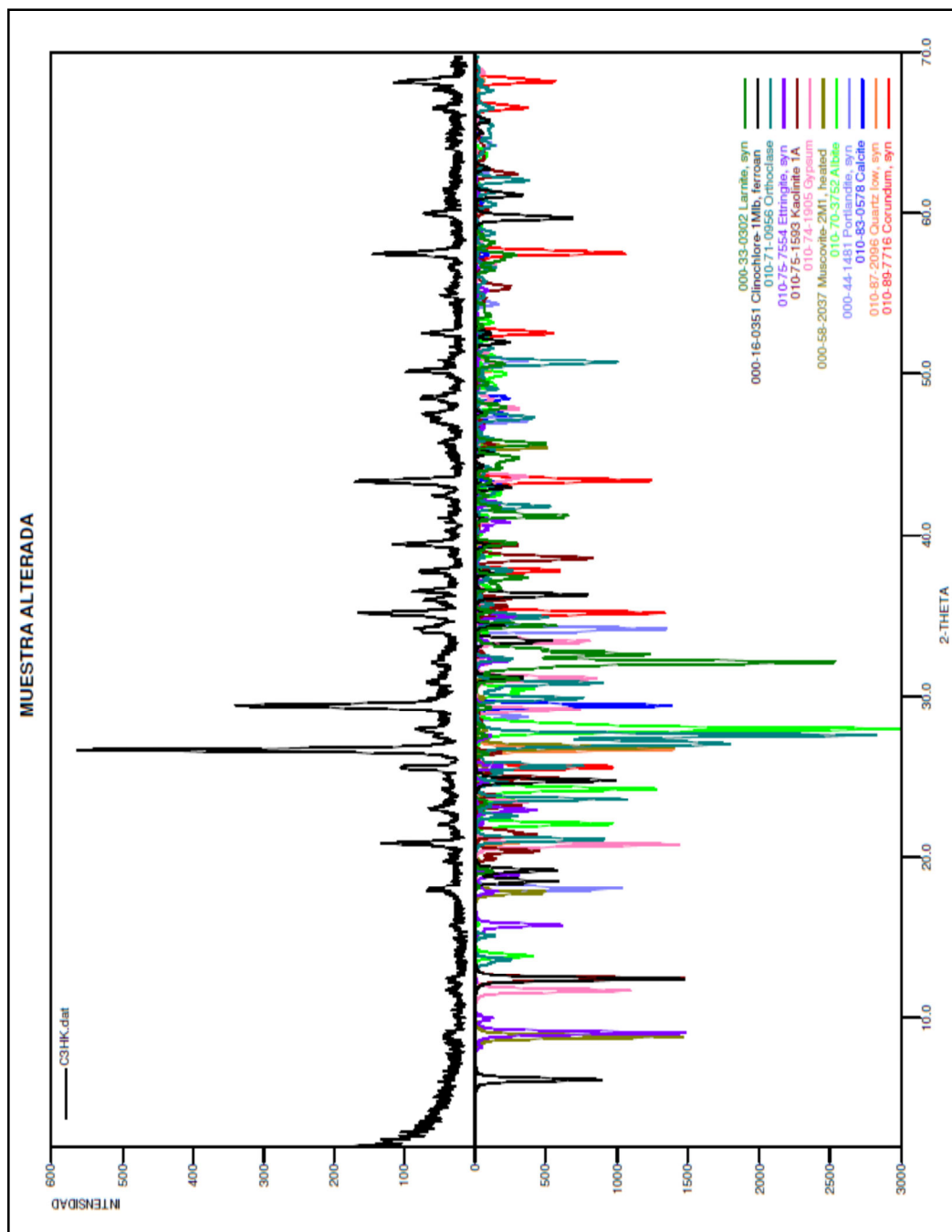
Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander

Figura 1. Espectro de Difracción de Rayos X muestra control (C3HJ)



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

Figura 2. Espectro de Difracción de Rayos X muestra alterada (C3HK)



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

ANEXO E: Características, toma de datos y cálculos para el ensayo de porosidad

El porosímetro de Helio: Es un instrumento medidor de volúmenes que puede ser usado para determinar el volumen de granos o el volumen poroso de la muestra. Su funcionamiento está basado en la Ley de Boyle, donde un volumen conocido de helio (contenido de referencia) es lentamente presurizado y luego, expandido isotérmicamente en un volumen vacío desconocido. Después de la expansión, la presión de equilibrio resultante estará dada por la magnitud del volumen desconocido; esta presión es medida. Usando dicho valor y Ley de Boyle, el volumen desconocido es calculado mediante:

$$\emptyset = (V_p / V_t) * 100 \text{Ec. (1)}$$

Si se considera que en la composición de la muestra esta conformada por tres volúmenes tales como:

- a. Volumen de granos (V_g): la cual se obtiene relacionando el volumen poral y el volumen total.
- b. Volumen poral (V_p): se determina por medida de porosímetro, cuando se realiza la lectura con la muestra en el porta núcleo, habiendo previamente restado el volumen muerto.
- c. Volumen total (V_t): se determina según la forma geométrica de la muestra dada.

En la tabla 1 se muestran los diámetros, longitudes y su promedio, y, el volumen total, de cada muestra.

El volumen de la muestra se calcula mediante:

$$V_{cilindro} = \pi * (D/2)^2 * L[\text{cm}^3] \text{ Ec. (2)}$$

Tabla 1. Medidas de diámetro, longitud y su promedio, y, volumen total de cada muestra

	I2 (1)		I2 (2)		A3 (1)		A3 (2)	
	D [cm]	L [cm]	D [cm]	L [cm]	D [cm]	L [cm]	D [cm]	L [cm]
	2,53	3,74	2,53	3,84	2,49	4,16	2,57	3,97
	2,52	3,73	2,52	3,84	2,51	4,13	2,52	3,98
	2,55	3,74	2,52	3,84	2,49	4,21	2,52	4,01
	2,51	3,75	2,55	3,84	2,52	4,17	2,55	3,97
Promedio	2,53	3,74	2,53	3,84	2,50	4,17	2,54	3,98
Volumen [cm³]	18,80		19,30		20,47		20,17	

Fuente. Los Autores

Volúmenes medidos con el porosímetro:

V₁: Volumen de referencia = 40,66 [cm³]

V₂: Volumen de trabajo = 5,308 [cm³]

V₃: Volumen interno = 7,7 [cm³]

El porosímetro mide la presión de vacío, una presión inicial y la presión final cuando se ensaya cada muestra. Los datos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de presión medidos con el porosímetro durante el ensayo

	I2 (1)	I2 (2)	A3 (1)	A3 (2)
Presión de Vacío (P_v) [psi]	-11,584	-11,449	-11,449	-11,449
Presión Inicial (P_i) [psi]	82,033	82,168	82,033	82,168
Presión Final (P_f) [psi]	69,102	69,256	66,138	65,599
Temperatura [$^{\circ}$ C]	23	23	23	23

Fuente. Laboratorio Petrofísico. Universidad Industrial de Santander

Con los datos de volúmenes y presiones se calcula el valor de X mediante:

$$X = \frac{V_2(P_v - P_f) + (V_1 + V_3)(P_i - P_f)}{(P_f - P_v)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Luego, el volumen de grano (V_g) se halla mediante la ecuación 4:

$$V_g = VDNU - X \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde

VDNU es el volumen de discos no utilizados en el ensayo.

Tabla 3. Valores de VDNU para las muestras

	I2 (1)	I2 (2)	A3 (1)	A3 (2)
VDNU	19,538		22,67	

Fuente. Laboratorio Petrofísico. Universidad Industrial de Santander

Finalmente el porcentaje de porosidad se calcula mediante:

$$\alpha [\%] = 1 - \left(\frac{V_g}{V_T}\right) * 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde

α es el porcentaje de porosidad.

V_g es el volumen de grano hallado.

V_T es el volumen total de la muestra ensayada.

ANEXO F: Resultados de la prueba de Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS)

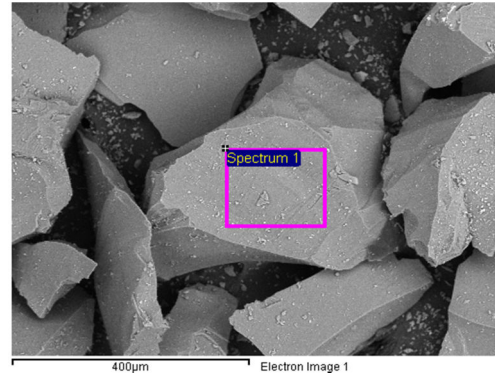
Figura 1. Resultados del ensayo de EDS realizado al vidrio molido

Región 1.

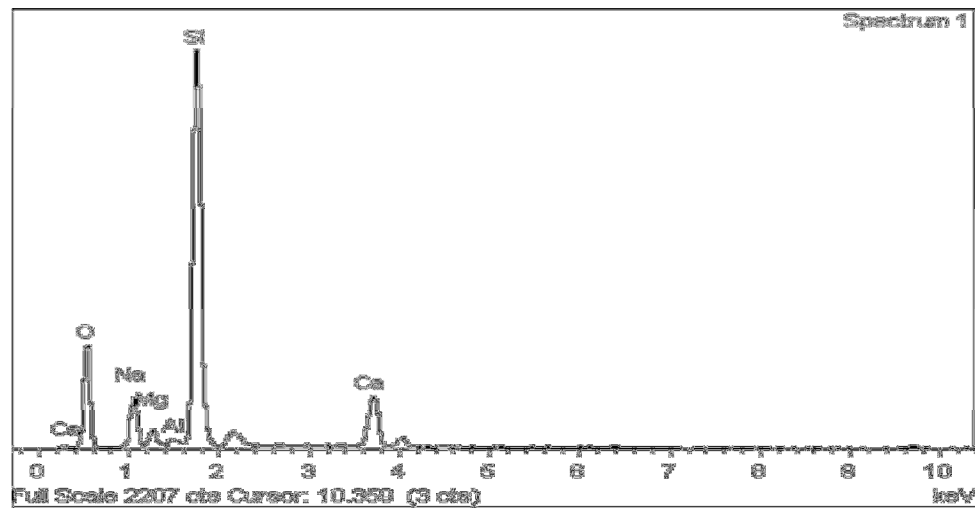
Spectrum processing :
Peaks possibly omitted : 2.139, 9.691 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	44.50	0.7120	44.47	0.76	58.72
Na K	9.38	0.9059	7.37	0.30	6.77
Mg K	1.72	0.7346	1.67	0.17	1.45
Al K	0.46	0.8304	0.40	0.12	0.31
Si K	47.77	0.9068	37.51	0.59	28.22
Ca K	11.36	0.9433	8.58	0.27	4.52
Totals			100.00		



Región 2.

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.125, 9.712, 11.500 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

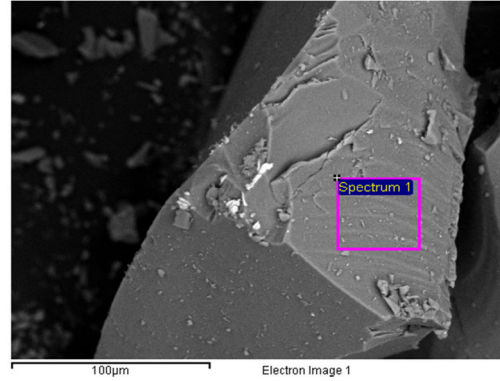
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

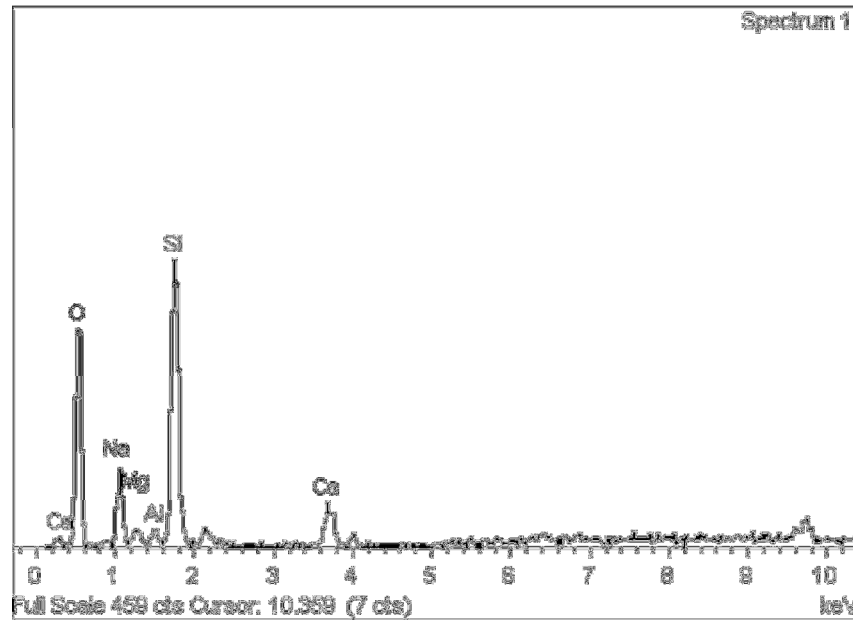
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	16.20	0.9942	58.48	1.40	70.80
Na K	2.03	0.8184	8.91	0.76	7.50
Mg K	0.26	0.6622	1.42	0.40	1.13
Al K	0.24	0.7668	1.14	0.30	0.82
Si K	5.97	0.8475	25.30	1.00	17.45
Ca K	1.26	0.9539	4.75	0.50	2.30
Totals			100.00		



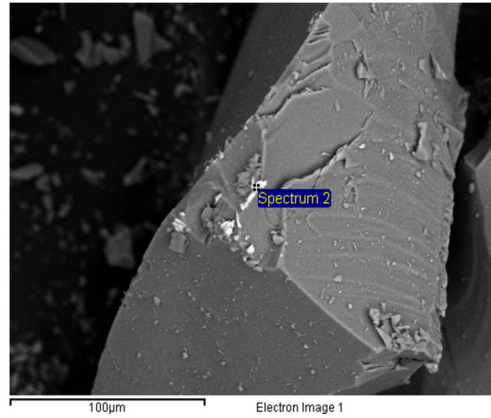
Región 3.

Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 9.717 keV

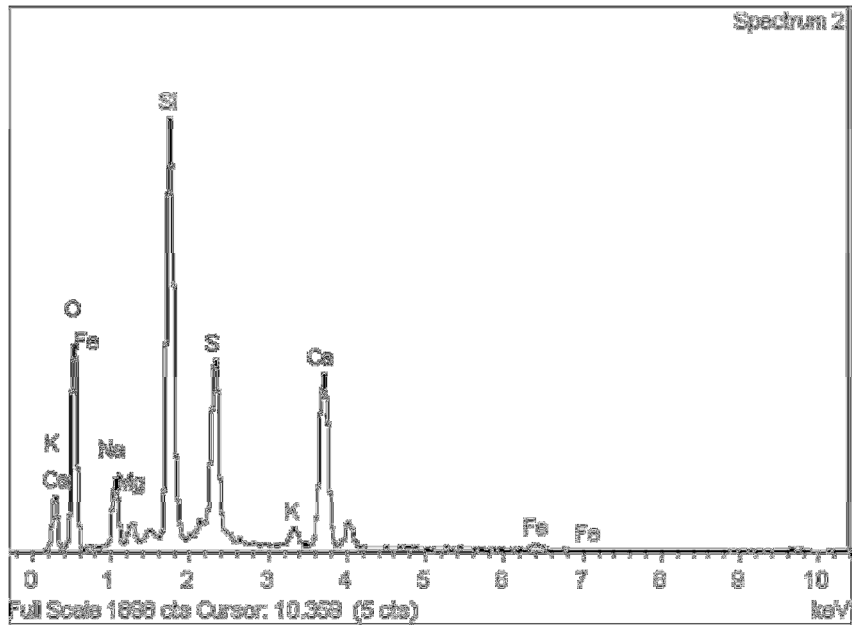
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 5

Standard :

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM
CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	63.15	0.6087	48.66	0.67	64.82
Na K	8.41	0.7884	5.00	0.23	4.64
Mg K	1.73	0.6898	1.18	0.13	1.03
Si K	36.03	0.8928	18.93	0.33	14.36
S K	18.32	0.8365	10.27	0.27	6.83
K K	2.38	1.0023	1.11	0.11	0.61
Ca K	27.66	0.9501	13.65	0.29	7.26
Fe K	2.08	0.8175	1.20	0.18	0.46
Totals			100.00		



Región 4.

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.146, 9.700 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

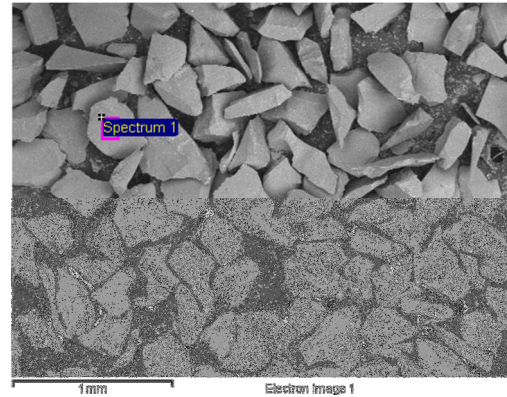
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

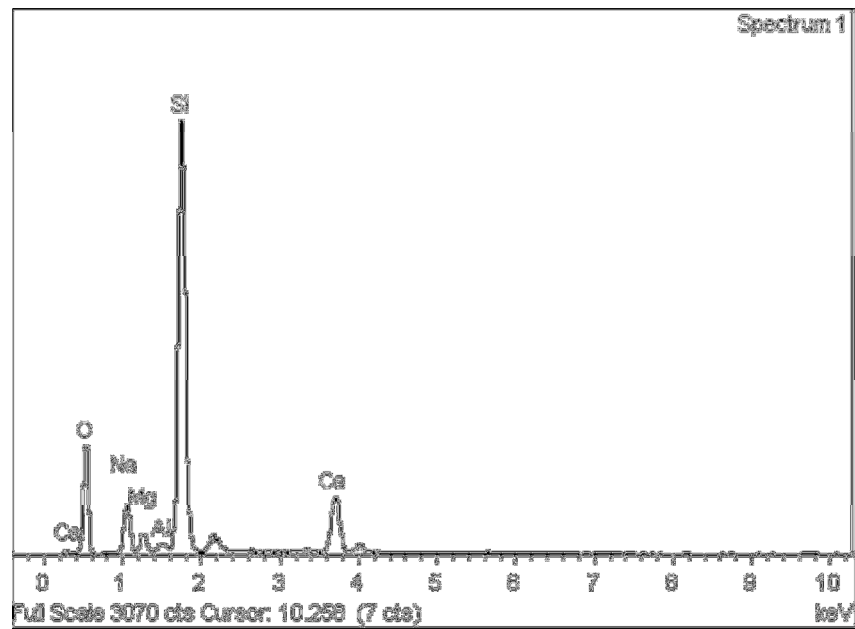
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	52.19	0.7042	44.27	0.70	58.60
Na K	10.01	0.9058	6.61	0.26	6.08
Mg K	2.34	0.7443	1.88	0.15	1.64
Al K	0.58	0.8361	0.41	0.11	0.33
Si K	58.14	0.9111	38.14	0.54	28.76
Ca K	13.71	0.9425	8.69	0.26	4.59
Totals			100.00		



Región 5.

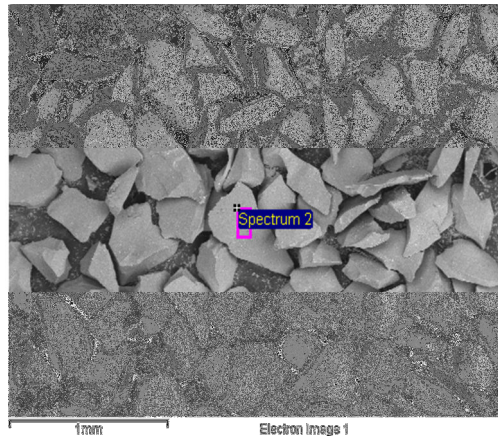
Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.139, 9.705 keV

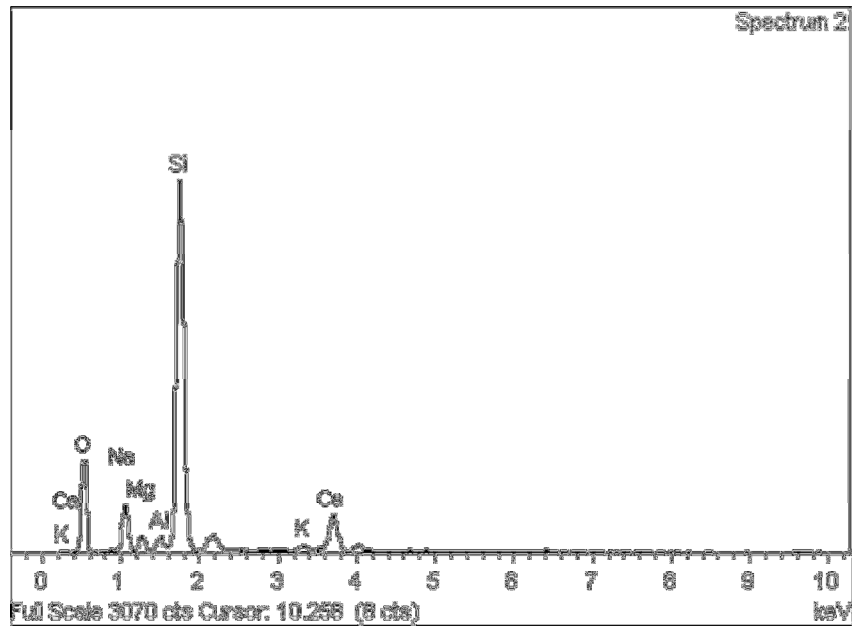
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM
CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	45.77	0.7356	43.95	0.75	58.02
Na K	9.63	0.9229	7.38	0.29	6.78
Mg K	1.82	0.7443	1.73	0.16	1.50
Al K	1.08	0.8379	0.91	0.14	0.71
Si K	49.62	0.9060	38.72	0.59	29.12
K K	1.12	0.9720	0.81	0.14	0.44
Ca K	8.62	0.9361	6.51	0.25	3.43
Totals			100.00		



Región 6.

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.136, 8.090, 9.724 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

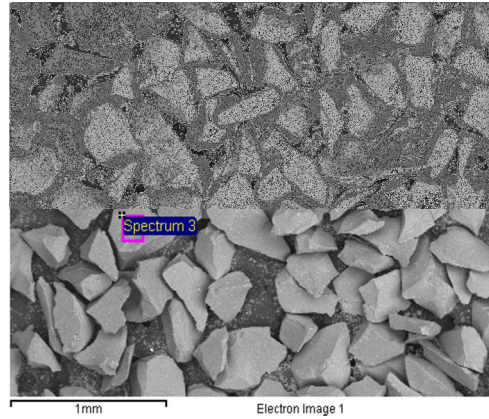
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

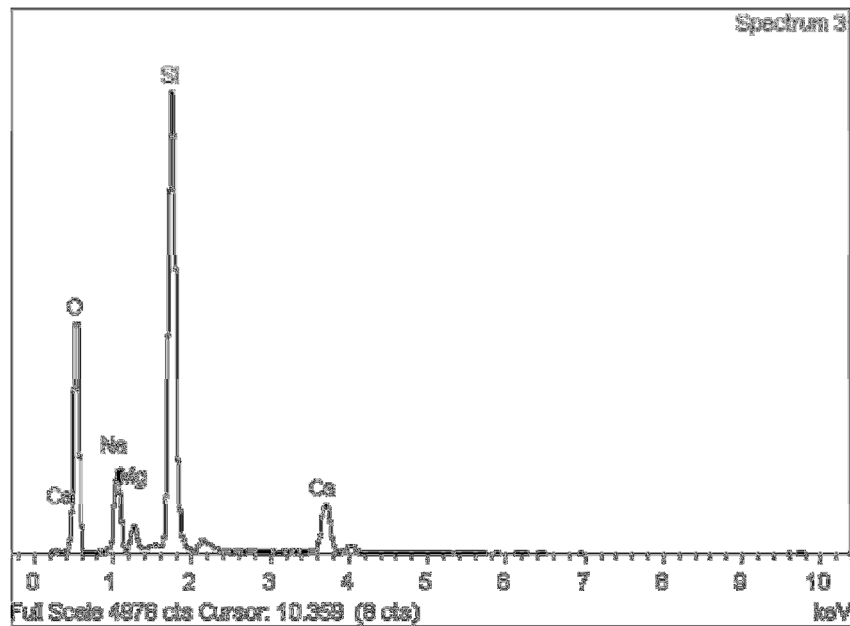
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	182.85	0.8949	53.82	0.40	66.92
Na K	27.36	0.8495	8.48	0.20	7.34
Mg K	4.75	0.6862	1.82	0.10	1.49
Si K	100.86	0.8745	30.38	0.30	21.52
Ca K	19.81	0.9487	5.50	0.13	2.73
Totals			100.00		



Región 7.

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.128, 5.570 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

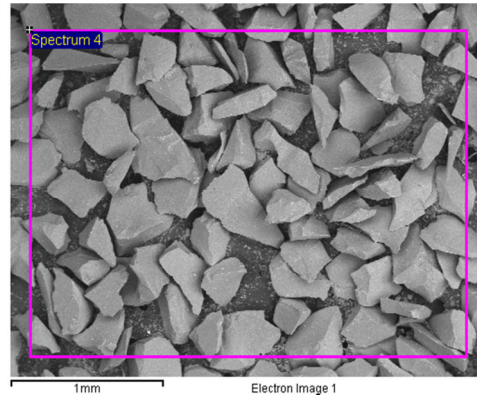
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

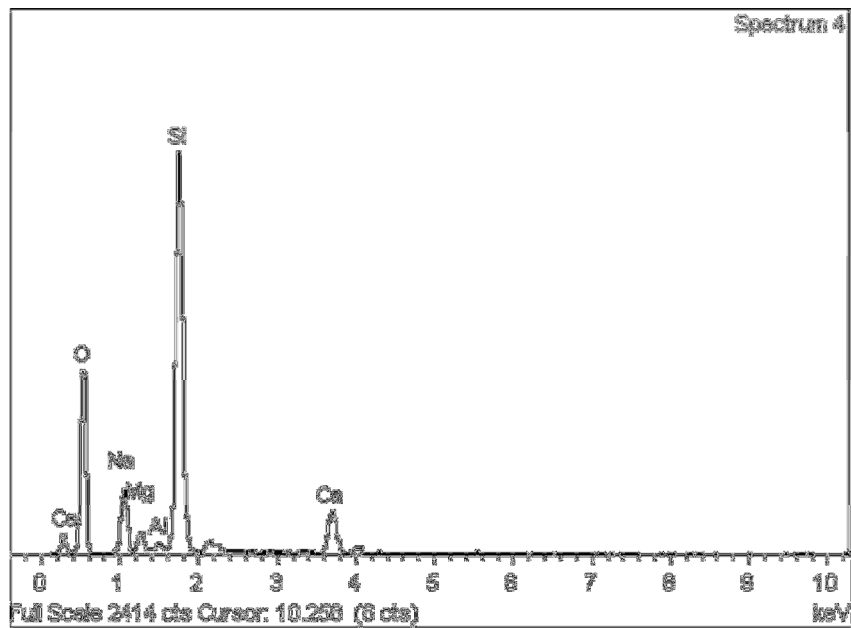
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	72.25	0.8861	53.66	0.64	66.86
Na K	10.05	0.8497	7.78	0.31	6.75
Mg K	1.85	0.6945	1.75	0.17	1.44
Al K	0.52	0.7926	0.43	0.11	0.32
Si K	41.07	0.8761	30.85	0.48	21.89
Ca K	7.96	0.9479	5.53	0.21	2.75
Totals			100.00		



Región 8.

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.148, 9.729 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

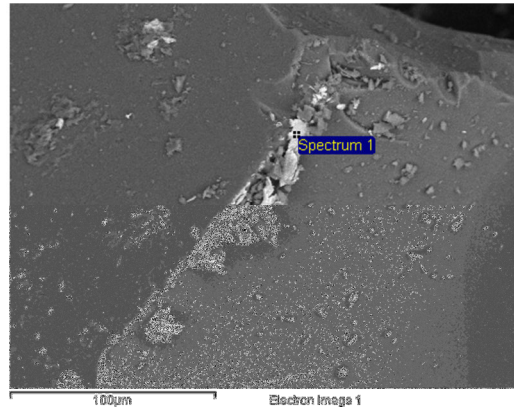
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

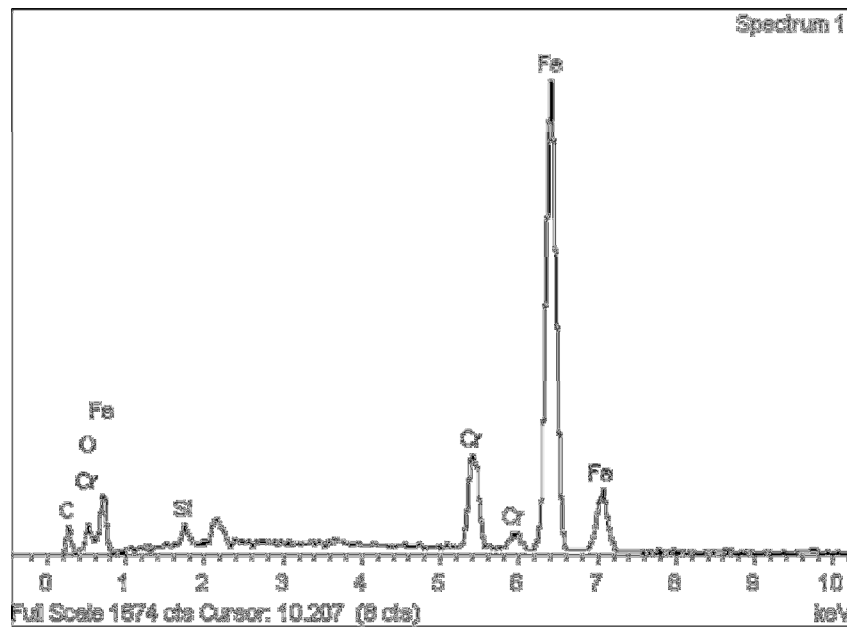
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C K	8.42	0.4514	9.61	0.71	31.07
O K	6.48	1.1950	2.79	0.32	6.78
Si K	1.34	0.6575	1.05	0.13	1.45
Cr K	21.72	1.1460	9.76	0.28	7.29
Fe K	141.27	0.9474	76.79	0.72	53.41
Totals			100.00		



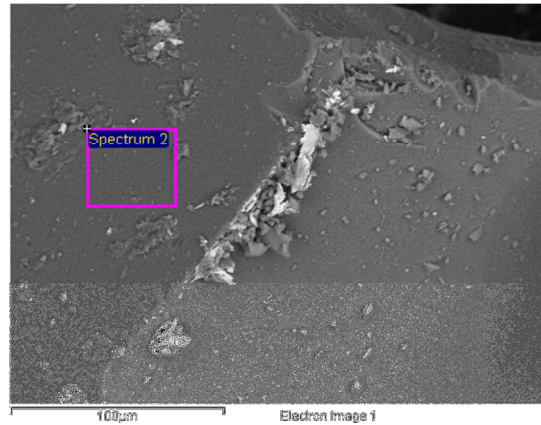
Región 9.

Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 2.142 keV

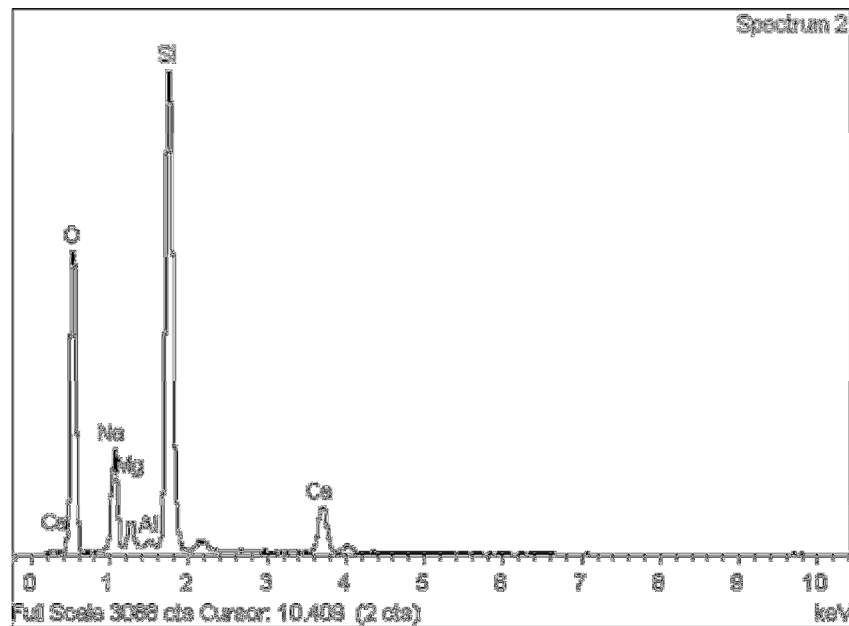
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 5

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
CaWollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	147.82	0.9622	56.06	0.45	68.68
Na K	20.43	0.8387	8.89	0.24	7.58
Mg K	3.69	0.6747	1.99	0.13	1.61
Al K	0.65	0.7716	0.31	0.08	0.22
Si K	66.49	0.8604	28.20	0.34	19.68
Ca K	11.87	0.9501	4.56	0.14	2.23
Totals			100.00		



Fuente. Universidad de Antioquía, Sede de Investigación Universitaria.