

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE ACCELERADA
EN CONCRETO SIN REFUERZO MEDIANTE VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO (VPU)”**

**ERIC JHOAN FONSECA RIVERA
WENDY MARYOLI MACÍAS ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
BUCARAMANGA**

2015

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE ACELERADA
EN CONCRETO SIN REFUERZO MEDIANTE VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO (VPU)”**

**ERIC JHOAN FONSECA RIVERA
WENDY MARYOLI MACÍAS ORTIZ**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero metalúrgico**

**DIRECTOR
MSc. JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ
INGENIERO METALÚRGICO-UIS**

**CODIRECTOR
MSc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ
INGENIERA METALÚRGICA-UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
BUCARAMANGA**

2015

Agradezco primero a dios por ser mi guía en este camino de la vida.

A mis padres y hermano por darme todo el apoyo y fortaleza para obtener este gran logro, ustedes son mi principal fuente de inspiración.

A mis demás familiares por hacerme sentir orgullosa de lo que soy.

A mis amigos por acompañarme y disfrutar a mi lado durante esta feliz etapa de la vida, especialmente a Eric por brindarme su apoyo y amistad.

Y por último a todas las personas que creyeron en mi cuando más lo necesitaba, esas que me hicieron entender que si podía.

Wendy Maryoli Macias Ortiz

Agradezco a mi familia por brindar el apoyo y la confianza necesaria para poder lograr todas las metas que me he propuesto.

A mis amigos que hicieron de esta etapa universitaria algo muy bueno, productivo y duradero.

A mi compañera Wendy por su colaboración y amistad a lo largo de toda la carrera.

Y a todas aquellas personas que siempre estuvieron dispuestas a colaborar incondicionalmente.

Ah y a ti que lo estás leyendo.

Eric Jhoan Fonseca Rivera

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecemos a:

Universidad Industrial de Santander UIS por acogernos como estudiantes durante nuestra etapa de formación superior.

A la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales por darnos los conocimientos necesarios sobre esta bonita carrera.

Al grupo GIMAT y en especial a los profesores Luz Amparo Quintero y Julián Orlando Herrera Ortiz por confiar en nosotros y brindarnos todo el apoyo y asesoría necesario para cumplir con nuestro proyecto de grado.

A los técnicos especialmente Jairo ``la mechuda``, Domingo, Ambrosio ``padrecito``, Óscar, Mario y Javier, sin ustedes hubiese sido imposible culminar esta etapa.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	22
2.1 EL CONCRETO (GENERALIDADES)	22
2.1.1 Cemento.....	23
2.1.2 Agregados.....	23
2.1.3 Agua.....	24
2.2 REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO.....	24
2.2.1 Reacción Alkali-Carbonato	25
2.2.2 Reacción Alkali-Silicato	25
2.2.3 Reacción álcali-sílice	26
2.3 FACTORES QUE AFECTA LA RESISTENCIA DEL CONCRETO.....	28
2.3.1 Cemento.....	28
2.3.2 Relación agua/cemento.....	28
2.3.3 Calidad de agregados.....	29

2.3.4	Tamaño máximo de agregado grueso.....	29
2.3.5	Tiempo y tipo de curado del concreto.....	29
2.4	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).....	30
2.4.1	Factores que afecta la Velocidad de Pulso Ultrasónico del concreto. ...	33
3	METODOLOGÍA	35
3.1	FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	36
3.2	FASE 2: CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DE EQUIPOS.....	36
3.2.1	Cámara de ambiente controlado.	36
3.2.2	Equipo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).....	37
3.2.3	Equipo de resistencia a la compresión.....	37
3.2.4	Equipo de microscopia óptica.....	37
3.3	FASE 3: FABRICACIÓN DEL CONCRETO.....	37
3.3.1	ACTIVIDAD 1: Determinación de las condiciones de trabajo	38
3.3.2	ACTIVIDAD 2: Obtención y caracterización de la materia prima.....	39
3.3.3	ACTIVIDAD 3: Diseño de la mezcla	40
3.3.4	ACTIVIDAD 4: Elaboración de las probetas.	40
3.3.5	ACTIVIDAD 5: Fraguado y curado.	40
3.4	FASE 4: EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A LAS CONDICIONES DE REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE ACELERADA.....	41
3.5	FASE 5: ENSAYOS EXPERIMENTALES	42

3.5.1 ACTIVIDAD 1: Inspección visual.	43
3.5.2 ACTIVIDAD 2. Ensayo de ultrasonido.	44
3.5.3 ACTIVIDAD 3: Ensayo de resistencia a la compresión.	44
3.5.4 ACTIVIDAD 4: Ensayo de microscopia óptica.	45
4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	47
4.1 RESULTADOS DE LA FABRICACIÓN DEL CONCRETO.....	47
4.1.1 Diseño de mezcla.....	47
4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES	50
4.2.1 Ensayos experimentales durante el curado a 100% humedad.	50
4.2.1.1 Inspección visual.	51
4.2.1.2 Resistencia a la compresión.....	51
4.2.1.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU).	53
4.2.1.4 Relación entre resistencia a la compresión vs VPU	55
4.2.2 Ensayos experimentales durante exposición a la reacción álcali-sílice acelerada.....	55
4.2.2.1 Inspección visual y microscopia óptica.....	56
4.2.2.2 Resistencia a la compresión.....	57
4.2.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).	60
4.2.2.4 Relación entre resistencia a la compresión vs VPU.	62
5 CONCLUSIONES	64
6 RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de la calidad del concreto por medio de la Velocidad de Pulso Ultrasónico	32
Tabla 2. Condiciones de trabajo de la investigación	38
Tabla 3. Ensayos experimentales durante los días de curado a 100% humedad..	43
Tabla 4. Ensayos experimentales durante los días de exposición en la cámara de ambiente controlado	43
Tabla 5. Análisis de fluorescencia de rayos x del cemento.....	48
Tabla 6. Calculo del contenido de NaOH para 28 probetas.....	49
Tabla 7. Diseños de mezcla para probetas inocuas y alteradas	50
Tabla 8. Resistencia a la compresión vs tiempo en curado	52
Tabla 9. VPU vs tiempo en curado	54
Tabla 10. Resistencia a la compresión vs tiempo en cámara	57
Tabla 11. VPU vs tiempo en la cámara.....	60

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismos de transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico.....	33
Figura 2. Metodología para el desarrollo del proyecto	35
Figura 3. Probetas recién fabricadas	41
Figura 4. Curado de probetas 100% humedad	42
Figura 5. Exposición de las probetas en cámara	42
Figura 6. Ensayo de VPU	45
Figura 7. Ensayo de resistencia a la compresión.....	45
Figura 8. Ensayo de microscopía óptica	46
Figura 9. Estado superficial de la probeta a ensayar	51
Figura 10. Micrografías para probetas ensayadas.....	58

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Resistencia a la compresión vs tiempo en curado	53
Gráfica 2. VPU vs tiempo en curado.....	54
Gráfica 3. Resistencia a la compresión vs VPU en curado.....	56
Gráfica 4. Resistencia a la compresión vs tiempo durante la exposición en cámara	59
Gráfica 5. VPU vs tiempo durante la exposición en cámara	61
Gráfica 6. Resistencia a la compresión vs VPU durante la exposición en cámara	63

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LAS MATERIAS PRIMAS.	72
ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLA.....	75

RESUMEN

TÍTULO: “EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE ACCELERADA EN CONCRETO SIN REFUERZO MEDIANTE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)” *

AUTORES: Eric Johan Fonseca Rivera, Wendy Maryoli Macías Ortiz **

PALABRAS CLAVES: velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, concreto, reacción álcali-sílice, vidrio.

En esta investigación se evaluó la relación entre resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en concreto con adición hidróxido de sodio (NaOH) y vidrio con porcentaje de adición de 15% y 25% con el fin de acelerar la reacción álcali-sílice, para esto se elaboraron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud con relación A/C de 0.5. Los ensayos experimentales se dividieron en dos partes, la primera durante el curado a 100% de humedad en los días 7, 14, 21 y 28 evaluando como se afecta el material por la adición de vidrio molido además de la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). En la segunda parte se expusieron las probetas con adición de NaOH y vidrio en una cámara a 48 °C y 80% mínimo de humedad relativa mientras que las inocuas se dejaron a temperatura ambiente, realizando ensayos de compresión, VPU, inspección visual y microscopia óptica durante los días 15, 30, 45 y 60 de estar en cámara. Fue posible determinar la influencia sobre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico de la adición de vidrio como sustitución de agregado fino, obteniendo por medio del ensayo no destructivo de VPU correlaciones que permiten interpretar resultados de resistencia a la compresión del concreto. Se observó que la relación encontrada entre la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión fue una relación de tipo lineal.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: MSc Julián Orlando Herrera. Co-directora: MSc. Luz Amparo Quintero

ABSTRACT

TITLE: "EVALUATION OF EFFECT ALKALI SILICA REACTION ACCELERATE IN CONCRETE WITHOUT REINFORCED BY ULTRASONIC PULSE VELOCITY (UPV)" *

AUTHORS: Eric Jhoan Fonseca Rivera, Wendy Maryoli Macías Ortiz **

KEYWORDS: Ultrasonic Pulse Velocity, Compressive Strength, concrete, alkali silica reaction, glass, fine aggregate, coarse aggregate.

In this research evaluated the relation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity in concrete with addition Sodium Hydroxide (NaOH) and glass addition rate 15% and 25% to accelerate the alkali silica reaction, cylindrical specimens with 10 cm of diameter and 20 cm length were done, for the reference and altered specimens with a w/c ratio 0.5. Experimental tests were divided into two parts, the first with 100% humidity during curing concrete at 7, 14, 21 and 28 days, evaluating as the material is affected by the addition of crushed glass as well compressive strength and UPV. In the second part the specimens with addition were exposed in an appropriate chamber at temperature 48°C and minimum relative humidity 80%, while reference specimens were allowed to room temperature, making the test of compressive strength, UPV, visual inspection and optical microscopy during the days 15, 30, 45 and 60. Was possible to determine the influence in compressive strength and UPV by addition of glass as replacement of fine aggregate and obtained by non-destructive test destructive test, this was done through correlations VPU allow interpreting results of strength resistance. The relationship between UPV and compressive strength was linear.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: M.Sc Julián Orlando Herrera. Co-director: M.Sc Luz Amparo Quintero

INTRODUCCIÓN

El concreto hace parte fundamental del desarrollo de infraestructura de todo país. Con el pasar de los años su consumo ha incrementado considerablemente debido a que es un material durable, es decir, que tiene gran capacidad de resistencia a lo largo del tiempo, es por esta razón que cada año se consumen miles de toneladas de concreto para crear y/o restaurar edificaciones.

La reacción álcali-agregado se conoce desde 1940 como un proceso intrínseco de degradación del concreto gracias al investigador Thomas Stanton quien pudo demostrar la existencia de esta reacción, señalando que las condiciones en las cuales trabaja el concreto son tan importantes como la calidad del cemento y los agregados que se utilizan para este, es así como se empiezan a tener en cuenta los agregados que se utilizan, ya que estos juegan un papel importante como componentes activos en la dosificación de la mezcla de concreto. Una de las reacciones álcali-agregado más frecuente es la reacción álcali-sílice (ASR, por sus siglas en ingles) debido a la interacción que se produce entre los hidróxidos álcalis del cemento Portland con los materiales silíceos de los agregados, originando que el concreto se expanda con el tiempo llegando a crear microfisuras que pueden producir agrietamiento en el concreto.

Los Ensayos No Destructivos (END) permiten evaluar el deterioro que presenta el material por causa de esta reacción, lo más importante de estos ensayos es que se realizan sin ocasionar daños estructurales, lo cual es de gran importancia al momento de realizar un estudio a una edificación, puente o cualquier estructura que este hecha con concreto. Una de las técnicas no destructivas más utilizadas para evaluar la reacción álcali-sílice en el concreto es la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) basada en la propagación de una onda a través de un medio sólido, cuya velocidad dependerá directamente de la densidad y las características

elásticas del material con la cual se puede evaluar la calidad del concreto y determinar si existe relación con la reacción sin dañar estructuralmente el material. Para evaluar el efecto de la reacción álcali-sílice acelerada en concreto sin refuerzo se realiza la técnica de VPU, ensayos de resistencia a la compresión, inspección visual y microscopía óptica.

En síntesis, este trabajo de investigación tuvo como finalidad analizar y contribuir al estudio del efecto de la reacción álcali-sílice en el concreto por medio de una técnica no destructiva (VPU) relacionándolo con una destructiva (Resistencia a la compresión). Para realizar este análisis se requirió acelerar la reacción por medio del reemplazo de vidrio molido por agregado fino, aumentando así la cantidad de material silíceo de los agregados e Hidróxido de Sodio (NaOH) en el agua de mezcla para contribuir a que la interacción entre estos sea suficiente y así obtener el producto de esta de esta reacción, el cual consiste en una gel amorfa que genera la expansión y tensión interna en el material provocando una disminución de sus propiedades y el posible agrietamiento del material.

Otro factor a considerado para este estudio fueron las condiciones ambientales, ya que estas aceleran la reacción. Estas condiciones se realizaron en una cámara en la cual se ajustó la temperatura a 48°C y humedad superior al 80%, según se necesitó en el estudio.

1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las formas de deterioro en las estructuras de concreto se debe a las reacciones químicas entre el cemento y el agregado, que provoca expansiones dentro de la estructura que conlleva a fisuras. Dentro de las posibles reacciones que se presentan se encuentra la reacción álcali-sílice que se manifiesta cuando los álcalis (sodio y potasio) presentes en el cemento u otra fuente externa, reacciona con algunos agregados reactivos silíceos.

La reacción se inicia con el ataque de los minerales silíceos contenidos en el agregado por los hidróxidos alcalinos derivados de los álcalis (Na_2O y K_2O) provenientes del cemento. Es ahí donde se forma un gel de álcali y silicato que altera al agregado del concreto, este gel se expande absorbiendo agua e incrementando su volumen provocando un deterioro de la pasta del cemento y daños internos, donde más adelante se verán comprometidos los elementos estructurales debido a la presión interna como resultado de la reacción química lo cual con el tiempo va a producir la propagación de microfisuras hasta llevar a la falla.

La reacción se da de manera lenta, por lo cual es posible evaluar la expansión que va produciendo en el concreto, pudiendo tomar medidas correctivas antes de que sea irreparable el daño. Por otro lado algunos autores han encontrado una relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico que es una de las técnicas no destructivas más utilizadas para la evaluación de la calidad del concreto.

Por lo anterior, es importante evaluar algunos parámetros y circunstancias en las cuales se da la reacción y los efectos que esta ocasiona por medio de pruebas mecánicas (resistencia a la compresión) y Ensayos No Destructivos (END) en este caso velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto de la reacción álcali-sílice acelerada en concretos sin refuerzo mediante velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la influencia de la sustitución de agregado fino por vidrio molido sobre concreto sin refuerzo con relación agua cemento de 0.5 a partir de medidas de VPU y de resistencia a la compresión.
- Relacionar la VPU y la resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo afectado por la reacción álcali-sílice acelerada.
- Evaluar el efecto ocasionado por la reacción álcali-sílice sobre el concreto en estudio por medio de VPU y resistencia a la compresión.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 EL CONCRETO (GENERALIDADES)

El concreto en términos generales se define como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.¹

Para obtener un buen concreto no basta con tener una buena materia prima mezclada en las proporciones correctas, sino que se debe contar con factores tales como el proceso de mezclado, transporte, colocación y curado. El concreto presenta una alta resistencia a la compresión pero una muy baja resistencia a la tracción, por lo cual algunas veces es reforzado con varillas de acero, para que estas sean las que soporten estos esfuerzos (concreto armado).²

El concreto es básicamente una mezcla de agregados y pasta. La pasta está compuesta de Cemento Portland y agua, la cual une los agregados fino y grueso para formar una masa semejante a una roca, pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el Cemento y el agua. La pasta está compuesta por Cemento Portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Es la fase continua del concreto dado que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto de éste.³

¹ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Morteros “Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas”. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004.

² HARSMSSENT T. “Diseño de Estructuras de Concreto Armado” Tercera Edición, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2002.

³ PERLES, Pedro. “Hormigón Armado”. Bueno Aires: Nobuko, 2005.

El agregado es la fase discontinua del concreto dado que sus partículas no se encuentran unidas o en contacto unas con otras, sino que se encuentran separadas por espesores diferentes de la pasta endurecida. Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado. A continuación se mencionan los principales componentes del concreto:

2.1.1 Cemento. El cemento es un material que posee la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, debido a que reacciona químicamente con ella para formar un material con buenas propiedades aglutinantes que a medida que transcurre el tiempo va aumentando su resistencia volviéndose más rígido.⁴ El tipo de cemento utilizado en la presente investigación es el cemento portland el cual es un aglomerante hidráulico que proviene de la calcinación hasta la fusión incipiente de materiales calcáreos, arcillosos. Luego se realiza molienda muy fina del “Clinker” que es el material resultante de la calcinación, con una pequeña adición de yeso, menor al 1% del peso total. Cuyas especificaciones están contempladas en las normas NTC 121⁵ NTC 321⁶.

2.1.2 Agregados. Los agregados son el conjunto de partículas inorgánicas, de origen natural o productos del procesamiento industrial de las rocas. Los agregados son la parte inerte del concreto, sin embargo al formar entre el 65% y 75% aproximadamente del concreto, se debe tener clara su importancia, la cual antiguamente no era de gran consideración. Los agregados pueden dividirse en

⁴ R. N. SWAMY & M.M. AL-ASALI. “Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction”, International Conference on In Situ and Non-Destructive Testing of Concrete, Ottawa. American Concrete Institute, 1988

⁵ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas. NTC 121.

⁶ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas. NTC 321

dos grupos: *Agregado fino* el consiste en arenas naturales o productos con tamaños de partícula que pasan la malla 4 (4.75 mm) y los retenidos por la malla 200 (75µm). *Los agregados gruesos* consisten en grava o agregado triturado y aquellas partículas retenidas en la malla 4 (4.75 mm), el tamaño máximo de agregado que se emplea este generalmente entre 19 mm y 25 mm. ⁷

2.1.3 Agua. El agua es un elemento indispensable en la elaboración de la mezcla de concreto puesto que sirve para la hidratación del cemento y el desarrollo de sus propiedades aglutinantes. Al mezclarse con el cemento se forma la pasta la cual debe ser más o menos fluida, según la cantidad de agua que se le agregue. Al endurecerse la pasta, como consecuencia del fraguado, parte de esta permanece en la estructura de la pasta (agua de hidratación), y el resto es evaporable. Esta agua debe cumplir ciertos requerimientos para que no sea perjudicial para el concreto⁸. Además, uno de los parámetros más importantes del concreto es la relación agua/cemento (A/C), pues influye enormemente en la resistencia de este. Esta relación expresa la relación existente entre el peso de agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Una baja relación conduce a un concreto con mayor resistencia que con una alta, sin embargo, entre más alta sea el concreto se vuelve más trabajable. La menor relación para obtener una hidratación completa del cemento es de 0.42. ⁹

2.2 REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

La reacción álcali-agregado se identifica como el proceso fisicoquímico en el cual intervienen principalmente los minerales que constituyen la roca utilizada como agregado, de acuerdo a su naturaleza puede ser cristalina o amorfa y los

⁷ KOSMATKA, Steven. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto" 1ª Edición. Portland Cement Association, 2004.

⁸ TRUJILLO, Juan. "Pastas, Morteros, Adhesivos y Hormigones". IC Editorial, 2013.

⁹ GONZALES, FEDERICO. Manual de supervisión de obras de concreto. Ed Limusa, 2004

hidróxidos alcalinos del concretos que pueden ser aportados, ya sea por el cemento, por los mismos agregados o por algún agente externo al concreto. Esta reacción que se genera se denomina álcali agregado en forma general, identificándose tres tipos diferentes de reacción como son:¹⁰

- Álcali-carbonato
- Álcali-silicato
- Álcali-sílice

A continuación se describe cada una de estas reacciones:

2.2.1 Reacción Álcali-Carbonato. Este tipo de reacción se produce por los álcalis del cemento que actúan sobre ciertos agregados calcáreos, como por ejemplo, los calcáreos de grano fino que contienen arcilla, que son reactivos y expansivos. Este fenómeno se presenta de preferencia cuando el concreto está sometido a atmósfera húmeda. Se ha planteado que la expansión se debe a la transformación de la dolomita en calcita y brucita, fuertemente expansiva, que tiene la forma de un gel que origina una presión debido al crecimiento de los cristales.¹¹

2.2.2 Reacción Álcali-Silicato. Este tipo de reacción no debe ser confundida con aquellas otras comprendidas dentro de la denominación álcali-agregados. Sin embargo, en algunos casos puede presentarse conjuntamente con la reacción álcali-sílice. Se caracteriza porque progresa más lentamente y forma gel en muy pequeña cantidad. Se estima que esta reacción se debe a la presencia de ciertos filosilicatos. En general, el conocimiento de este fenómeno es incipiente y más

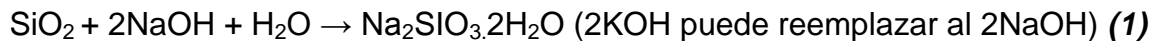
¹⁰ VERONELLI, Dante. "Tecnología de los Materiales: Durabilidad del Hormigón". Instituto del Cemento Portland Argentino, 1975.

¹¹ GONZALES DE LA COTERA, Manuel. "Ataque químico al concreto". Exposición en el Ciclo Organizado por el ACI. Diciembre, 1991.

complejo y no se ha llegado a conclusiones sobre la expansión y la deterioración que ocasionan.¹²

2.2.3 Reacción álcali-sílice. Es la reacción más estudiada y la primera en identificarse, es una reacción de los álcalis (Na_2O y K_2O) que proceden del cemento u otras fuentes, con el hidróxido y los diversos constituyentes síliceos que pueden estar presentes en los agregados.¹³

Sílice + Álcali \rightarrow Gel álcali-sílice (Silicato de sodio)



Esta reacción ocasiona la expansión y agrietamiento severo de las estructuras de concreto, es un fenómeno complejo y se han propuesto varias teorías para explicar los resultados tanto en campo como en laboratorio. La expansión es causada por la presión osmótica. Los geles de silicato alcalino que se forman pueden ejercer grandes presiones de inhibición durante el proceso de expansión, mayores que la resistencia a la tracción del concreto.¹⁴

Las reacciones por las cuales se produce la formación del gel son dos y lo hacen simultáneamente:¹⁵

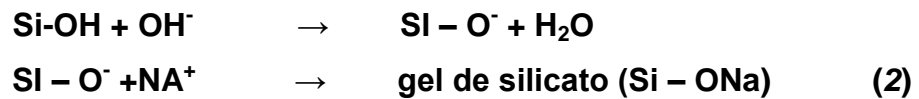
¹² GONZALES DE LA COTERA, Manuel. "Ataque químico al concreto". Exposición en el Ciclo Organizado por el ACI. Diciembre, 1991.

¹³ ALAEJOS PILAR, BERMÚDEZ MIGUEL. "Metodología para el estudio del deterioro del hormigón ocasionado por la reacción álcali-sílice", Madrid: Ed. CEDEX, 2005.

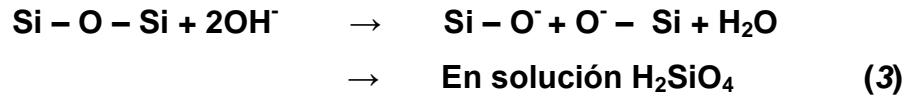
¹⁴ TOUMA, Wissam. "Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation Alternatives" Research Report ICAR, 2000.

¹⁵ Boletín 79 de CNEGP, "Reacción Álcali-Árido en Presas de Hormigón. Ideas Generales y Recomendaciones". Comité Español Grandes Presas, 1991.

- **Reacción 1:** es la reacción ácido-base, donde hay neutralización de los grupos silanol (Si-OH) por la solución alcalina de la soda caustica NaOH. 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. Esta reacción se presenta en la ecuación 1.



- **Reacción 2:** En la ecuación 2 se muestra el 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 H₂SiO₄.



Según las reacciones que pueden producirse, se aprecia la importancia de los iones OH⁻ en las mismas, puesto que para que ocurran es importante la presencia de este ión. El desarrollo de la reacción álcali-sílice, requiere de sílice reactiva, álcalis de sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción produzca gran expansión y fisuras se requiere que la cantidad de sílice reactiva y de los álcalis disponibles sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa. La reacción parará cuando uno de los dos reactivos se consuma o cuando la concentración del ion hidroxilo sea tan baja que la sílice reactiva no es atacada.¹⁶

¹⁶ ALAEJOS, P., BERMUDEZ, M. "Durabilidad y Procesos de Degradación del Hormigón de Presas. Madrid: CEDEX, 2003.

2.3 FACTORES QUE AFECTA LA RESISTENCIA DEL CONCRETO.

Los factores que influyen sobre la resistencia del concreto son:¹⁷

- Aquellas variables que influyen en el proceso de fabricación del concreto, como: Mezclado, transporte, colocación, compactación y curado.
- Aquellos factores relacionados con la calidad y la cantidad de elementos constitutivos en el concreto, tales como: Agregados, cemento y agua.

De estos dos grandes grupos los factores que más afectan esta propiedad son: el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, el tamaño máximo de agregado grueso y el tiempo de curado. A continuación se presentan algunos detalles de cada uno de ellos.

2.3.1 Cemento. El efecto del cemento sobre la resistencia a la compresión depende de cuales sean sus características físicas así como de la cantidad requerida dentro de la mezcla, esto se debe a que el cemento es el elemento más activo en la mezcla afectando de sobremanera esta propiedad. Por lo tanto, un aumento en el contenido de cemento produce un aumento en la resistencia, pero este contenido no debe exceder de 470Kg/m^3 ya que produce un efecto opuesto sobre esta propiedad mecánica.¹⁸

2.3.2 Relación agua/cemento. La relación agua/cemento es el factor más importante en la resistencia a la compresión de un concreto. Sin embargo las

¹⁷ ALAEJOS PILAR, BERMÚDEZ MIGUEL. "Metodología para el estudio del deterioro del hormigón ocasionado por la reacción álcali-sílice", Madrid: Ed. CEDEX, 2005.

¹⁸ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Morteros "Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas". Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004.

medidas de esta propiedad pueden variar según sean el tamaño de agregado y el cemento utilizado para una misma relación A/C. Entonces es necesario considerar estos dos factores antes de analizar cuál es el efecto real.

2.3.3 Calidad de agregados. La calidad de los agregados influye sobre la resistencia de un concreto a través de las siguientes propiedades: Granulometría, forma y textura de los agregados, tamaño máximo del agregado grueso y la resistencia y rigidez de las partículas del agregado.¹⁹

2.3.4 Tamaño máximo de agregado grueso. Otro factor importante que afecta la resistencia es el tamaño máximo de agregado grueso. Esto se debe a que la cantidad de cemento necesario para conseguir determinada resistencia va a depender del tamaño máximo de agregado, pues se ha demostrado que se requiere de una mayor cantidad de cemento cuando se trabaja con agregado de tamaño máximo menor lo que produce un aumento en la resistencia. Lo mismo ocurre cuando se trabaja con la misma relación agua/cemento, se obtiene mayor resistencia si los concretos son preparados con agregados de tamaño máximo menores.²⁰

Por otra parte, al utilizar tamaños máximos mayores se reducen el área superficial y los vacíos en el agregado. Lo que genera una reducción en el contenido de cemento produciendo valores menores en la resistencia.

2.3.5 Tiempo y tipo de curado del concreto. Debido a que durante la etapa de curado se dan las reacciones de hidratación cemento-agua, las cuales presentan gran incidencia sobre la resistencia. Un curado donde el concreto se encuentre

¹⁹ PERLES, Pedro. "Hormigón Armado". Bueno Aires: Nobuko, 2005.

²⁰ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Morteros "Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas". Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004.

expuesto al aire producirá una hidratación incompleta causando una disminución en la resistencia.

A diferencia de lo que ocurre con el concreto al realizar el curado por vía húmeda, ya que por este método se impide el secado de la muestra al mantener el concreto tan saturado como sea posible, logrando que las reacciones de hidratación se den completamente y por consiguiente se obtenga un aumento en la resistencia de forma continua que va a depender del tipo de cemento.

2.4 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

“La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica desarrollada para probar los materiales y se usa en el control de calidad. Es una prueba no destructiva y en la actualidad es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su fácil empleo además permite determinar la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto”.²¹

Esta técnica fue desarrollada en el año de 1949 por Leslie y Cheesman en Canadá y tuvo gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas.²²

La VPU se basa en la propagación de una onda a través de un medio sólido, cuya velocidad de propagación dependerá directamente de las propiedades elásticas de cada material. La frecuencia utilizada para las ondas longitudinales en evaluación de materiales metálicos se encuentra entre 0.25 y 25 MHz, mientras que las

²¹ SOLÍS R y BAEZA J. Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto.

²² LESLIE, J. R. and CHESSMAN, W. J. “An Ultrasonic Method of Studying Determination and Cracking in Concrete Structures”, Journal of the American Concrete Institute”. September 1949.

frecuencias empleadas en el concreto se encuentran dentro del rango de 20 a 150 KHz. Estas frecuencias bajas permiten longitudes de onda grandes aptas para la inspección de materiales heterogéneos, característica principal del concreto (ver norma ASTM C 597).²³

En general, el uso de esta técnica como ensayo no destructivo es una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido, pero en ningún caso reemplazan a los ensayos destructivos. Esto se debe a que la medida de esta técnica se ve condicionada por la heterogeneidad del concreto. Por lo tanto, la correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico está fuertemente afectada por factores como: porosidad, tipo y tamaño de agregado, tipo de cemento, relación agua/cemento, condiciones de fraguado y curado, edad del concreto.²⁴

A partir de los diferentes estudios realizados en 1985 se publicó la clasificación de la calidad del concreto a partir de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico. Dicha clasificación se puede observar en la Tabla 1.²⁵

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico, VPU, consiste en determinar el tiempo durante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una dimensión conocida del elemento de concreto. Así, la longitud de la trayectoria (l) dividida por el tiempo (t) que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la Velocidad de Pulso Ultrasónico mostrada en la ecuación 4.²⁶

²³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM - American Society of testing for materials. ASTM C597, USA, 2009.

²⁴ POPOVICS S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic. Pulse velocity relationship. Materials Evaluation. Febrero 2001

²⁵ MALHOTRA, V.M. "Non-destructive testing of concrete structures". International Atomic Energy Agency. Training course series No. 17, Vienna, 2002.

²⁶ MALHOTRA, V.M & CARINO, N. J, "The Ultrasonic Pulse Velocity Method", Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 2004.

$$V = \frac{l \text{ (longitud recorrida por la onda [m])}}{t \text{ (tiempo de transmision de la onda)[s]}} \quad (4)$$

Tabla 1. Clasificación de la calidad del concreto por medio de la Velocidad de Pulso Ultrasónico

VELOCIDAD (m/seg)	CALIDAD DEL CONCRETO
Más de 4500	Excelente
3500-4500	Buena
3000-3500	Regular
2000-3000	Mala
Menos de 2000	Muy mala

Esta prueba no destructiva no solo permite determinar las discontinuidades de un material heterogéneo como lo es el concreto, sino también algunas de sus propiedades mecánicas más influyentes al momento de ser utilizada en construcción como: Modulo elástico y Resistencia a la compresión.

El ensayo puede realizarse de tres maneras:²⁷

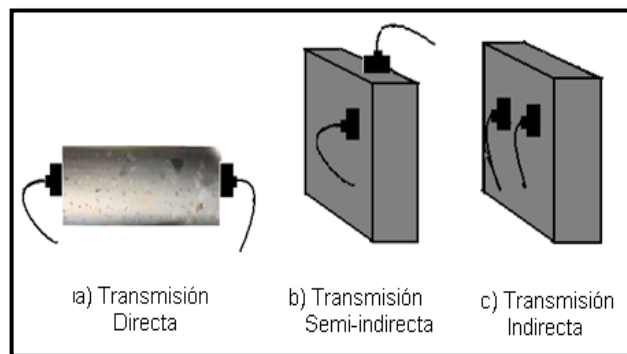
- **Transmisión directa.** Los terminales del emisor y el receptor son colocados y enfrentados en superficies opuestas del concreto. Este método presenta grandes ventajas pues produce una mayor sensibilidad y una ruta de viaje más definida por esto es empleada en vigas y columnas. (Figura 1).
- **Transmisión semi-directa.** Las terminales son colocadas adyacentemente formando generalmente un ángulo de 90°, este método se emplea en

²⁷ MALHOTRA, V.M. "Non-destructive testing of concrete structures". International Atomic Energy Agency. Training course series No. 17, Vienna, 2002.

pilares, estribos o zapatas. (Figura 1).

- **Transmisión indirecta o superficial.** En este caso las terminales son colocadas en la misma superficie del concreto. Este es el método menos utilizado debido a la baja sensibilidad. (Figura 1).

Figura 1. Mecanismos de transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico.



2.4.1 Factores que afecta la Velocidad de Pulso Ultrasónico del concreto. A medida que el estudio del concreto por medio de la Velocidad de Pulso Ultrasónico aumenta se ha demostrado que los elementos presentes en la mezcla así como los condiciones a las cuales se somete la misma tiene un efecto pronunciado sobre esta técnica. Alguno de estos factores son: cantidad y tipo de agregado, relación agua/cemento, tipo y tiempo de curado del concreto. ²⁸

- **Cantidad y Tipo de agregado:** De estudios anteriores se ha demostrado que tanto la cantidad como el tamaño de agregado afectan considerablemente las reacciones de hidratación y la trayectoria de la onda, generando variaciones en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico para concretos con una

²⁸ MALHOTRA, V.M & CARINO, N. J, "The Ultrasonic Pulse Velocity Method", Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 2004.

misma relación A/C.^{29,30}

- **Relación agua/cemento:** Puesto que es la relación A/C quien determina parte de las características del concreto, su efecto sobre la técnica de VPU es inversamente proporcional, ya que a medida que disminuye la relación, los valores de velocidad de pulso aumentan, debido a que la cantidad de agua presente en la mezcla es menor, lo que disminuye el porcentaje de porosidad en la material, evitando la dispersión de las ondas ultrasónicas y por tanto, tomando menos tiempo en el recorrido de la trayectoria.
- **Tipo y tiempo de curado del concreto:** Las reacciones de hidratación aumentarán según sean las condiciones de humedad y temperatura bajo las cuales sea el curado, causando una variación representativa en la Velocidad de Pulso Ultrasónico. Por lo tanto, si el concreto es curado bajo condiciones de humedad del 100%, la velocidad de onda aumentará en un porcentaje mayor debido a las condiciones de saturación.

Por otra parte, El aumento en la edad del concreto genera una disminución en la porosidad debida a las reacciones de hidratación, lo que conlleva a que las ondas se propagan más rápido en este medio sólido.³¹

²⁹SOLÍS R y BAEZA J. Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto.

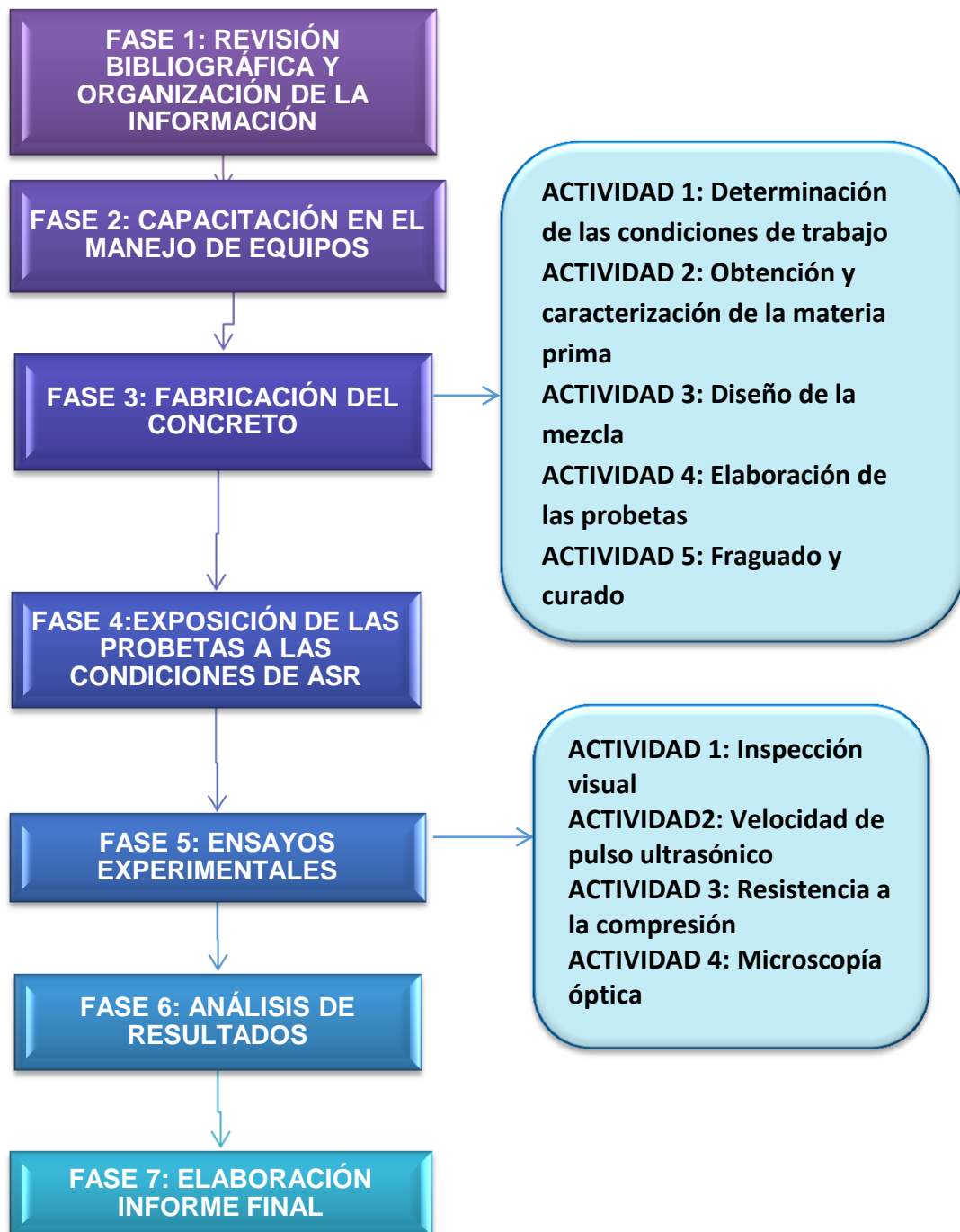
³⁰ SOLÍS R; MORENO ERICK y R WILLIAM. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados

³¹ SOLÍS R; MORENO ERICK y R WILLIAM. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados

3 METODOLOGÍA

En la Figura 2 se presenta el esquema de la metodología seguida en el presente proyecto.

Figura 2. Metodología para el desarrollo del proyecto



3.1 FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Esta fase incluyó la búsqueda y revisión de diferente material bibliográfico acerca de las propiedades y características del concreto, la reacción álcali-sílice que lo afecta, la velocidad de pulso ultrasónico empleada como técnica no destructiva para investigar el daño en estructuras de concreto, entre otros. Esta revisión se basó principalmente en el estudio de artículos, normas, tesis e investigaciones tanto nacionales como internacionales que se han llevado a cabo con el fin de determinar las condiciones de la investigación.

3.2 FASE 2: CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DE EQUIPOS

En esta fase se realizó la capacitación en el manejo de los diferentes equipos que fueron utilizados durante la investigación para realizar tanto la exposición de las probetas a las condiciones de aceleración de la reacción álcali-sílice como las diferentes pruebas que se le hicieron a estas probetas. Los equipos que se utilizaron durante la investigación se encuentran en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón y en el laboratorio de microscopía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander y a continuación se describe cada uno de ellos:

3.2.1 Cámara de ambiente controlado. El equipo utilizado para exponer las probetas de concreto fue una cámara de ambiente controlado perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la universidad. Dicha cámara se usó para proporcionar la temperatura y humedad adecuada que lograran acelerar la reacción álcali-sílice, por lo tanto, se realizó una capacitación por parte del fabricante. La capacitación incluyó el manejo de los diferentes dispositivos propios

de la cámara (controladores de temperatura, humedad y tiempo) y del compresor al que se encuentra conectado.

3.2.2 Equipo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Para realizar los ensayos no destructivos a las probetas se recibió capacitación del equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL el cual usa dos transductores de 54KHz de frecuencia, midiendo el tiempo de propagación de la onda a través de la pieza con relación a la distancia entre los transductores. Este equipo pertenece a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

3.2.3 Equipo de resistencia a la compresión. El equipo utilizado para realizar el ensayo de resistencia a la compresión fue la máquina AMSLER (Alfred J. Amsler y cia) que aplica una carga de compresión axial para determinar la máxima carga soportada por la pieza. Para el uso de este equipo se llevó a cabo una capacitación acerca del conocimiento básico en su funcionamiento por parte del técnico encargado. Este equipo pertenece a la Escuela de Ingeniería Civil.

3.2.4 Equipo de microscopia óptica. El equipo utilizado para realizar el ensayo de microscopia óptica fue un estereoscopio marca OLYMPUS SZ61 usando aumentos de 10x. Este equipo pertenece a la Escuela de Ingeniería metalúrgica y se llevó a cabo capacitación acerca de su funcionamiento por parte el técnico encargado.

3.3 FASE 3: FABRICACIÓN DEL CONCRETO

En esta fase se llevó a cabo el diseño y elaboración tanto de las probetas de concreto que fueron expuestas a las condiciones de aceleración de la reacción álcali-sílice como de las probetas inocuas. En total se fabricaron ochenta y cuatro

(84) probetas teniendo en cuenta la determinación de las condiciones de trabajo, la obtención y caracterización de la materia prima, diseño de la mezcla, elaboración, fraguado y curado de las mismas.

3.3.1 ACTIVIDAD 1: Determinación de las condiciones de trabajo. Para la presente investigación se determinó trabajar con veintiocho (28) probetas inocuas, es decir, sin cambios en su composición y cincuenta y seis (56) con alteración en la materia prima para acelerar la reacción álcali-sílice. Además, a partir de la revisión bibliográfica se determinó que treinta y dos (32) de las cincuenta y seis (56) probetas con alteración en su composición deberían exponerse dentro de la cámara de ambiente controlado a una temperatura de 48°C y humedad mínima del 80%. A las probetas alteradas se les agrego NaOH al agua de mezcla según norma **ASTM C 1293**.³² Las condiciones de trabajo determinadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de trabajo de la investigación

Nº probetas	Componentes	% Reemplazo de arena por vidrio	Condiciones de trabajo	
			Curado	Tratamiento posterior posterior
28	Agua, cemento, grava, arena.	0%	100% humedad	16 probetas secadas al ambiente
28	Agua, cemento, grava, arena, vidrio, NaOH.	15%	100% humedad	16 probetas en cámara a 48 °C y 80 % humedad
28	Agua, cemento, grava, arena, vidrio, NaOH.	25%	100% humedad	16 probetas en cámara a 48 °C y 80 % humedad

³² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. ASTM C 1293, 2008

3.3.2 ACTIVIDAD 2: Obtención y caracterización de la materia prima. En esta etapa se buscaron los diferentes materiales necesarios para la fabricación de las probetas los cuales se mencionan a continuación:

Cemento: Se utilizó cemento portland tipo I el cual cumplió con los requerimientos establecidos por las normas técnicas colombianas NTC 121³³ y NTC 321³⁴ para la elaboración de los cilindros de concreto.

Agregados: Se utilizó agregado grueso (grava) y fino (arena). Para el agregado grueso se determinó un tamaño máximo de 19 mm (3/4”), mientras que al agregado fino se le realizó análisis granulométrico dando como resultado un módulo de finura igual a 3,0. Estos resultados permitieron realizar el diseño de mezcla. Los resultados del análisis granulométrico se encuentran en el anexo A.

Vidrio: Para acelerar la reacción álcali-sílice se utilizó vidrio reciclado de uso común como reemplazo en el agregado fino al cual se le realizó un proceso de conminución que consistió en triturar el material en una trituradora de mandíbula para luego realizar molienda en un molino de bolas, una vez triturado y molido el vidrio se le realizó un análisis granulométrico para determinar el módulo de finura dando 3,8 como resultado. Los resultados del análisis granulométrico se muestran en el anexo A.

Agua: El agua que se utilizó para realizar la mezcla de los componentes del concreto fue tomada del acueducto metropolitano de Bucaramanga.

³³ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas. NTC 121.

³⁴ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas. NTC 321

3.3.3 ACTIVIDAD 3: Diseño de la mezcla. Teniendo en cuenta una relación agua cemento (A/C) de 0,5, el tamaño máximo de agregado grueso (3/4") y el módulo de finura de la arena de 3,0 se realizaron tres diseños de mezcla, el primero para las probetas inocuas, para el segundo y tercer diseño se reemplazó cierta cantidad de agregado fino por vidrio, además, se adiciono NaOH al agua de mezcla según norma ASTM C-1293. Los diseños de mezcla se realizaron para un total de ochenta y cuatro (84) probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud y se presentan en el ítem 4.1.1 del siguiente capítulo.

3.3.4 ACTIVIDAD 4: Elaboración de las probetas. Para la elaboración de las probetas se utilizaron moldes plásticos cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud, los cuales se le lavaron previamente para luego adicionarles una capa de ACPM en toda la superficie y grasa en la base de estas facilitando el desmoldeo de las probetas.

Una vez limpios los moldes se pesaron cada uno de los componentes a utilizar según los diseños de mezcla antes mencionados. En una bandeja metálica se agregaron los componentes mostrados en la Tabla 2 para las probetas inocuas y para las probetas alteradas mezclando muy bien los materiales hasta obtener una mezcla uniforme según norma NTC 550³⁵ se llenaron los moldes con la mezcla apisonando veinticinco veces con varilla metálica de 60 cm de longitud y 5/8" de diámetro cada 1/3 de la probeta, terminando de preparar la probeta con un palustre para darle uniformidad a la superficie. En la Figura 3 se muestran algunas probetas minutos después de su fabricación.

3.3.5 ACTIVIDAD 5: Fraguado y curado. Una vez elaboradas las probetas éstas se dejaron en fraguado durante veinticuatro (24) horas dentro de los moldes.

³⁵ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Concretos. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra. NTC 550

Luego se desmoldaron utilizando aire a presión mediante un compresor de dos caballos de fuerza. A continuación se sumergieron las probetas en una pileta con agua como se muestra en la Figura 4 para realizar el curado en condición de 100% de humedad durante veintiocho (28) días, tiempo durante el cual se sacaron treinta y seis (36) probetas para realizar los primeros ensayos tal y como se muestra en la Tabla 3. Después de los 28 días se sacaron las probetas restantes y se dejaron a temperatura ambiente para que se secaran evitando que la humedad afectara el ensayo controlado bajo las condiciones de la cámara.

Figura 3. Probetas recién fabricadas



3.4 FASE 4: EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A LAS CONDICIONES DE REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE ACCELERADA

Treinta y dos (32) de las probetas que tienen alteración en sus componentes se expusieron durante un máximo de sesenta (60) días a temperatura de 48°C y humedad no menor al 80% dentro de una cámara de ambiente controlado que cuenta con una resistencia que produce la temperatura requerida, la cual es medida mediante un controlador digital de temperatura Autonics TZN4S, además, cuenta con un compresor conectado a un burbujeador para generar la humedad necesaria, la cual se verifica mediante un controlador digital de humedad relativa Full Gauge AHC, también posee un temporizador digital Autonics LE4S para

controlar el tiempo de exposición de las probetas dentro de la cámara. En la Figura 5 se muestran las probetas dentro de la cámara de ambiente controlado.

Figura 4. Curado de probetas 100% humedad

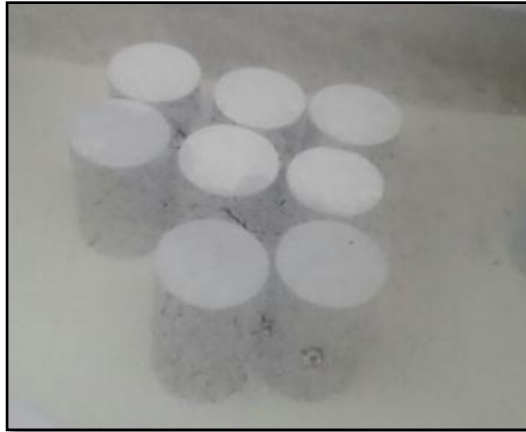


Figura 5. Exposición de las probetas en cámara



3.5 FASE 5: ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos realizados a las probetas se dividieron en dos partes, la primera parte se realizó para un total de treinta y seis (36) probetas durante el tiempo que estuvieron en curado a 100% de humedad y la segunda para las restantes cuarenta y ocho (48) probetas durante el tiempo que estuvieron en la cámara. En el caso de las probetas inocuas no se sometieron a exposición dentro de la cámara tomándolas como base para compararlas con las probetas alteradas. Dichos ensayos se muestran en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3. Ensayos experimentales durante los días de curado a 100% humedad

TIPO DE PROBETAS	Nº PROBETAS				Nº Total probetas	TIPO DE ENSAYO REALIZADO
	DIA 7	DIA 14	DIA 21	DIA 28		
Inocuas	3	3	3	3	12	Inspección visual, VPU, Resist. a la compresión
15 % vidrio	3	3	3	3	12	Inspección visual, VPU, Resist. a la compresión
25% vidrio	3	3	3	3	12	Inspección visual, VPU, Resist. a la compresión

Tabla 4. Ensayos experimentales durante los días de exposición en la cámara de ambiente controlado

TIPO DE PROBETAS	Nº PROBETAS				Nº Total probetas	TIPO DE ENSAYO REALIZADO
	DIA 15	DIA 30	DIA 45	DIA 60		
Inocuas	4	4	4	4	16	Inspección visual, microscopia óptica, VPU, Resist. a la compresión
15 % vidrio	4	4	4	4	16	Inspección visual, microscopia óptica, VPU, R. Resist. a la compresión
25% vidrio	4	4	4	4	16	Inspección visual, microscopia óptica, VPU, Resist. a la compresión

3.5.1 ACTIVIDAD 1: Inspección visual. Durante este ensayo se examinó cada una de las probetas para conocer el estado en el que se encontraba la superficie

y detectar posibles defectos como mal acabado superficial y discontinuidades y así poder determinar si la probeta tenía las condiciones para realizar los posteriores ensayos.

3.5.2 ACTIVIDAD 2. Ensayo de ultrasonido. Para este ensayo se utilizaron tres (3) probetas por cada porcentaje y por cada día de prueba. Inicialmente se lijaron las caras superficiales de las probetas con el fin que quedaran lisas y planas logrando un mejor acople y así garantizar la toma de los datos. Luego utilizando un pie de rey digital de 0,02mm de sensibilidad se tomaron tres mediciones del diámetro y de la longitud de cada una de las probetas obteniendo un promedio de estas.

A continuación se conectó y se calibró el equipo de VPU. Como acoplante se utilizó vaselina y se procedió a realizar el ensayo por el método de transmisión directa. Con el equipo se tomaron seis (6) medidas en tres (3) puntos diferentes, es decir dos por cada punto en cada probeta, las cuales indican el tiempo que se demora la onda en recorrer la probeta en microsegundos. Una vez tomados los seis valores se realizó un promedio del tiempo de transmisión y se obtuvo el valor de VPU por medio de la ecuación 3. En la Figura 6 se observa la forma en la cual se llevó a cabo los ensayos.

3.5.3 ACTIVIDAD 3: Ensayo de resistencia a la compresión. Esta prueba fue realizada a todas las probetas a las cuales se les aplicó el ensayo de ultrasonido. En este caso las probetas se colocaron en el centro del disco base del equipo acondicionándolo para que el cabezal de la máquina quedara en contacto con las caras de las probetas como se muestra en la Figura 7. Luego se comenzó a aplicar una carga eléctricamente hasta que el equipo se detenía mostrando la carga máxima que soportaba la probeta.

Figura 6. Ensayo de VPU



Figura 7. Ensayo de resistencia a la compresión



3.5.4 ACTIVIDAD 4: Ensayo de microscopia óptica. Esta prueba fue realizada para las probetas analizadas después del curado. Cada probeta se cortó transversalmente mediante un disco de punta de diamante obteniendo una probeta aproximadamente de 4 centímetros de longitud, luego se pulió superficialmente con lija 120 y se limpió para eliminar los residuos de polvo con el fin de permitir una correcta observación al microscopio. Luego se colocó la probeta

en el estereoscopio tomando las micrografías con un aumento de 10x. En la Figura 8 se muestra el posicionamiento de la probeta respecto al microscopio.

Figura 8. Ensayo de microscopia óptica



3.5 FASE 6 Y 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.

Estas dos fases se llevaron a cabo a medida que se obtenían los resultados de las pruebas realizadas. Se elaboró el informe consistente en el análisis, conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y el respectivo análisis de las fases del proyecto tales como: proceso de elaboración del concreto y ensayos experimentales realizados de inspección visual, microscopia óptica, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Adicional a esto se muestran las relaciones encontradas entre resistencia a la compresión y tiempo de curado, VPU y tiempo de curado, resistencia a la compresión y VPU.

4.1 RESULTADOS DE LA FABRICACIÓN DEL CONCRETO

A continuación se presentan los resultados obtenidos del diseño de mezcla.

4.1.1 Diseño de mezcla

Con el fin de determinar su composición se tomó una muestra del cemento Portland Tipo I empleado para la elaboración de la mezcla de concreto y se envió a un laboratorio de la ciudad de Bogotá donde se analizó por Fluorescencia de Rayos X. Este ensayo permitió conocer la cantidad de álcalis presentes en el cemento.

Para que la reacción álcali-sílice se presente debe existir en el cemento una cantidad suficiente de álcalis de sodio (Na_2O) y potasio (K_2O) que interactúen con el material silíceo de los agregados. A partir del análisis de composición del cemento mostrado en la Tabla 5 se logró observar que el cemento no cuenta con presencia de óxido de sodio pero si con suficiente óxido de potasio. Estos resultados cumplen con la cantidad de álcalis equivalente especificado en la

norma ASTM C150 ³⁶ donde se muestran las composiciones requeridas para cada tipo de cemento.

Tabla 5. Análisis de fluorescencia de rayos x del cemento

	%	Compuesto	%
SiO ₂	20.1	V ₂ O ₅	N.D
TiO ₂	0.21	Cr ₂ O ₃	N.D
Al ₂ O ₃	4.37	SrO	0.34
Fe ₂ O ₃	3.00	ZrO ₂	N.D
Mn ₃ O ₄	0.04	BaO	0.03
MgO	1.66	NiO	N.D
CaO	58.11	CuO	N.D
Na ₂ O	N.D	ZnO	N.D
K ₂ O	0.99	PbO	N.D
P ₂ O ₅	0.12	LOI	9.05
SO ₃	1.96	ND: NO DETECTADO	

Fuente. Laboratorio

Con base en estos resultados se planteó según norma ASTM C 1293 ³⁷ elevar el elevar el contenido de álcali equivalente (Na₂Oe) de la mezcla hasta 1,25% de masa en cemento por medio de la ecuación 4 y así determinar la cantidad de NaOH que se debía adicionar al agua de mezcla para generar la reacción álcali-sílice.

$$\text{Na}_2\text{Oe} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O} \quad (4)$$

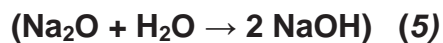
De la Tabla 5 y la ecuación 4 se obtiene:

³⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for Portland Cement. ASTM international - American Society for Testing and Materials. ASTM C 150,USA, 2004.

³⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. ASTM C 1293, 2008

$$\text{Na}_2\text{Oe} = 0\% \text{ Na}_2\text{O} + 0,99 \times 0,65 \text{ K}_2\text{O} = 0,65\% \text{ álcali}$$

Teniendo el contenido de álcali equivalente y la cantidad de cemento requerida para una (1) probeta inocua (0,6656 Kg), el cual se determinó en el diseño de mezcla que se encuentra en el anexo B, se calculó la cantidad de Na_2O a agregar para veintiocho (28) probetas. Luego se realizó la conversión a NaOH por medio de la ecuación 5 y del factor de conversión obtenido a partir de los pesos moleculares (ecuación 6). Estos cálculos se muestran en la Tabla 6.



Peso molecular:

Na_2O : 61,98 g/mol

NaOH : 39,997 g/mol

$$\frac{2 \times 39,997}{61,98} = 1,297 \quad (6)$$

Tabla 6. Calculo del contenido de NaOH para 28 probetas

	Contenido (Kg)
Cemento en el concreto para 28 probetas	$0,6656 \times 28 = 18,6368$
Álcali en el cemento	$18,6368 \times 0,65\% = 0,1211$
Álcali requerida en el concreto	$18,6368 \times 1,25\% = 0,2326$
Cantidad de álcali a agregar (Na_2O)	$0,2326 - 0,1211 = 0,1118$
Cantidad de álcali a agregar (NaOH)	$0,1118 \times 1,297 = 0,1450$

Para los diseños de mezcla de las probetas alteradas se añadió el NaOH al agua según el dato calculado anteriormente, además se sustituyó el agregado fino de las probetas inocuas en 15 y 25% de vidrio molido cuyo módulo de finura fue de 3,86. Los diseños de mezcla se realizaron teniendo en cuenta una relación A/C igual a 0,5. Las cantidades de cada constituyente se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Diseños de mezcla para probetas inocuas y alteradas

Constituyente	Masa (Kg) 28 probetas inocuas	Masa (Kg) 28 probetas 15% vidrio	Masa (Kg) 28 probetas 25% vidrio
Agua	9.3184	9.3184	9.3184
Cemento	18.6368	18.6368	18.6368
Grava	40.2696	40.2696	40.2696
Arena	40.6728	34.5718	30.5046
Vidrio	0	6.1009	10.1682
NaOH	0	0.1450	0.1450

4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los resultados y análisis de los ensayos experimentales se presentan en dos partes, en la primera se encuentran los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas en el tiempo de curado y en la segunda parte se muestran los resultados durante la exposición de las probetas a la reacción álcali-sílice acelerada.

4.2.1 Ensayos experimentales durante el curado a 100% humedad.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de inspección visual, resistencia a la compresión y VPU durante los días de curado a 100% de humedad.

4.2.1.1 Inspección visual. Una vez se desencofraron las probetas del molde y antes de sumergirlas en agua se inspeccionaron todas las probetas fabricadas para el estudio, con el fin de evaluar su estado superficial y determinar si estas se encontraban en buenas condiciones para la experimentación. En este aspecto se observó que las muestras no presentaron fisuras, descascaramiento, segregación y desportillamiento de las caras superior e inferior. En la Figura 9 se observa un ejemplo de cómo se encontraban las probetas, las cuales contaron con un buen estado superficial en el cuerpo, aunque debido al aire atrapado entre el molde y la mezcla de concreto algunas presentaron oquedades.

Debido a que las caras superior e inferior de las probetas se encontraban con una superficie rugosa y poco uniforme, fue necesario pulir todas las probetas con lija 120 y obtener una superficie adecuada para realizar el ensayo de velocidad de pulso, esto con el fin de tener un buen acoplamiento entre el transductor y la muestra para la toma de medidas del tiempo de vuelo.

Figura 9. Estado superficial de la probeta a ensayar



4.2.1.2 Resistencia a la compresión. Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a tres probetas en los días 7, 14, 21 y 28 de curado. Los valores de

resistencia a la compresión se presentan en la tabla 8 y se calcularon mediante la siguiente relación:

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Dónde:

f'(c): Resistencia a la compresión [MPa];

P: Fuerza máxima soportada [kN];

A: Área de la sección transversal [m²].

Tabla 8. Resistencia a la compresión vs tiempo en curado

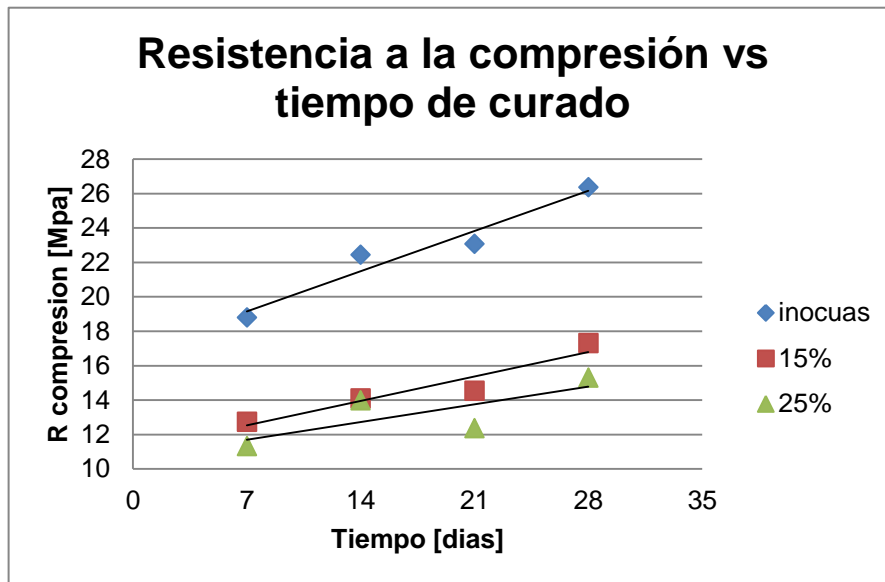
Tiempo (días)	f'c (MPa)		
	Inocuas	15%	25%
7	18.78	12.72	11.32
14	22.44	14.08	13.98
21	23.07	14.52	12.36
28	26.36	17.31	15.30

En la Gráfica 1 se observa para las probetas inocuas y aquellas con remplazo del 15 y 25% de agregado fino, que a medida que transcurre el tiempo de curado aumentó su resistencia a la compresión. Sin embargo, se observa que la sustitución por vidrio molido impacta negativamente en la resistencia a la compresión puesto que entre más agregado fino fue sustituido menor fue su resistencia como se aprecia en las probetas con 15% y 25% de reemplazo. Este comportamiento ya ha sido reportado por diferentes autores.^{38, 39}

³⁸ LESLIE, J. R. and CHESSMAN, W. J. "An Ultrasonic Method of Studying Determination and Cracking in Concrete Structures", Journal of the American Concrete Institute". September 1949.

En la medida en que haya suficiente agua el cemento continuará hidratándose y reaccionando hasta que todos los espacios de poros disponibles se vean colmados con los productos de hidratación o hasta que no haya más cemento para hidratar.⁴⁰

Gráfica 1. Resistencia a la compresión vs tiempo en curado



4.2.1.3 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU). Se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico a tres probetas durante los días 7, 14, 21 y 28 de curado. En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos para cada día.

En la Gráfica 2 se observa que a medida que aumenta el tiempo de curado la VPU de las probetas va aumentando debido a la formación de productos de hidratación. Al igual que en la Gráfica 1 se observa que la cantidad de agregado fino sustituido

³⁹ R. N. SWAMY & M.M. AL-ASALI. "Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction", International Conference on In Situ and Non-Destructive Testing of Concrete, Ottawa. American Concrete Institute, 1988

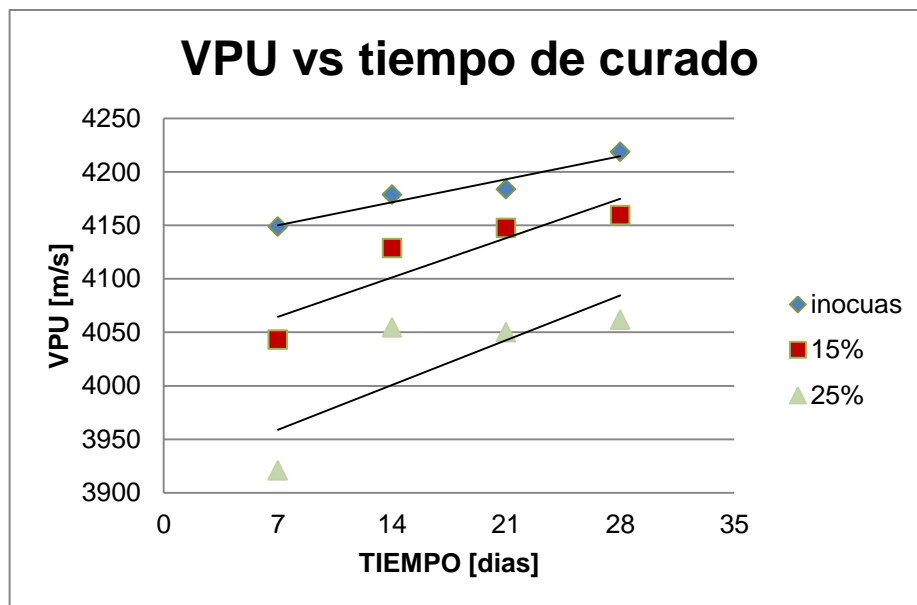
⁴⁰ GIRALDO M, MANUEL A. "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación", 2005

impacta negativamente en la VPU ya que a mayor sustitución de agregado fino menor velocidad de pulso ultrasónico lo cual se aprecia para las probetas del 15 y 25%. En la sustitución del 25% a pesar del aumento de VPU con el tiempo posiblemente el agregado fino sustituido por vidrio ocasiona que el pulso ultrasónico tome más tiempo para realizar su trayectoria, es decir, el vidrio molido al parecer actúa como un obstáculo para el pulso ultrasónico ya que no toda la sílice del vidrio pudo haber reaccionado.

Tabla 9. VPU vs tiempo en curado

Tiempo (días)	VPU (m/s)		
	Inocuas	15%	25%
7	4148.72	4042.96	3920.76
14	4178.64	4128.73	4054.43
21	4183.78	4147.67	4049.90
28	4218.77	4159.60	4061.76

Gráfica 2. VPU vs tiempo en curado



4.2.1.4 Relación entre resistencia a la compresión vs VPU. A continuación se presenta la relación entre la resistencia a la compresión y la VPU para las probetas inocuas y con sustitución del 15 y 25% de vidrio. En la Gráfica 3 se observa que las probetas inocuas presentan un comportamiento lineal entre la resistencia a la compresión y la VPU, relacionándose por medio de la siguiente expresión:

$$f'(c) = 0,1078x - 428,16 \quad (8)$$

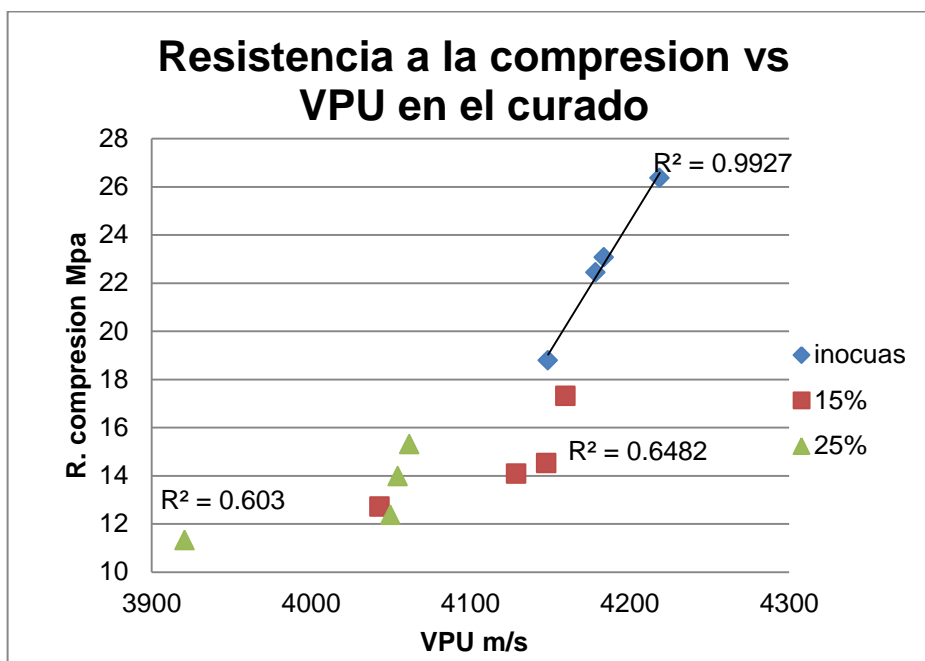
Sin embargo a pesar del comportamiento observado anteriormente, para las probetas con sustitución del 15 y 25% no fue posible una relación lineal entre resistencia a la compresión y VPU durante el curado debido a que esta sustitución hace a las probetas más heterogéneas ya que al parecer la sílice del vidrio aún no ha reaccionado. Este comportamiento se explica a partir de los coeficientes de correlación donde para la curva de las probetas inocuas este valor fue de 0,9927, mientras que para las probetas de 15 y 25% estos valores son de 0,6482 y 0,603 respectivamente.

Además, como ya se mencionó, se aprecia el impacto de la sustitución de agregado fino por vidrio molido, donde a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, disminuye la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico.

4.2.2 Ensayos experimentales durante exposición a la reacción álcali-sílice acelerada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de inspección visual, microscopía óptica, resistencia a la compresión y VPU durante los días de curado a 100% de humedad.

Gráfica 3. Resistencia a la compresión vs VPU en curado



4.2.2.1 Inspección visual y microscopia óptica. La inspección visual se realizó a todas las probetas extraídas de la cámara y las probetas de referencia (inocuas), en donde se revisó si tenían grietas, fisuras o soplos por causa de la expansión de la reacción álcali-sílice. A partir de esta inspección se observó que ninguna de ellas presentó este tipo de defectología.

Además, se realizó análisis de microscopia óptica a tres (3) probetas, una (1) inocua, una (1) de sustitución del 15% y una (1) del 25% para cada día de ensayo dando un total de doce (12). Cabe aclarar que a las probetas ensayadas durante el curado no se le realizó esta prueba. Con este ensayo se buscó observar los cambios de coloración alrededor del agregado grueso debidos a la reacción acelerada, intentando encontrar contornos con aspectos gelatinosos (trasparentes o marrones y con textura resinosa) cuando se humedece la muestra y blanco o

pardo rojizo cuando se seca, lo cual indicara formación de productos entre la matriz y el agregado grueso.⁴¹

En la Figura 10 se observan las micrografías para los días 15 y 60 de las probetas ensayadas. En estas se logra apreciar la distribución del agregado fino, el agregado grueso y la matriz formada por la hidratación del cemento (mortero). Como se puede observar se presenta porosidad en algunas de ellas. En las probetas del 25% se observó (Figura 10c) presencia de vidrio molido agregado a la mezcla que no alcanzó a reaccionar probablemente al exceso del mismo. Por otro lado, al observar las micrografías no se evidencio el producto de la reacción álcali-sílice en las caras donde se realizaron los cortes.

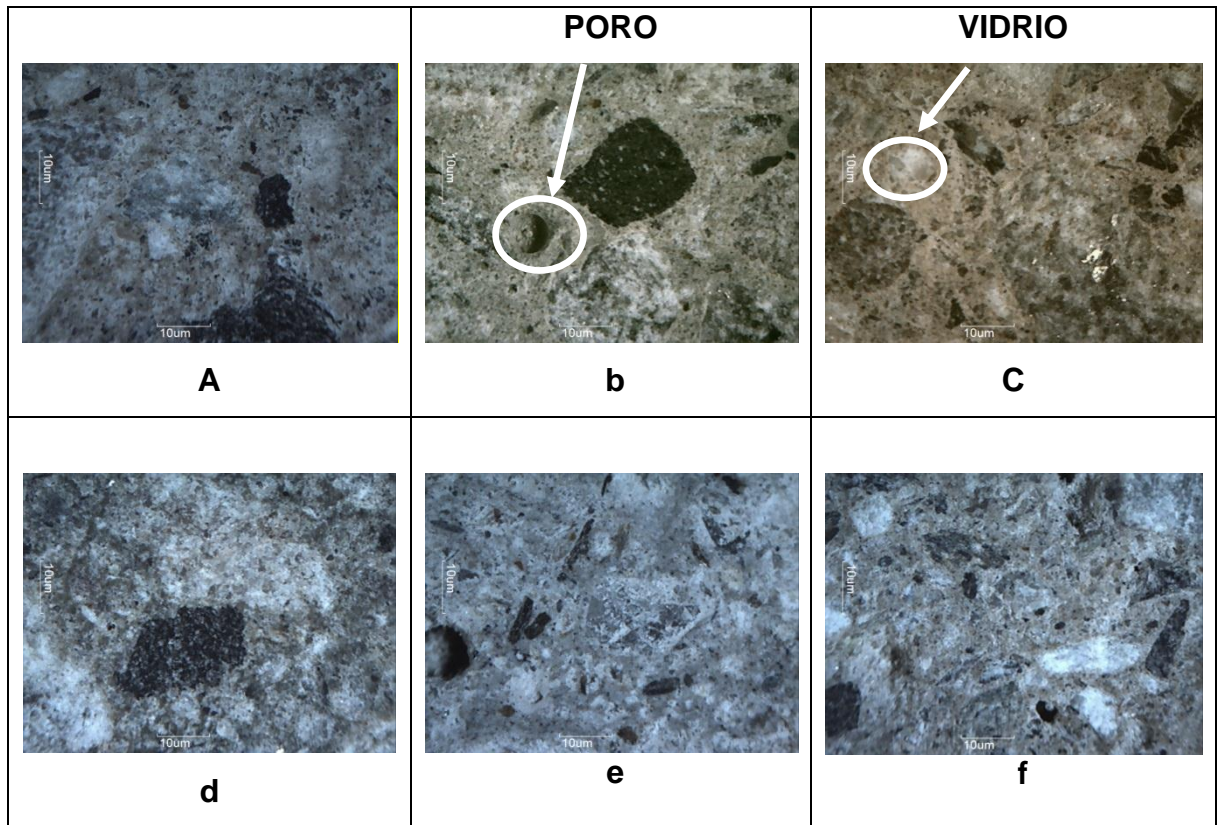
4.2.2.2 Resistencia a la compresión. En la Tabla 10 se observa que la resistencia a la compresión con la cual se iniciaron los ensayos durante la exposición a la reacción álcali-sílice acelerada, es mayor que la obtenida al día 28 de curado para todas las probetas indicando que durante el tiempo que estuvieron en proceso de secado aumentaron su resistencia, lo cual evidencia la continuidad de las reacciones de hidratación.

Tabla 10. Resistencia a la compresión vs tiempo en cámara

Condiciones de trabajo	Tiempo (días)	f'c (Mpa)		
		Inocuas	15%	25%
Curado 100% humedad	28	26.36	17.31	15.30
Exposición a reacción álcali-sílice	15	27.52	24.49	20.2
	30	28.38	25.35	20.17
	45	28.71	26.9	19.56
	60	29.19	26.24	17.83

⁴¹ ALAEJOS PILAR, BERMÚDEZ MIGUEL. "Metodología para el estudio del deterioro del hormigón ocasionado por la reacción álcali-sílice", Madrid: Ed. CEDEX, 2005.

Figura 10. Micrografías para probetas ensayadas.

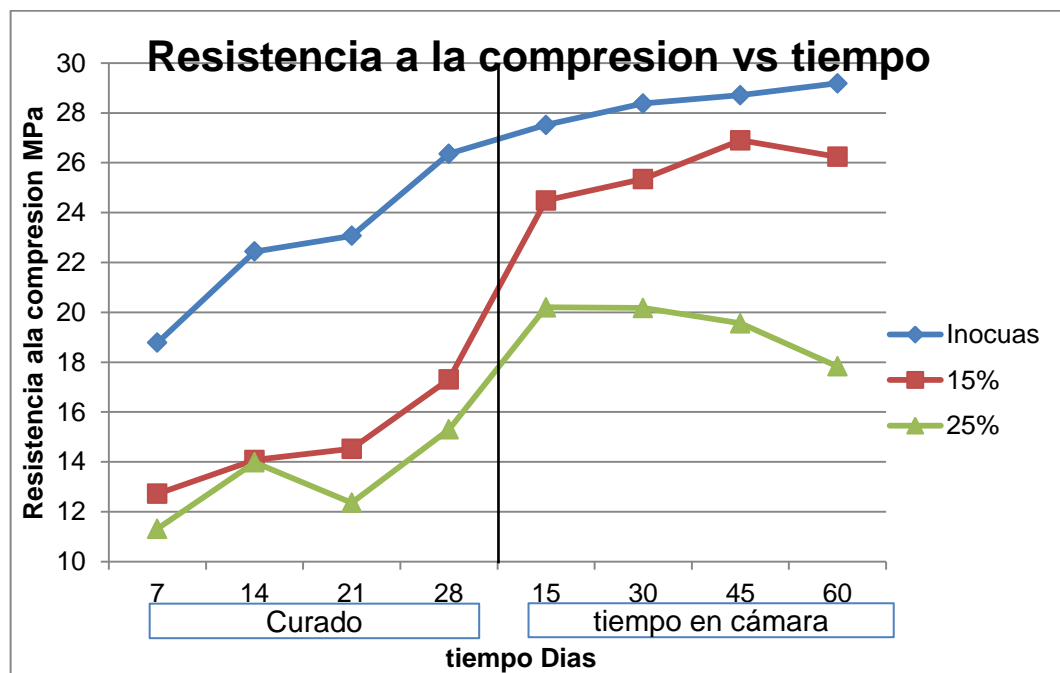


a. Probeta inocua día 15; **b.** Probeta con sustitución del 15% día 15; **c.** Probeta con sustitución del 25% día 15 **d.** Probeta inocua día 60; **e.** Probeta con sustitución del 15% día 60; **f.** Probeta con sustitución del 25% día 60.

En la Gráfica 4 se observa que la resistencia a la compresión para las probetas inocuas con el tiempo tiene la tendencia de seguir aumentando, lo cual ha de esperarse puesto que estas probetas no han sido expuestas al efecto de aceleración de la reacción álcali-sílice, mientras que para las probetas con sustitución del 15% la resistencia a la compresión sigue aumentando solo durante los primeros 45 días de exposición en la cámara de ambiente controlado pero en menor proporción que durante el tiempo de curado, para el día 60 se observa la disminución de la resistencia lo que indica que la técnica detecto un posible daño al interior de las probetas.

Por otro lado, las probetas con sustitución de agregado fino del 25% tiene una tendencia a disminuir la resistencia a la compresión a lo largo de todo el ensayo, para el tiempo en que fueron expuestas en la cámara de ambiente controlado, siendo más notoria esta disminución en los últimos 15 días, mostrando, una reducción del 7% en el día 60 respecto al día 15 de exposición, esto debido a la posible afectación por la reacción álcali-sílice y a la alta adición de vidrio, lo cual disminuye la fuerza de adhesión entre las superficie de las partículas y la matriz de la pasta del cemento.⁴²

Gráfica 4. Resistencia a la compresión vs tiempo durante la exposición en cámara



⁴² GIRALDO M, MANUEL A. "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación", 2005

4.2.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU). En la Tabla 11 se puede observar que de forma similar a la resistencia a la compresión, la velocidad de pulso ultrasónico para las probetas inocuas sigue aumentando durante todo el ensayo siendo mayor en el tiempo que estuvieron fuera del agua que para el día 28 de curado, lo que indica que las reacciones de hidratación siguieron produciéndose. Además, se puede apreciar que para las probetas del 15% la VPU es mayor en el día 15 del tiempo de exposición que en el día 28 de curado mientras que para el 25% no ocurre lo mismo, posiblemente por el tiempo que se dejaron al ambiente después del curado (1 mes) ocasionando que estas hayan perdido toda la humedad y por el exceso de vidrio molido, no se

siguieron favoreciendo las reacciones de hidratación, además, pudo ocurrir que la reacción álcali-sílice se presentó más rápidamente en las probetas del 25% que en las del 15% de sustitución de vidrio molido mostrando el cambio en los primeros 15 días.

Tabla 11. VPU vs tiempo en la cámara

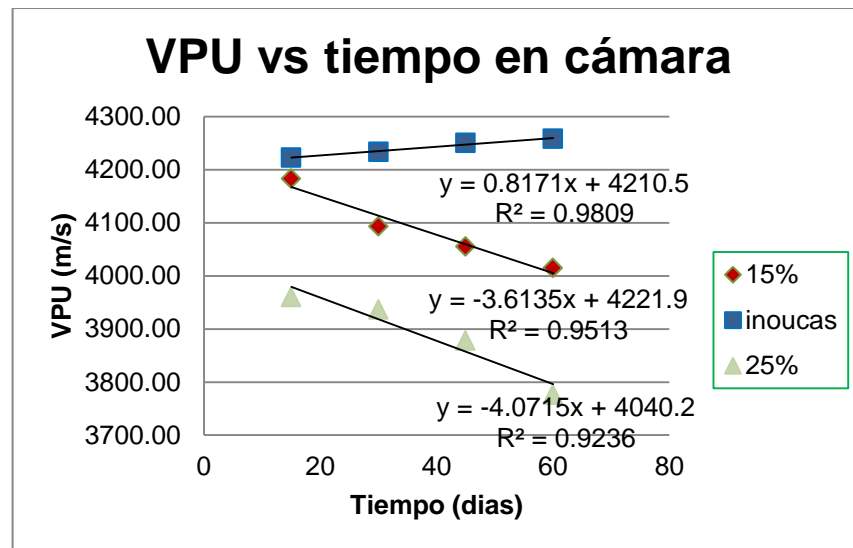
Condiciones de trabajo	Tiempo (días)	VPU (m/s)		
		Inocuas	15%	25%
Curado 100% humedad	28	4218.77	4159.6	4061.76
Exposición a reacción álcali-sílice	15	4222.8	4182.7	3960.0
	30	4233.4	4093.2	3936.3
	45	4250.4	4054.8	3878.0
	60	4258.0	4014.8	3775.9

En la Gráfica 5 se observa la VPU realizada a las probetas durante el tiempo de exposición a la reacción álcali-sílice, como se mencionó las muestras inocuas continuaron con una tendencia ascendente mientras que en las probetas alteradas se observa que la sustitución de agregado fino afectó la VPU durante el tiempo de exposición. Se puede apreciar que para las probetas alteradas existe una caída

muy pronunciada en la VPU obteniendo pendientes de -3,6135 para el 15% y de -4,0715 para el 25% de sustitución de vidrio.

En las probetas con 15% de sustitución se observó la disminución de la VPU y probablemente de las propiedades del material siendo este un comportamiento diferente a lo mostrado por el ensayo de resistencia a la compresión. Lo anterior posiblemente se debe a que la VPU fue más sensible al cambio sufrido en el material por la reacción álcali-sílice que el ensayo de la resistencia a la compresión. Lo mencionado se comprueba en las probetas con 25%, donde probablemente la reacción se presentó con mayor anticipación, mostrando que aunque la resistencia a la compresión y la VPU disminuyen se observa un mayor cambio en la última. Este comportamiento ha sido reportado anteriormente por Anderson y Seals y por Swamy y Al-Asali.^{43, 44}

Gráfica 5. VPU vs tiempo durante la exposición en cámara



⁴³ ANDERSON D, SEALS R. "Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength". Journal of the American Concrete Institute. March-April, n° 2, 1981.

⁴⁴ R. N. SWAMY & M.M. AL-ASALI. "Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction", International Conference on In Situ and Non-Destructive Testing of Concrete, Ottawa. American Concrete Institute, 1988

4.2.2.4 Relación entre resistencia a la compresión vs VPU. En la Gráfica 6 se observa que a medida que transcurre el tiempo en las probetas inocuas aumentó tanto la resistencia a la compresión como la VPU relacionándose por medio de la ecuación 9:

$$f'(c) = 0.0133x - 32.432 \quad (9)$$

La anterior ecuación tiene una pendiente positiva lo cual indica una relación directamente proporcional. Para las probetas

del 15% se obtiene un comportamiento diferente debido a que la resistencia a la compresión tardó un poco más en observar el cambio sufrido por las probetas mientras que la VPU lo detectó desde el comienzo. Para las probetas de sustitución del 25% se aprecia el mismo comportamiento lineal con pendiente positiva que en las probetas inocuas, pero con un efecto contrario, es decir, en las probetas inocuas durante el tiempo de ensayo a medida que aumentó la VPU también lo hizo la resistencia a la compresión, mientras que para el 25% de sustitución la VPU disminuyó igual que la resistencia con el paso del tiempo debido al efecto acelerado de la reacción álcali-sílice, presentándose la siguiente relación:

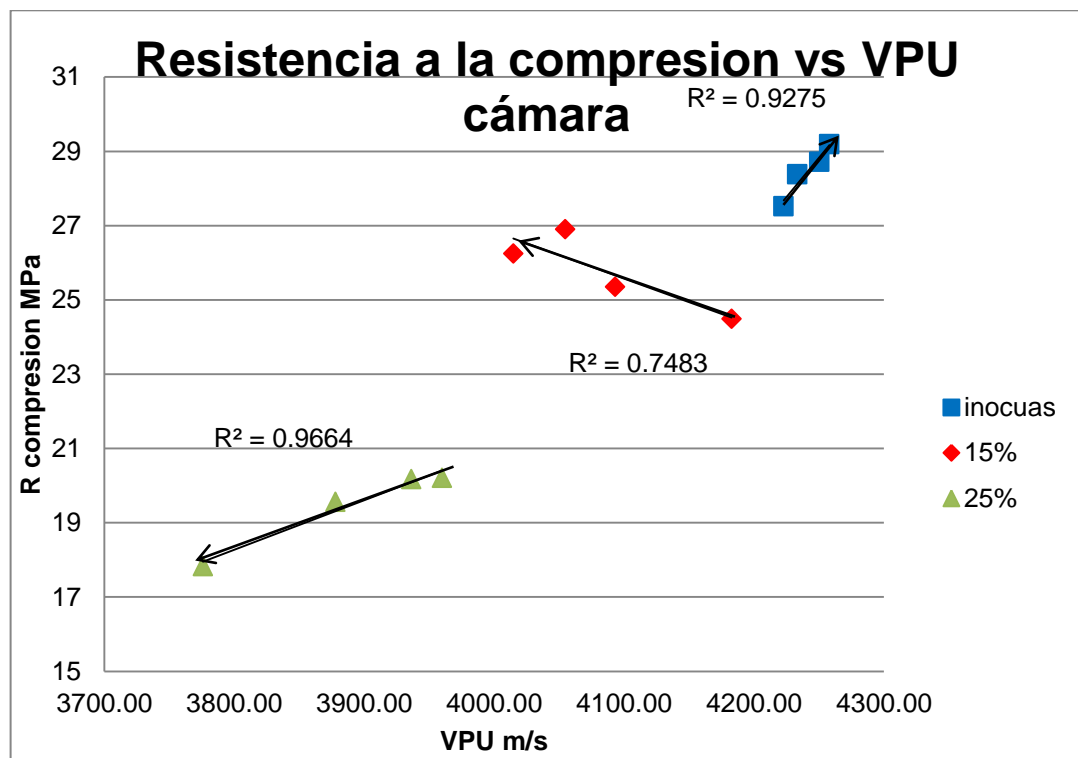
$$f'(c) = 0.0424x - 151.34 \quad (10)$$

Las correlaciones lineales encontradas entre resistencia a la compresión y VPU para las probetas inocuas y las del 25% dieron un coeficiente de correlación mayor a 0.92 mientras que en las del 15% el coeficiente de correlación fue bajo

(0.74) respecto a los otros dos. Estos modelos lineales han sido reportados por algunos autores en sus investigaciones.^{45, 46}

Además, de igual forma que en la Gráfica 3 se aprecia el impacto que tuvo la sustitución de agregado fino por vidrio molido, donde, a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución se disminuye la VPU y la resistencia a la compresión.

Gráfica 6. Resistencia a la compresión vs VPU durante la exposición en cámara



⁴⁵ MALHOTRA, V.M. "Non-destructive testing of concrete structures". International Atomic Energy Agency. Training course series No. 17, Vienna, 2002.

⁴⁶ SOLÍS C, ROMEL, MORENO, ERIC y CASTILLO WILLIAM. "Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados", 2004.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y los análisis realizados en el capítulo anterior de la reacción álcali-sílice acelerada en el concreto se puede concluir que:

- La sustitución de agregado fino por vidrio molido afecta directamente la resistencia a la compresión debido a que la sustitución disminuye la fuerza de adhesión entre las superficie de las partículas del vidrio y la matriz de la pasta de cemento, esto es apreciable desde el momento de curado donde la resistencia a la compresión de las probetas inocuas va desde los 18 a 27 MPa, mientras que las alteradas cuentan con una resistencia entre los 11 y 17 MPa. Este comportamiento también se observa en la velocidad de pulso ultrasónico mostrando que las probetas inocuas cuentan con una velocidad de pulso entre los 4100 a 4200 [m/s], mientras que las alteradas van desde los 4000 a 4160 [m/s] para las sustitución del 15% y de 3900 a 4100 [m/s] en la sustitución de 25%.
- Comparar los ensayos durante el curado y la etapa de exposición a la reacción álcali- sílice acelerada en las probetas alteradas permite asegurar que una vez expuestas a estas condiciones ($T^{\circ}48$ y HR 80% mínimo) se inició la afectación por la reacción ya que durante el tiempo de secado la resistencia a la compresión y la VPU siguieron aumentando y solo hasta que se introdujeron en la cámara se observó la disminución de estas.
- Relacionar linealmente la resistencia a la compresión y la VPU durante el tiempo de curado solo fue posible en las probetas inocuas ya que en las probetas alteradas la sustitución de vidrio hace que estas sean más heterogéneas.

- Durante el tiempo de exposición de las probetas a las condiciones establecidas después del curado se relacionó la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión del concreto afectado por la reacción álcali-sílice acelerada, donde se encontró un comportamiento directamente proporcional siguiendo un modelo lineal $f'(c)=mX + b$, las relaciones encontradas contaban con índices de correlación superiores de 0.93, excepto para la sustitución del 15% debido a que la resistencia a la compresión no mostro el avance de la reacción como si lo hizo la VPU.
- Los resultados obtenidos en la investigación muestran que la variación con el tiempo en resistencia a la compresión es menor que en la velocidad de pulso ultrasónico lo que comprueba que la VPU es un ensayo con mayor sensibilidad a los cambios sufridos en el concreto.
- Con los ensayos de inspección visual y microscopia óptica no fue posible observar indicios del deterioro en el concreto por causa de la reacción álcali-sílice.

6 RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos durante esta investigación se recomienda:

- Continuar con el estudio de la reacción álcali-sílice en concretos variando el tiempo exposición, el porcentaje de adición de vidrio, con el fin de obtener correlaciones más precisas entre Resistencia a la compresión y VPU.
- Adicional a los ensayos realizados se debe evaluar el porcentaje de expansión en el concreto por medio de la norma ASTM C227 Test Method for Pontencial Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), para relacionar la expansión producida por la reacción álcali-sílice con los resultados de la técnica de velocidad de pulso.
- Realizar un estudio a fondo de caracterización de fases para determinar los diferentes compuestos de hidratación y reacción álcali-sílice presentes en el concreto para relacionar y complementar con los demás ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALAEJOS PILAR, BERMÚDEZ MIGUEL. “Metodología para el estudio del deterioro del hormigón ocasionado por la reacción álcali-sílice”, Madrid: Ed. CEDEX, 2005.
- ALAEJOS, P., BERMUDEZ, M. “Durabilidad y Procesos de Degradación del Hormigón de Presas. Madrid: CEDEX, 2003.
- ANDERSON D, SEALS R. "Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength". Journal of the American Concrete Institute. March-April, nº 2, 1981.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. ASTM C 1293, 2008
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for Portland Cement. ASTM international - American Society for Testing and Materials. ASTM C 150,USA, 2004.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM - American Society of testing for materials. ASTM C597, USA, 2009.
- Boletín 79 de CNEGP, “Reacción Álcali-Árido en Presas de Hormigón. Ideas Generales y Recomendaciones”. Comité Español Grandes Presas, 1991.
- GIRALDO M, MANUEL A. “Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación”, 2005
- GONZALES DE LA COTERA, Manuel. “Ataque químico al concreto”. Exposición en el Ciclo Organizado por el ACI. Diciembre, 1991.
- GONZALES, FEDERICO. Manual de supervisión de obras de concreto. Ed Limusa, 2004
- HARSMSENT T. “Diseño de Estructuras de Concreto Armado” Tercera Edición, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2002.
- KOSMATKA, Steven. “Diseño y Control de Mezclas de Concreto” 1ª Edición. Portland Cement Association, 2004.

- LESLIE, J. R. and CHESSMAN, W. J. “An Ultrasonic Method of Studying Determination and Cracking in Concrete Structures”, Journal of the American Concrete Institute”. September 1949.
- MALHOTRA, V.M. “Non-destructive testing of concrete structures”. International Atomic Energy Agency. Training course series No. 17, Vienna, 2002.
- MALHOTRA, V.M & CARINO, N. J, “The Ultrasonic Pulse Velocity Method”, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 2004.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas. NTC 121.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas. NTC 321
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Concretos. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra. NTC 550

- PERLES, Pedro. "Hormigón Armado". Bueno Aires: Nobuko, 2005.
- POPOVICS S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic. Pulse velocity relationship. Materials Evaluation. Febrero 2001
- R. N. SWAMY & M.M. AL-ASALI. "Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction", International Conference on In Situ and Non-Destructive Testing of Concrete, Ottawa. American Concrete Institute, 1988
- SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Morteros "Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas". Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004.
- SOLÍS C, ROMEL, MORENO, ERIC y CASTILLO WILLIAM. "Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados", 2004.
- SOLÍS R y BAEZA J. Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto.

- SOLÍS R; MORENO ERICK y R WILLIAM. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados
- TOUMA, Wissam. “Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation Alternatives” Research Report ICAR, 2000.
- TRUJILLO, Juan. “Pastas, Morteros, Adhesivos y Hormigones”. IC Editorial, 2013.
- VERONELLI, Dante. “Tecnología de los Materiales: Durabilidad del Hormigón”. Instituto del Cemento Portland Argentino, 1975.

ANEXO A

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LAS MATERIAS PRIMAS

A continuación se muestran los análisis granulométricos realizados tanto a los agregados como al vidrio y utilizados en la fabricación de las probetas de concreto.

1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS

En la tabla 1 y 2 se muestra los resultados del análisis granulométrico realizado al agregado grueso y agregado fino con el fin de realizar adecuadamente el diseño de mezcla para las probetas que fueron evaluadas.

Tabla 1. Análisis granulométrico del agregado grueso

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
1	-	-	-	-
¾	96	8.73	8.73	91.27
½	487	44.32	53.05	46.95
3/8	315	28.64	81.69	18.31
#4	201	18.32	100.00	0
Fondo				
Total	1100			
Peso muestra		1100 g		
Tamaño máximo		1		
Tamaño máximo nominal		¾		

Tabla 2. Análisis granulométrico del agregado fino

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
4	87.2	8.72	8.72	91.28
8	170.0	17.00	25.72	74.28
16	157.6	15.76	41.48	58.52
30	210.3	21.03	62.51	37.49
50	163.2	16.32	78.83	21.17
100	70.6	7.06	85.89	14.11
Fondo	139.8	13.98	99.87	0.13
Total	998.7	99.87		
Peso muestra		1000 g		
Módulo de finura:		3.03		

$$\text{Módulo de Finura (MF)} = \sum \% \text{Retenido Acumulado (Tamiz 4 al 100)} / 100$$

1.2. Principales características de los agregados

En la tabla 3 se presentan las características de los agregados las cuales son necesarias para poder desarrollar un diseño de mezcla adecuado con las especificaciones planteadas al inicio del proyecto, este diseño de mezcla se muestra en el anexo B.

Tabla 3. Características del agregado fino y grueso

Característica	Agregado fino	Agregado grueso
Peso unitario suelto [Kg/m ³]	1400	1360
Peso unitario compactado [Kg/m ³]	1520	1455
% Absorción	2	1
% Vacíos	37	40
Gravedad específica real	2.68	2.66
Gravedad específica aparente	2.53	2.51
Gravedad específica aparente SSS	2.65	2.63

1.2 Vidrio

En la tabla cuatro se observa el análisis granulométrico al vidrio que se utilizó en la sustitución de agregado fino.

Tabla 4. Análisis granulométrico del vidrio

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
4	237.3	23.73	23.73	76.27
8	223.9	22.39	46.12	53.88
16	208.2	20.82	66.94	33.06
30	106.9	10.69	77.63	22.37
50	68.6	6.86	84.49	15.51
100	28.9	2.89	87.38	12.62
Fondo	119.7	11.67	-	-
Total	993.5	-		
Peso muestra		1000g		
Módulo de finura:		3.86		

Anexo B

DISEÑO DE MEZCLA

A continuación se muestra el diseño de mezcla realizado con las especificaciones planteadas en el proyecto, para las probetas inocuas, con sustitución de agregado fino del 15% y 25% por vidrio molido y adición de hidróxido de sodio (NaOH). El cálculo del diseño de mezcla se realizó mediante el método ACI 211.1

En la tabla 1 se muestran algunos parámetros a considerar para realizar el diseño de mezcla de acuerdo el método utilizado:

Tabla 1: Propiedades de los agregados

Asentamiento (mm)	50-100
TMN(mm,in)	19,3/4
% Aire	2
Agua (Kg)	202
a/c	0.5
F'cr(Kg/cm²)	260
Cemento (Kg)	404
MUC grueso (Kg)	1455
Agregado grueso (m³), módulo de finura	3
bo=MUC/densidad aparente de la grava SSS	0.5532
Agregado fino (m³)	0.3327
b/bo	0.6

Además de esto se tiene en cuenta en la tabla 2 las dimensiones del molde para calcular cantidad de cada constituyente para 1m³ de mezcla de concreto que se muestra en la tabla 3.

Tabla 2: Dimensiones del molde

$V=\pi*r^2*h$	0.001647
r(m)	0.050800
h(m)	0.203200

Tabla 3: Cantidad de constituyente

Constituyente	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m3)	Volumen (m3)
Agua	202	1000	0.2020
Cemento	404	3030	0.1333
Agreg. Grueso	873	2630	0.3319
Agreg. Fino	881.728	2650	0.3327

El volumen total debe ser igual a 1

$$\text{Vol (H}_2\text{O)} + \text{Vol (cemento)} + \text{Vol (AG)} + \text{Vol (AF)} = 1$$

En la tabla 4 se observa la cantidad de cada constituyente para las 84 probetas realizadas sin sustitución de vidrio, ni adición de Hidróxido de sodio.

Tabla 4: Cantidad de cada constituyente para 84 probetas

Constituyente	Masa (Kg)
Agua	26622.17
Cemento	53244.33
Agreg. Grueso	115055.20
Agreg. Fino	116205.50