

**EVALUACIÓN DE LA POROSIDAD DE MUESTRAS DE CONCRETO SIN
REFUERZO MEDIANTE ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y MEDIDAS DE
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)**

**ANDREA LISSETTE GARAVITO HERNÁNDEZ
JENNY CAROLINA GONZÁLEZ ASCANIO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2012

**EVALUACIÓN DE LA POROSIDAD DE MUESTRAS DE CONCRETO SIN
REFUERZO MEDIANTE ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y MEDIDAS DE
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)**

**ANDREA LISSETTE GARAVITO HERNÁNDEZ
JENNY CAROLINA GONZÁLEZ ASCANIO**

**Trabajo de grado realizado para optar el título de Ingeniero(a)
Metalúrgico(a)**

Director:

MsC. JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTÍZ

Codirectora:

MsC. LUZ AMPARO QUINTERO ORTÍZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios, quien me dio la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza para llegar a este momento.

A mis padres, por haberme educado y soportar mis errores. Les agradezco el cariño, la comprensión, la paciencia y el apoyo que me brindaron para culminar mi carrera profesional. ¡Gracias por darme la vida!

A mis abuelos, porque siempre he contado con ellos para todo, gracias a la confianza, por cultivar e inculcar ese sabio don de la responsabilidad.

A mis familiares, gracias por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien y por enseñarme que los sueños pueden hacerse realidad.

A Tatan, gracias por creer en mí durante todo éste tiempo, por su constante apoyo, compañía, paciencia y por brindarme su amor.

A mis amigos, Jenny, Felipe, Luis, Fabián, Cindy, Edinson, Natalia, Iván, Lala, Andrés, Mary y Oscar; les agradezco a todos con toda mi alma el haber llegado a mi vida, por los momentos inolvidables y recuerden que siempre los llevaré en mi corazón.

Basta un poco de espíritu aventurero para estar siempre satisfechos, pues en esta vida, gracias a Dios, nada sucede como deseábamos, como suponíamos, ni como teníamos previsto. Si caes es para levantarte, si te levantas es para seguir, si sigues es para llegar a donde quieres ir y si llegas es para saber que lo mejor está por venir.

Andrea Lissette Garavito Hernández

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, crecer, por llenarme de fortaleza y sabiduría para lograr este triunfo y ser mi guía incondicional durante toda mi existencia.

A mi Madre Rosalba, Gracias por el apoyo económico, por enseñarme el verdadero valor de la perseverancia, entregándome su amor, comprensión y esfuerzo que siempre me acompañó; por Tí mamá hoy logré esta meta. Te amo!

A mi Padre Guillermo, por enseñarme que debo salir adelante a pesar de todos los obstáculos y darme el ejemplo de su carisma trabajador.

A mi hermano Tato por ser mi compañía y demostrarme que las cosas más sencillas son las que tienen mayor aprecio.

A mi Nonita y mis Tías, gracias por creer en mí durante todo este tiempo y brindarme su cariño.

A mis amigos, Luis “troli” que a pesar de que hoy me voy, seguiré siendo “su carma”, Andre, Fabián, Cindy, Lala, Mito, Felipe, Edinson, Natalia, Iván, Mary y Oscar; gracias porque compartí con ustedes momentos inolvidables de emoción llenos de alegría.

Son muchas las personas especiales en mi vida a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, motivación y compañía en esta etapa que hoy culmino. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón; sin importar dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias, quiero darle las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por cada enseñanza que dejaron en mi memoria.

Jenny Carolina González Ascanío.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, a la División de investigaciones de la facultad de ingenierías fisicoquímicas (DIEF) por la financiación del presente trabajo de investigación y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por brindarnos su apoyo durante el transcurso de nuestra carrera.

Al querido señor director de nuestro proyecto MsC. Julián Orlando Herrera por su paciencia y orientación durante el desarrollo de ésta investigación, porque gracias a su confianza se convirtió en un gran amigo que brindó lo mejor de su experiencia para la realización de ésta meta; a él, le agradecemos todo su tiempo, dedicación e incondicionalidad.

A la Codirectora MsC. Luz Amparo Quintero por creer en nuestras capacidades, por ser nuestro apoyo en cada una de las dificultades que fueron superadas con éxito y brindarnos todo el conocimiento valioso para el cumplimiento del proyecto.

A los grupos de investigación GIMAT e INME, por permitirnos ser partícipes de sus investigaciones y así contribuir con un nuevo aporte para la educación. A la escuela de Ingeniería Civil, por permitirnos la utilización de los equipos necesarios y de las instalaciones del edificio de Caracterización de materiales.

A los profesores: Iván Uribe, Luis Orlando Aguirre, Custodio Vásquez, Arnaldo Alonso, Orlando Gómez, Elcy Córdoba, Afranio Cardona y Edgar Farfán por ser nuestros orientadores del aprendizaje tan valioso que nos proporcionaron para la vida.

A los técnicos: Ambrosio Carrillo, Domingo Carreño, Fermín Gómez, Mario Navarrete, Javier Gaitán, y Jairo Hernández por su disposición y colaboración en cada etapa de nuestra formación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	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
2.2 POROSIDAD EN EL CONCRETO	25
2.2.1 Porosidad de los Agregados y de la Pasta de Cemento	26
2.2.2 Tipos de Poros existentes en el concreto	27
2.3 RELACIÓN ENTRE LA POROSIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	29
2.4 ANÁLISIS PETROGRÁFICO DEL CONCRETO	30
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	33
3.1 FASE 1. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA LITERATURA RECOPIADA:	34
3.2 FASE 2. DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL FACTORIAL MULTINIVEL:	34
3.3 FASE 3. ENTRENAMIENTO:	35
3.4 FASE 4. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO:	35
3.4.1 Actividad 1. Caracterización de la materia prima:	35

3.4.2 Actividad 2. Diseño de la mezcla:	36
3.4.3 Actividad 3. Elaboración de las probetas:	37
3.4.4 Actividad 4. Fraguado y curado:	38
3.5 FASE 5. ENSAYOS EXPERIMENTALES:	39
3.5.1 Ensayo de ultrasonido:	39
3.5.2 Ensayo de resistencia a la compresión:	40
3.6 FASE 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS:	42
3.7 FASE 7. ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	42
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
4.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO	43
4.1.1 FASE 1. Seccionamiento o corte:	46
4.1.2 FASE 2. Preparación de las muestras:	46
4.1.2.1 Actividad 1. Limpieza de impurezas	46
4.1.3 FASE 3: Preparación y aplicación de la resina epoxi:	47
4.1.4 FASE 4. Calentamiento en el horno:	47
4.1.5 FASE 5. Preparación petrográfica:	47
4.1.5.1 Actividad 1. Desbaste	48
4.1.5.2 Actividad 2. Pulido	48
4.1.6 FASE 6. Análisis petrográfico del concreto	48
4.2 COMPARACIÓN ENTRE LA POROSIDAD DEL AGREGADO Y DE LA PASTA DE CEMENTO EN LAS SECCIONES PULIDAS OBSERVADAS EN EL ANÁLISIS PETROGRÁFICO.	55
4.3 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD:	57
4.4 ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	60
4.5 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:	63
4.6 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO PARA LAS DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO.	68

4.7 RELACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA POROSIDAD DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO.	70
4.8 RELACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO.	72
5. CONCLUSIONES	75
6. RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados obtenidos en la determinación de la profundidad y el área para las diferentes relaciones a/c en los días de análisis.	49
Tabla 2. Resultados del conteo de poros de las diferentes relaciones a/c en los respectivos días de curado.	57
Tabla 3. Resultados obtenidos de las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) en función de la relación agua/cemento	61
Tabla 4. Resistencia a la compresión para probetas ensayadas.	64
Tabla 5. Relación de los resultados obtenidos de las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.	69
Tabla 6. Relación de los resultados obtenidos de las Medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de la Porosidad.	71
Tabla 7. Relación de los resultados obtenidos de la Resistencia a la Compresión y de la porosidad.	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los poros de acuerdo al tamaño	27
Figura 2. Conformación de la estructura porosa del concreto	28
Figura 3. Relación existente entre la Resistencia a la Compresión y la Porosidad	29
Figura 4. Microscopios recomendados para el análisis Petrográfico	31
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto.	33
Figura 6. Proceso de elaboración de las probetas	38
Figura 7. Ultrasonido de baja frecuencia, MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL	39
Figura 8. Modelo del dispositivo empleado para la correcta ubicación de los palpadores	40
Figura 9. Maquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER	41
Figura 10. Resultados obtenidos con el video microscopio HIROX y el estereomicroscopio OLYMPUS, en pruebas preliminares.	44
Figura 11. Metodología planteada para la preparación petrográfica de muestras de concreto.	45
Figura 12. Muestras por probeta después del corte	46
Figura 13. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 7 de curado.	50
Figura 14. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 14 de curado.	51
Figura 15. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 28 de curado.	52
Figura 16. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 45 de curado.	53

Figura 17. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 60 de curado.	54
Figura 18. Porosidad de los agregados del concreto	56
Figura 19. Porosidad de la Pasta de Cemento	56
Figura 20. Comportamiento de la porosidad en función del tiempo de curado para las diferentes relaciones agua/cemento.	58
Figura 21. Comportamiento de la porosidad en función de la relación agua/cemento para los diferentes días de curado.	58
Figura 22. Diagrama de Pareto Estandarizado para las mediciones de porosidad.	59
Figura 23. Interacción entre las variables para las mediciones de porosidad.	60
Figura 24. Comportamiento de la Velocidad de Pulso Ultrasónico en Función de los días de curado del concreto	61
Figura 25. Diagrama de Pareto Estandarizado para las mediciones de VPU.	62
Figura 26. Interacción entre las variables para las mediciones de VPU.	63
Figura 27. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de los días de curado para las diferentes relaciones agua/cemento.	65
Figura 28. Líneas de falla presentadas en los cilindros ensayados	66
Figura 29. Diagrama de Pareto Estandarizado para las mediciones de resistencia a la compresión.	67
Figura 30. Interacción entre las variables para las mediciones de resistencia a la compresión	67
Figura 31. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en función de las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico en los días evaluados.	70
Figura 32. Comportamiento del Número de Poros en función de las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico en los días evaluados.	72
Figura 33. Comportamiento del Número de Poros en función de las medidas de Resistencia a la compresión en los días evaluados.	73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO	83
ANEXO B. MODELO ESTADÍSTICO PARA CÁLCULO DE MUESTRA RERESENTATIVA	89
ANEXO C .REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS PETROGRÁFICO.	91
ANEXO D. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)	92
ANEXO E. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	97

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA POROSIDAD DE MUESTRAS DE CONCRETO SIN REFUERZO MEDIANTE ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).*

AUTORES: GARAVITO HERNÁNDEZ ANDREA LISSETTE.
GONZÁLEZ ASCANIO JENNY CAROLINA**

PALABRAS CLAVE: Análisis Petrográfico, Concreto, Porosidad, Sección Pulida, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Resistencia a la compresión.

RESUMEN

La porosidad es una característica relevante del concreto, que afecta la resistencia a la compresión y la durabilidad, la presencia de estas dos propiedades es fundamental en la vida útil de la estructura a realizar ya que de ellas depende la capacidad de mantener las condiciones y/o especificaciones para las cuales fue diseñada. De acuerdo a lo anterior, se realizó este trabajo de investigación en el cual se revisó la norma ASTM C457 para la determinación por microscopía de la porosidad de muestras de concreto endurecido y además se implementó la metodología para analizar la porosidad en muestras de concreto sin refuerzo con secciones pulidas mediante el análisis petrográfico a través del videomicroscopio HIROX HK7700 y el estereoscopio OLYMPUS 110AL WD38, variando la relación agua/cemento y los días de curado. Se diseñaron 3 mezclas de concreto (0.5, 0.6 y 0.7) utilizando el método American Concrete Institute (ACI-211) y fabricando en total 105 cilindros de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de longitud, que fueron curadas bajo techo en condiciones de laboratorio, a los cuales se les realizó ensayos de velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, y petrografía en los días 7, 14, 28, 45 y 60 del tiempo de curado. Los resultados obtenidos indicaron que la relación a/c fue el factor principal en la variación de los valores de porosidad, resistencia a la compresión y medidas de velocidad de pulso ultrasónico, comprobando así la influencia que ejerce el agua sobre el concreto; resultados demostrados a partir del análisis petrográfico.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Director. MsC. Julián Orlando Herrera Ortiz. Codirectora MsC. Luz Amparo Quintero Ortiz.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE POROSITY OF UNREINFORCED CONCRETE SAMPLES THROUGH PETROGRAPHIC ANALYSIS AND VELOCITY MEASUREMENTS OF ULTRASONIC PULSES (VPU).*

AUTORS: GARAVITO HERNÁNDEZ ANDREA LISSETTE.
GONZÁLEZ ASCANIO JENNY CAROLINA**

KEYWORDS: Concrete, Compressive Strength, Petrographic Analysis, Porosity, Polished Section, Ultrasonic Pulse Velocity.

ABSTRACT

The porosity is an important feature of the concrete, which affects the compressive strength and the durability, the presence of these two properties is essential in the life of the structure to perform because of these properties depends on the ability to maintain conditions and/or specifications for which it was designed. According to the above in this research work, the standard ASTM C457 was revised for determining the porosity of hardened concrete samples. Also in this research was implemented a methodology to find the porosity of unreinforced concrete samples with polished sections through petrographic analysis, using the videomicroscope HIROX HK7700 and the stereoscope OLYMPUS 110AL WD38, varying the water/cement ratio and days of curing. Three mixtures were designed (0.5, 0.6 and 0.7) using the method American Concrete Institute (ACI-211), making a total of 105 cylinders of 7.5 cm diameter by 15 cm in length, the cylinders were cured indoors in laboratory conditions, this specimens were subjected to tests of resistance to compression, velocity measurements of ultrasonic pulses and Petrography on 7, 14, 28, 45 and 60 days of the curing time.

The results obtained indicated that the ratio a/c was the main factor in the variation of the porosity, compressive strength and measurements of ultrasonic pulses, proving this way the influence of water on concrete; proven results through the petrographic analysis.

*Project of degree.

** Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director. MsC. Julián Orlando Herrera Ortiz. Codirectora MsC. Luz Amparo Quintero Ortiz.

INTRODUCCIÓN

El concreto ha sido un material muy importante durante la historia del hombre, ya que se ha convertido en una necesidad para la construcción de estructuras que brindan a la sociedad lugares óptimos para la supervivencia. No obstante, es importante analizar y evaluar la estructura interna del concreto porque permite obtener una información detallada de los componentes y propiedades que éste presenta para su posterior desempeño [1].

La petrografía del concreto contribuye a generar un estudio detallado de la micro estructura obteniendo resultados ante propiedades y requerimientos como: durabilidad y resistencia a la compresión; permitiendo al mismo tiempo la observación de defectos que pueden estar presentes y que quizás contribuyen al deterioro del material. Los estudios petrográficos del concreto endurecido generalmente han sido efectuados mediante láminas delgadas, pero éstas requieren de gran cuidado y sobre todo necesitan de buena práctica al momento de la preparación. En este proyecto de investigación, se plantea una metodología que permite evaluar la porosidad de muestras de concreto sin refuerzo a través de secciones pulidas, técnica que presenta un concepto general de la estructura pero con poca información encontrada en la literatura para establecer un procedimiento de preparación. Además, se analiza el comportamiento de la porosidad durante los días de curado y la influencia que ejerce la relación agua/cemento hacia las técnicas destructivas y no destructivas, siendo éste el factor responsable de las variaciones en los valores obtenidos de los ensayos realizados.

Por otro lado, las medidas de Velocidad de Pulso ultrasónico y Resistencia a la Compresión son técnicas que contribuyen a la evaluación del concreto endurecido buscando la calidad y el adecuado desempeño a través del monitoreo de

propiedades y garantizando un análisis desde el punto de vista tanto no destructivo como destructivo.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es un material tan versátil en la actualidad, que posee diversas aplicaciones estructurales en la vida del hombre, por lo tanto debe cumplir una serie de especificaciones relativas a prestaciones mecánicas, durabilidad, estabilidad química, reactividad alcalina, degradación, forma, textura superficial, y la presencia de sustancias nocivas. Debido a las situaciones expuestas anteriormente, se hace necesario desarrollar una metodología para analizar la porosidad, la cual es la responsable principalmente de garantizar un adecuado desempeño del concreto.

El análisis petrográfico del concreto, es una técnica que a pesar de ser de naturaleza cualitativa, representa una herramienta fundamental para determinar la calidad, estado y caracterización del mismo, en cualquier prueba de control ante la afectación de diferentes ambientes al cual es expuesto [2]. Actualmente, las investigaciones de la porosidad han sido de gran interés a nivel mundial, por ende se ha recurrido al estudio petrográfico el cual permite identificar y establecer el estado interno del concreto utilizado para una edificación; y así propender por certificar su seguridad.

En Colombia, el uso del concreto es generalizado, sin embargo, los estudios de la porosidad a nivel microestructural son muy pocos a pesar de que la calidad de éste no es muy aceptable, ya que se han presentado daños desde menor hasta algunos de gran envergadura [3]. Si el análisis petrográfico fuese empleado como norma obligatoria en el recibo de las obras de concreto, se evitaría numerosas reparaciones de estructuras nuevas construidas en el país, lo cual sería

beneficioso, ya que garantizaría la seguridad para las personas y representaría un ahorro en dinero, que se emplearía para la ejecución de nuevas obras en beneficio de la sociedad colombiana.

De acuerdo a lo anterior, el concreto es un material que puede ser evaluado mediante técnicas no destructivas y destructivas, que en ésta investigación está representada por las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y análisis petrográfico en secciones pulidas, siendo estos ensayos un complemento a la resistencia a la compresión la cual es el factor determinante en el diseño de mezcla.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la porosidad de muestras de concreto sin refuerzo mediante análisis petrográfico y medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar la aplicación del método descrito en la norma ASTM C457 para la determinación por microscopía de la porosidad en muestras de concreto.
- Determinar mediante análisis petrográfico la porosidad en muestras de concreto sin refuerzo, con diferente relación agua/cemento.
- Establecer la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión y los resultados obtenidos en el análisis petrográfico de las muestras de concreto analizadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

Uno de los materiales más importantes para la vida cotidiana del hombre es el concreto; el cual es el elemento más utilizado en la construcción de estructuras a nivel mundial; por ésta razón, a través del tiempo se ha visto la necesidad de realizar estudios para el mejoramiento de sus propiedades y así contribuir al desarrollo social y estructural de cada país.

El concreto es un material compuesto por una fase constituida por productos sólidos de hidratación del cemento y otra fase de partículas pétreas, si el concreto tiene que cumplir con un propósito particular es necesario seleccionar los materiales que lo conforman, combinarlos y usarlos de tal manera para desarrollar las cualidades especiales requeridas y tan económicamente viables como sea posible. Es así como el concreto es elaborado mediante un diseño de mezcla que se fundamenta en la selectividad de materiales constituyentes disponibles tales como: agua, agregado, cemento y aditivos en cantidades particulares respectivamente dosificados para generar una masa de característica volumétrica [4] y manejable con el fin de obtener un endurecimiento a velocidad adecuada, para conseguir las propiedades más importantes como la resistencia, durabilidad y estabilidad química.

Dentro de las características del concreto se encuentra la porosidad que depende principalmente de la relación agua/cemento, y es también considerada como uno de los principales factores que influyen en la resistencia y durabilidad del concreto [5]. Generalmente un sólo poro no afecta la microestructura, sin embargo, la porosidad del concreto se ha visto representada como un conjunto existente de

poros de diferentes tamaños en todos sus componentes, tanto en la pasta de cemento como en los agregados, proporcionando cambios en una de las propiedades más importantes como lo es la resistencia a la compresión.

2.2 POROSIDAD EN EL CONCRETO

La porosidad del concreto es definida como la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos dentro de la masa del material como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia de aire naturalmente atrapado [6]. El libro *Concrete: Structures, properties and materials* define la porosidad como “estar llena de poros, o pequeños agujeros, a través de los cuales pueden pasar los fluidos, la luz, y/o el aire” [7]. Cuando el concreto es elaborado y posteriormente empieza la etapa de fraguado, los constituyentes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras que el componente más liviano: el agua, flota en la superficie donde consecuentemente se evapora. El agua al estar ocupando un espacio, y teniendo en cuenta el aire atrapado, deja millones de huecos entrecruzados en todas las direcciones [8]; éstos espacios se unen entre si creando la porosidad y debilitando el concreto al generar unas pequeñas fisuras internas.

La estructura de la porosidad en el concreto influye fuertemente en el actuar del mismo, ya que determina las proporciones a las cuales las especies agresivas pueden entrar en el concreto y causar daños posteriores. La permisividad de intrusión de agentes al cuerpo del concreto depende, de la manera más general, de la permeabilidad[9], la cual va ligada a la distribución de la porosidad que a su vez es relacionada con las reacciones generadas del cemento, mezclas de minerales, partículas de agregados y condiciones de curado.

No obstante, la porosidad tiene una relación inversamente proporcional con dos propiedades muy importantes del concreto: la resistencia a la compresión y la durabilidad [10]. La presencia de estas dos propiedades es fundamental en la vida útil de la estructura a realizar ya que de ellas depende la capacidad de mantener las condiciones para las cuales fue diseñada.

2.2.1 Porosidad de los Agregados y de la Pasta de Cemento

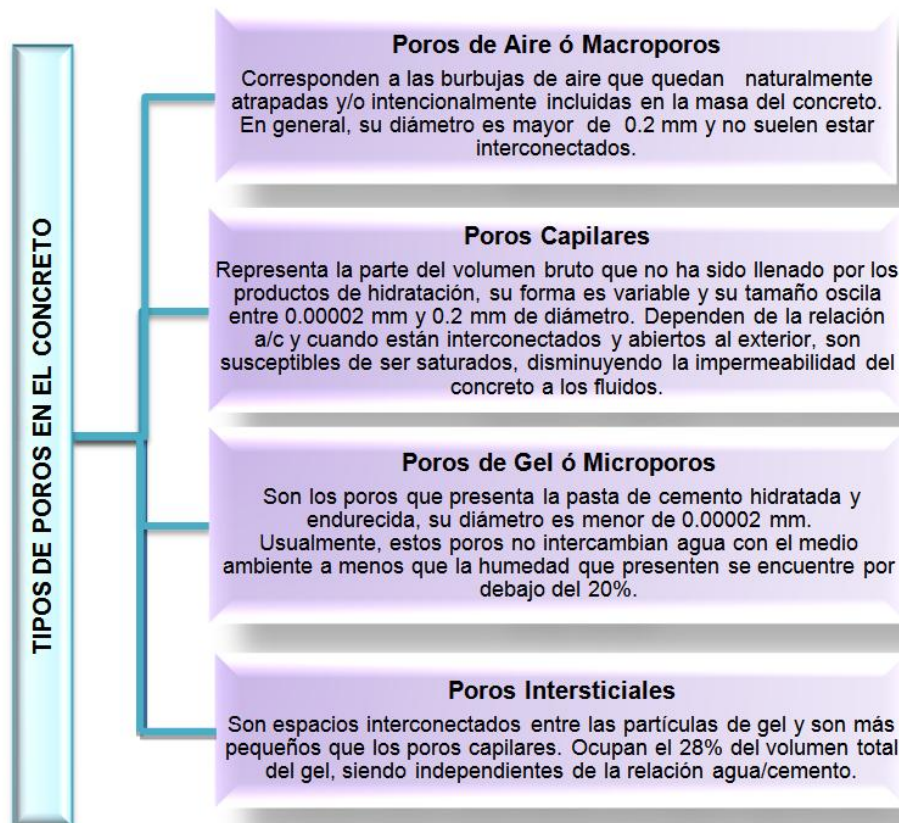
Los tamaños de los poros en el agregado varían en un amplio rango, pero hasta los más pequeños son mayores que los poros de gel en la pasta de cemento. Algunos poros del agregado están absolutamente inmersos dentro de la partícula, pero otros se abren a la superficie, de forma que el agua, y otros agentes agresores, pueden penetrar en ellos. El grado de porosidad de las rocas comunes varía de 0 a 50% según Neville [11] debido a que el agregado representa aproximadamente las tres cuartas partes del volumen del concreto, por esto es importante resaltar que la calidad de la roca utilizada como agregado es un factor que podría contribuir a la porosidad total del concreto. Sin embargo, la porosidad capilar es la que generalmente influye en la durabilidad del concreto junto con la porosidad de la pasta de cemento que está representada por la suma del volumen de los poros capilares y poros gel en aquellos espacios no llenados por los constituyentes sólidos de la pasta de cemento hidratado[12]. La porosidad en la pasta depende principalmente de la relación agua/cemento y del grado de hidratación que alcanza el cemento; generalmente para una relación agua/cemento de 0.6 el volumen total de poros se encuentra en un rango entre el 46% y 60%, con niveles de hidratación del cemento comprendidos entre el 100% y 27% respectivamente [13]. Es así como la porosidad de la pasta de cemento suele ser mayor a la porosidad del agregado que conforma el concreto. Con base en lo anteriormente mencionado, se deduce que el concreto endurecido no es de por sí impermeable al agua, debiéndose esto a la porosidad que posee la cual permite la filtración del agua cuando entran en contacto.

Es necesario resaltar que la permeabilidad del concreto no es una simple función de la cantidad de poros, sino que depende del tamaño, continuidad de ellos y de su distribución; además el agua fluiría más fácilmente a través de los poros capilares, que a través de los poros gel, debido al tamaño de éste; por consiguiente se puede estimar que la permeabilidad de la pasta y consecuentemente del concreto es controlada por la porosidad capilar [14].

2.2.2 Tipos de Poros existentes en el concreto

Es importante identificar la clase de poros que comprende un concreto a analizar para el estudio de sus propiedades. Teniendo en cuenta lo anterior, en la figura 1 se observa la clasificación de los poros de acuerdo a su tamaño.

Figura 1. Clasificación de los poros de acuerdo al tamaño

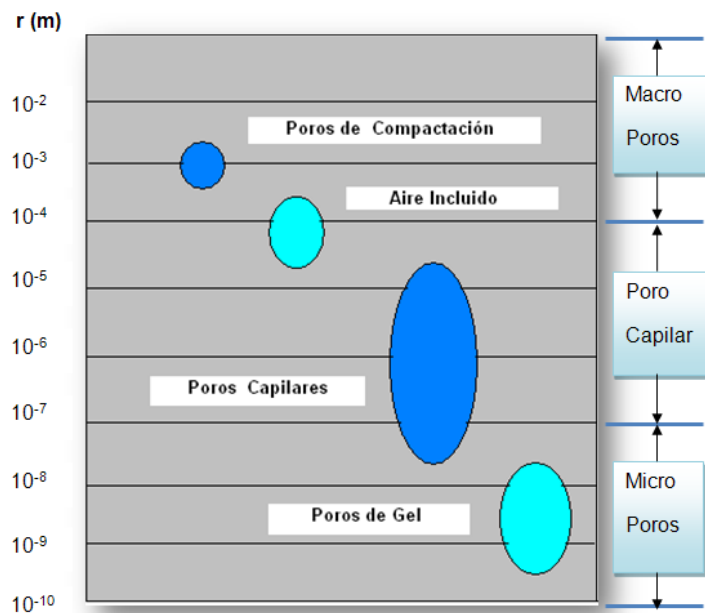


Fuente. Durabilidad y Patología del concreto. Sánchez de Guzmán, Diego [15]

La selección de estos valores es basado en la suposición que los productos de hidratación no pueden precipitar en poros que tienen los diámetros más pequeños que un microporo, porque la porosidad de gel reside en la hidratación de productos que se acumulan entre la fase líquida y los granos anhídridos del cemento. La porosidad del gel posee un efecto mayor en la hidratación pero sólo un efecto menor en procesos de transporte que involucran los líquidos [16].

A pesar de esto, no existe hoy en día ninguna justificación por desconocer los otros tipos de poros listados anteriormente. En la figura 2 se presenta la ubicación respectiva de la estructura porosa del concreto.

Figura 2. Conformación de la estructura porosa del concreto

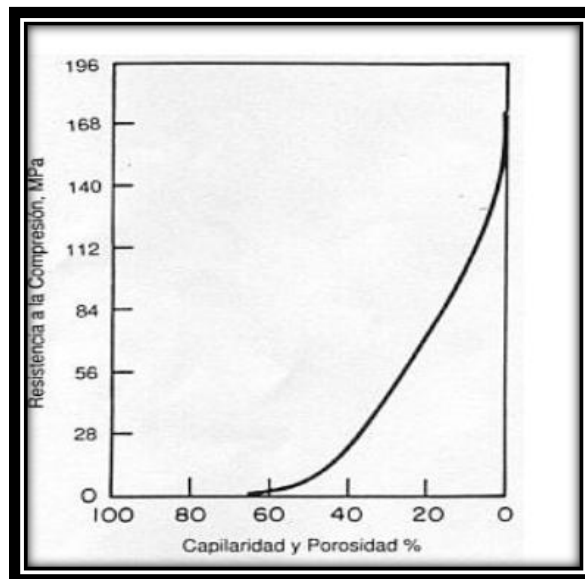


Fuente. Durabilidad y Patología del concreto. Sánchez de Guzmán, Diego [17]

2.3 RELACIÓN ENTRE LA POROSIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Desde el punto de vista de la resistencia, la porosidad y la relación agua/cemento son los factores más delicados para las propiedades mecánicas del concreto porque permite el ingreso de agentes agresivos dentro de la matriz; además el principal inconveniente es la presencia de burbujas de aire en la mezcla, que al incrementar la porosidad tienden a disminuir la resistencia a la compresión en un 5% por cada 1% de aire incorporado [18], y disminuyendo el tiempo de vida útil estipulado. A continuación en la figura 3 se observa la relación existente entre la resistencia a la compresión y la porosidad.

Figura 3. Relación existente entre la Resistencia a la Compresión y la Porosidad



Fuente. Concrete Microstructure, Properties and Materials [19]

2.4 ANÁLISIS PETROGRÁFICO DEL CONCRETO

La técnica de petrografía de concretos ha venido evolucionando desde el siglo XIX para estudiar la estructura interna y caracterización de propiedades de éste material compuesto para obtener mejores resultados en la fabricación del mismo; el pionero de la microscopía del concreto fue Johnson en 1915, posteriormente se sumaron investigadores como L.S Brown, B. Mather y R. C. Mielenz [20] para aportar condiciones de mejoramiento en la técnica de caracterización.

En Colombia la incursión en esta temática se realizó a partir de la investigación del Ing. Juan Cañavera Saavedra [21], sobre la evaluación de las fuentes de agregados para la fabricación de concretos realizada en el año de 1988 y se ha continuado por algunos estudios reportados por el Geólogo John Jairo Giraldo con investigaciones muy recientes del año 2003[22]; en definitiva, poco se ha avanzado en este campo en nuestro país ya que no hay suficiente información sobre las metodologías de análisis petrográficos los cuales generan una apertura a nuevas posibilidades en la investigación de la tecnología del concreto.

La calidad del concreto constituye un factor fundamental para la determinación de la vida útil de este material; por ende es necesario controlar sus características estructurales a nivel microscópico para obtener un análisis con base a los resultados y establecer conclusiones sobre las propiedades obtenidas.

De acuerdo a lo anterior, los agregados son controlados basándose en una serie de pruebas estándar; sin embargo, el rendimiento de los agregados "mecánico, durabilidad, estabilidad química, álcali reactividad, y la sustancia nociva" contenidos posee una correlación con la composición, características texturales y estructurales.

La petrografía es aplicable a los agregados del concreto, al mortero, al yeso, al estuco, al ladrillo, al grout y mezclas similares del cemento Portland, de tal manera que este método de evaluación analítica combina la inspección visual con el examen microscópico usando el estereoscopio (Figura 4a) el cual permite la observación superficial con aumentos que van desde 5x hasta más de 60x, proporcionando una ilusión de profundidad; y el microscopio petrográfico (Figura 4b) ó también llamado de polarización que cuenta con un carro direccionado para establecer paradas durante el conteo de poros y un soporte giratorio que permite polarizar la luz que pasa a través de la muestra[23]. La interpretación de lo encontrado en el ensayo proporciona ayuda valiosa en el desarrollo de soluciones prácticas a los problemas que se presentan en las construcciones.

Figura 4. Microscopios recomendados para el análisis Petrográfico



a) Estereoscopio



b) Microscopio Petrográfico

Fuente. PCE Instant. Microscopios, Disponible en <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores/microscopios>[24]

Ahora bien, el análisis petrográfico de la porosidad del concreto se complementa a menudo con análisis químico, análisis de difracción de rayos X y medidas de velocidad de pulso ultrasónico, éste último siendo útil para el seguimiento de los cambios estructurales internos que puede experimentar el concreto durante un

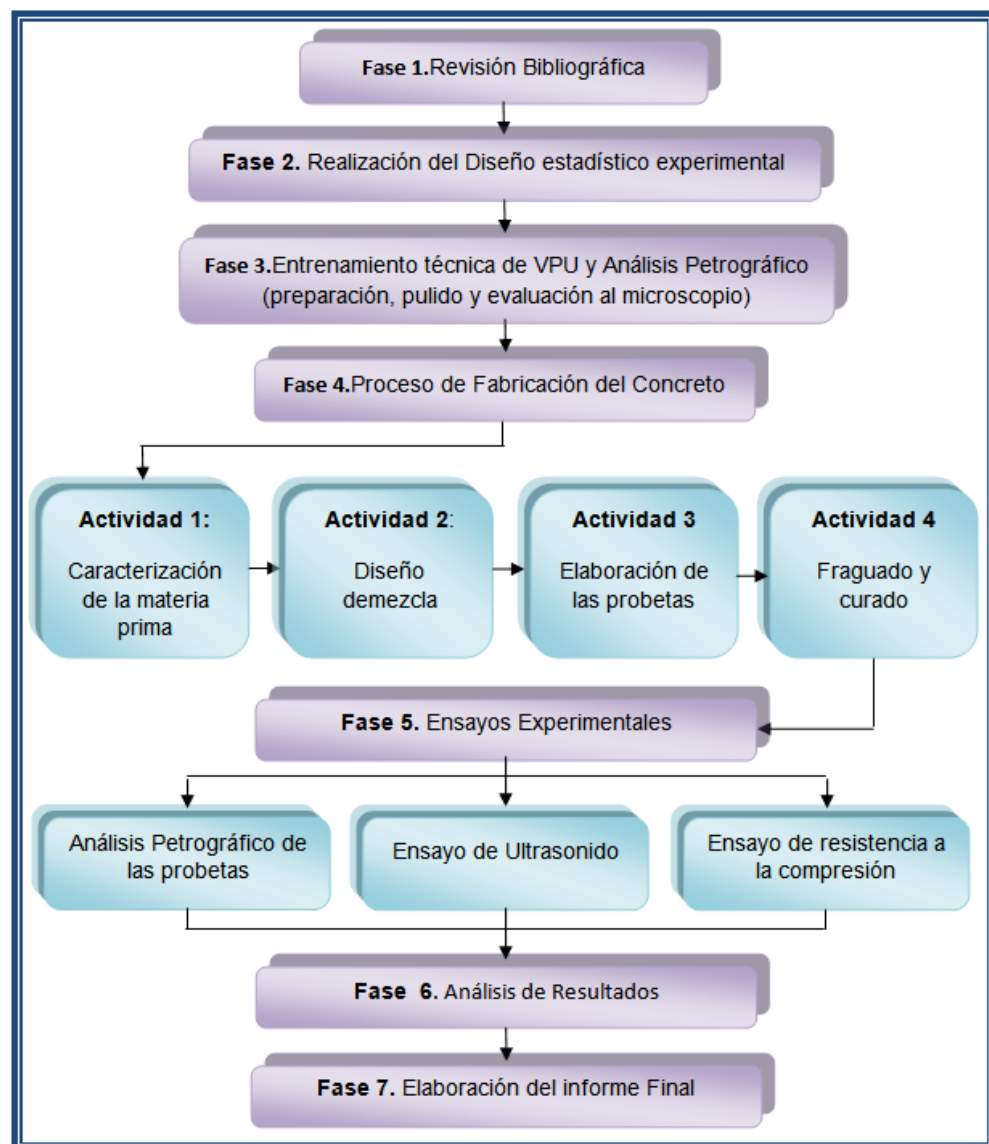
periodo de tiempo. Por lo tanto, las pruebas físicas desarrollan datos sobre la resistencia a la compresión, cambios de volumen, contenido del aire del concreto endurecido, durabilidad y permeabilidad. La información que se determina en el estudio petrográfico del concreto se hace usando las pautas dadas en las normas ASTM C457 [25] (Norma para el examen por microscopio petrográfico del concreto endurecido) y ASTM C856 [26](Norma para la preparación petrográfica del concreto endurecido).

A pesar de la relevancia que tiene un examen petrográfico al concreto, en Colombia no hay a la fecha una exposición unificada de los procedimientos especiales petrográficos y las interpretaciones que tienen que hacerse en la investigación del concreto en lugar de roca natural. Es así como la microscopia óptica del concreto ha generado una importancia muy particular para la determinación de la relación agua-cemento que es un factor primordial en la conformación del concreto [27], además genera una actividad necesaria en el estudio de éste material ya que la relación entre el cemento y el agua es un asunto de relevancia crucial.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo con las etapas que se llevaron a cabo para la realización de la presente investigación.

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



Fuente. Los autores

3.1 FASE 1. REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA LITERATURA RECOPIADA:

Se realizó la lectura y análisis de la documentación encontrada sobre el concreto incluyendo sus generalidades, componentes y características, generalidades del examen petrográfico (condiciones, métodos y tipos), además, de información respectiva al ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y del ensayo destructivo de resistencia a la compresión. En ésta etapa se realizó la recopilación de artículos internacionales, libros, tesis y trabajos de grupos de investigación relacionados con el tema. Adicionalmente se consultaron normas ASTM, ICONTEC Y NTC, esto con el fin de afianzar conocimientos y lograr un óptimo desempeño a lo largo del desarrollo de la presente investigación.

Con la información recopilada se establecieron las variables a considerar durante la realización de este trabajo tales como el tamaño de agregados, las relaciones a/c, dimensiones de las probetas y tiempo de exposición de las mismas.

3.2 FASE 2. DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL FACTORIAL MULTINIVEL:

Con base en los factores a estudiar (relación agua/cemento y tiempo) y las variables de respuesta (Velocidad de pulso ultrasónico VPU, resistencia a la compresión y porosidad) se realizó un diseño estadístico experimental factorial multivariable. En esta etapa se usó el software statgraphics centurión XV [28].

3.3 FASE 3. ENTRENAMIENTO:

Se realizaron entrenamientos en el manejo adecuado de los equipos utilizados para los respectivos ensayos. Para la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico se empleó el equipo de baja frecuencia **CNS FARNELL PUNDIT plus**, modelo PC 1006. Otro entrenamiento se realizó para la manipulación de la máquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER. Finalmente se realizaron pruebas preliminares para la preparación, pulido, análisis y establecimiento de las condiciones adecuadas de las probetas de concreto sin refuerzo para su posterior examen petrográfico, el cual fue realizado con el video microscopio marca HK7700 HIROX y el Estereomicroscopio marca OLYMPUS 110AL WD38.

3.4 FASE 4. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO:

En esta fase se llevó a cabo el diseño y elaboración de las probetas utilizadas en cada uno de los ensayos realizados destructivos y no destructivos, teniendo en cuenta la caracterización de la materia prima y el diseño de mezcla.

Todas las actividades realizadas durante este proceso se llevaron a cabo en el Centro de Caracterización de materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, ubicado en el Edificio Álvaro Beltrán Pinzón, de la Universidad Industrial de Santander.

3.4.1 Actividad 1. Caracterización de la materia prima:

Los materiales utilizados para la fabricación de la mezcla fueron: Cemento Portland Tipo I, agua potable (Suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga) y agregados fino y grueso (Procedentes del municipio de pescadero, Santander). Las características de éstos estuvieron de acuerdo a las

normas NTC las cuales se especifican a continuación al igual que los procedimientos empleados para su evaluación.

- **Cemento Portland Tipo I:**

El cemento utilizado fue cemento Argos, suministrado por el grupo de investigación GIMAT. Este material cumple con las especificaciones mecánicas, físicas y químicas indicadas por las Normas NTC 121 [29] y NTC 321 [30].

- **Agregados:**

Los agregados utilizados en esta investigación fueron grava como agregado grueso y arena como agregado fino.

Para el análisis de las propiedades de los agregados se realizó la caracterización mediante pruebas granulométricas a fin de determinar el módulo de finura, gravedad específica, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos para cada tipo de agregado, basándose en las normas NTC 92 [31], NTC 176 [32] y NTC 237 [33].

Para la granulometría de los agregados se utilizaron las normas NTC 77 [34] y NTC 78 [35]. Para el agregado fino se utilizó una serie de tamices 4, 8, 16, 30, 50 y 100, pesando el material retenido en cada tamiz para obtener el análisis granulométrico. Para el agregado grueso se determinó un tamaño máximo de agregado de 1/2" debido a la longitud de la probeta y a la longitud de onda del ultrasonido, para la frecuencia de 54 KHz empleada.

3.4.2 Actividad 2. Diseño de la mezcla:

Una vez caracterizado el material se realizó el diseño de mezcla empleando el método American Concrete Institute (ACI). Las relaciones agua-cemento (a/c) establecidas para este trabajo fueron 0.5, 0.6 y 0.7, con un tamaño máximo de

agregado grueso de $\frac{1}{2}$ ". El respectivo diseño de mezcla para cada una de las relaciones se presenta en el anexo A.

3.4.3 Actividad 3. Elaboración de las probetas:

Se fabricaron en total 105 probetas para las tres relaciones (a/c), con las siguientes dimensiones: 75 mm de diámetro por 150 mm de altura, cada una con granulometría de agregados constante ($\frac{1}{2}$ ").

En el proceso de fabricación inicialmente se limpiaron y armaron los moldes con sus respectivas bases de acero; los moldes son tubos PVC de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de longitud aproximadamente, para el ajuste del molde con la base se utilizaron abrazaderas metálicas. Una etapa de gran importancia es la impregnación con ACPM de los moldes, a fin de evitar que la mezcla se adhiriera al molde y facilitar el desencofrado.

Posteriormente se elaboró la pasta de concreto pesando cada uno de los materiales utilizados en una balanza analítica según las dosificaciones obtenidas en el diseño de mezcla. La mezcla de los materiales se llevó a cabo de la siguiente forma: primero, el agregado fino se mezcla con el cemento, luego, se le añade el agregado grueso y por último el agua de la mezcla (el mezclado tienen gran importancia en la homogeneidad y consistencia de las probetas). La mezcla finalmente homogeneizada fue colocada en los moldes cilíndricos, los cuales fueron compactados de forma manual cada $\frac{1}{3}$ del volumen, aplicando 25 golpes distribuidos uniformemente en el área transversal de la probeta; el apisonado se realizó con una varilla metálica de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud, según lo especificado en la norma NTC 1377 [36]. Adicionalmente, se realizaron golpes en el exterior del molde en cada capa, con el fin de eliminar las burbujas de aire atrapadas y ayudar en la homogenización de la mezcla.

3.4.4 Actividad 4. Fraguado y curado:

El fraguado y curado se realizaron a temperatura ambiente (25°C) en condiciones bajo techo. Dichos procesos tuvieron una duración de 24 horas aproximadamente para el fraguado en los moldes antes del desencofrado y de 7, 14, 28, 45 y 60 días para el curado, según los tiempos determinados para este proyecto.

En la figura 6 se presentan los pasos realizados para el proceso de elaboración de las probetas. Este proceso se llevó a cabo en los laboratorios del Centro de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil.

Figura 6. Proceso de elaboración de las probetas



Fuente. Los autores

3.5 FASE 5. ENSAYOS EXPERIMENTALES:

Los ensayos de VPU, resistencia a la compresión y análisis petrográfico, se realizaron en los días 7, 14, 28, 45 y 60 a siete (7) probetas por día para cada relación agua/cemento, lo cual da 35 probetas por relación y un total de 105 probetas para las tres relaciones (0.5, 0.6 y 0.7). Por día se les realizó el ensayo de VPU a la totalidad de las probetas (7), para el análisis petrográfico se destinaron 3 probetas y 4 para el ensayo de resistencia a la compresión.

3.5.1 Ensayo de ultrasonido:

El equipo utilizado para la toma de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) fue el MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL ultrasonido de baja frecuencia perteneciente al grupo de investigación GIMAT, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Las velocidades fueron tomadas por el método directo, se utilizaron palpadores de 54 KHz. de frecuencia, usando vaselina industrial como acoplante y un voltaje de 500 V. En la figura 7 se observa el equipo de ultrasonido.

Figura 7. Ultrasonido de baja frecuencia, MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL

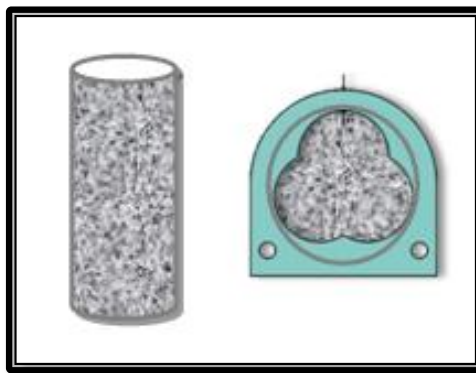


Fuente. <http://www.jroma.pt/images/punditplus.jpg>

Éste ensayo se realizó a la totalidad de las probetas (105), para lo cual fue necesario que las caras opuestas fueran superficies completamente planas; la preparación superficial se hizo puliendo las caras con una piedra esmeril, hasta obtener una superficie totalmente lisa y libre de asperezas con el fin de lograr un acoplamiento adecuado de los palpadores y evitar datos erróneos.

A cada probeta se le tomaron dos lecturas en tres puntos diferentes de la misma cara. Con la ayuda del dispositivo mostrado en la figura 8, se logró mantener los transductores uno frente al otro.

Figura 8. Modelo del dispositivo empleado para la correcta ubicación de los palpadores



Fuente. Los autores

Los datos obtenidos de tiempos de vuelo para cada probeta fueron promediados, adicionalmente se tomaron sus longitudes, para el posterior cálculo de las velocidades de pulso ultrasónico.

3.5.2 Ensayo de resistencia a la compresión:

La prueba de resistencia a la compresión del concreto se realizó a cuatro (4) probetas por día para cada relación a/c. En total fueron 60 probetas evaluadas. El

ensayo se realizó bajo la norma ASTM C39/C39M-04 y NTC 673 (Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto).

Inicialmente se determinaron los diámetros de cada probeta, para la determinación del área bajo la cual fue aplicada la carga, datos importantes para el cálculo de la resistencia a la compresión así como lo son: edad de la probeta y carga aplicada (la carga se aplicó a una velocidad uniforme y continua hasta que se produjo la falla). Con el fin de lograr una distribución uniforme de la carga, a los cilindros se les colocaron tapas de almohadillas de neopreno.

La máquina utilizada para este ensayo fue la máquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil. En la figura 9 se presenta el equipo utilizado.

Figura 9. Máquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER



Fuente. Los autores

3.5.3 Análisis Petrográfico:

La evaluación petrográfica para las muestras de concreto sin refuerzo, previamente preparadas (corte y pulido) se realizó con base en las normas ASTM C856 (Norma para el examen por microscopio petrográfico del concreto endurecido), ASTM C457 (Examen petrográfico de la porosidad del concreto); analizando 3 probetas para cada una de las diferentes relaciones agua/cemento en un estereomicroscopio y/o microscopio óptico. El procedimiento seguido para este análisis se describe en el CAPÍTULO 4 DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, debido a que es la base de la presente investigación.

3.6 FASE 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

En esta etapa, se realizó el análisis e interpretación de los diferentes resultados obtenidos en los ensayos de VPU, resistencia a la compresión y petrografía.

3.7 FASE 7. ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

La fase final se enfocó en la redacción y corrección del informe, además de la preparación del soporte audiovisual para la sustentación de la presente investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

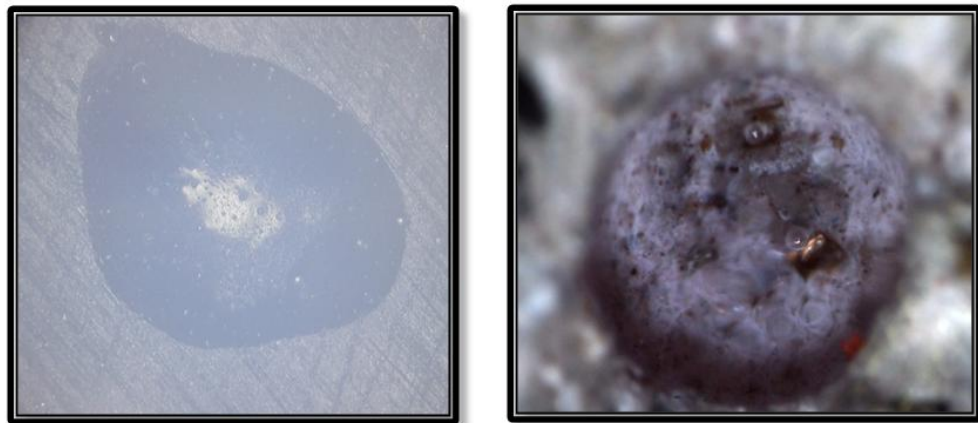
4.1 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Es importante mencionar que los procedimientos detallados en la norma ASTM C457 se aplican a nivel internacional y aunque constituyen la base de la presente investigación fue necesario adaptar algunos de los procedimientos a las condiciones que proporcionaba la Universidad Industrial de Santander, debido a que no se contaba con los equipos mencionados en la norma. Las principales limitaciones en este ensayo fueron las siguientes:

- Para aplicación de la resina epoxi era necesaria una cámara de vacío. El propósito de impregnación en vacío es eliminar el aire fuera de los huecos, poros y grietas de modo que el epoxi puede fluir fácilmente en estos espacios abiertos. Además, la impregnación al vacío elimina las burbujas de aire dentro de la resina epoxi, que suele impedir una buena unión.
- La norma ASTM C457 describe los procedimientos para determinaciones microscópicas de parámetros del sistema de aire-vacío en concreto endurecido. Para determinar la porosidad, la norma presenta dos procedimientos: el método lineal-poligonal y el punto modificado método de recuento, para esto el microscopio a utilizar debe contar con un dispositivo (carro) que porta las muestras y permite movimientos micrométricos horizontales (X y Y) y un soporte de la cámara Multi-ajustable, además de un computador con un software que controla los patrones y las distancias transversales y proporciona determinaciones de recuento de las muestras de prueba.

A pesar de contar con el video microscopio HIROX de alta tecnología que posee características tales como rotación tridimensional y mesa (carro) XY, los resultados obtenidos en las pruebas preliminares no fueron satisfactorios una vez aplicada la resina, aunque el microscopio posee medidas 3D; la falta del software descrito en la norma, necesario para la determinación de la porosidad, impide la determinación de esta propiedad. En la figura 10 se observan los resultados obtenidos con el video microscopio HIROX en donde no se destaca la coloración en los poros en comparación con los resultados obtenidos con el estereomicroscopio marca OLYMPUS.

Figura 10. Resultados obtenidos con el video microscopio HIROX y el estereomicroscopio OLYMPUS, en pruebas preliminares.



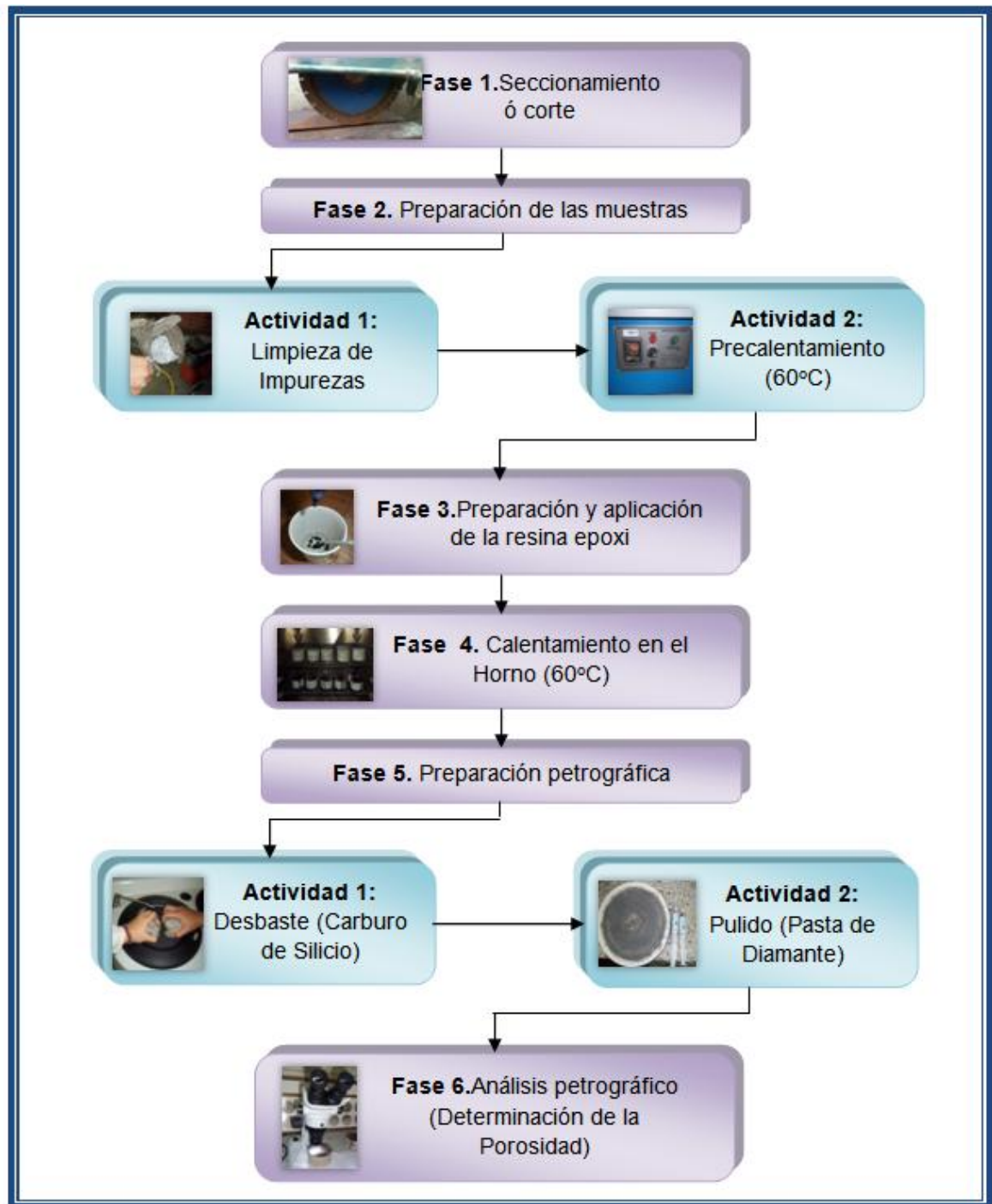
a) Poro visto con el video microscopio HIROX a 140X

b) Poro visto con el estero microscopio OLYMPUS a 80X

Fuente. Los autores

Debido a lo descrito anteriormente se plantea la siguiente metodología para la preparación y análisis petrográfico de muestras de concreto sin refuerzo.

Figura 11. Metodología planteada para la preparación petrográfica de muestras de concreto.

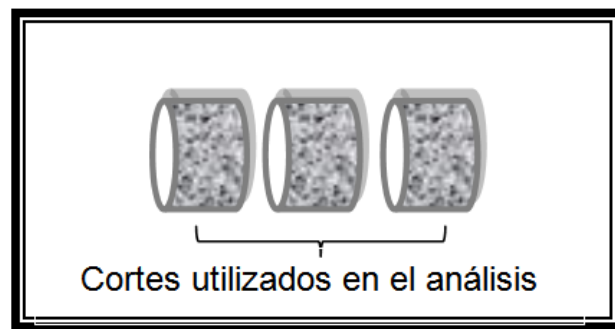


Fuente. Los Autores

4.1.1 FASE 1. Seccionamiento o corte:

La obtención de una sección pulida de concreto requiere de una operación previa de corte para la cual se empleó un disco de punta de diamante; donde fue necesario utilizar un lubricante o líquido refrigerante (agua) para evitar el calentamiento por fricción, el cual produce cambios microestructurales. A cada probeta se le realizaron dos cortes, utilizando para el análisis petrográfico los dos extremos (ver figura 12).

Figura 12. Muestras por probeta después del corte



Fuente. Los autores

4.1.2 FASE 2. Preparación de las muestras:

En esta fase se llevó a cabo la preparación de las probetas para la posterior aplicación de la resina epoxi.

4.1.2.1 Actividad 1. Limpieza de impurezas: A las muestras a utilizar se les realizó una limpieza con aire a presión utilizando un compresor Black & Decker, con el fin de sacar impurezas dejadas por el corte y descubrir aquellas porosidades que estaban totalmente cubiertas.

4.1.2.2 Actividad 2. Pre calentamiento: Las muestras a analizar para cada relación a/c y en los diferentes días de curado se introdujeron en un horno a una

temperatura no superior de 60°C durante 6 horas aproximadamente. La eficacia de la impregnación del epoxi depende del pre-secado de la muestra de modo que toda el agua libre en los poros, grietas y huecos sea retirada dejando espacio para la resina epoxi.

4.1.3 FASE 3: Preparación y aplicación de la resina epoxi:

La preparación del epoxi cuenta con un endurecedor y una resina tipo Epo Thin empleando para la mezcla una cantidad de 11.2 g y 40 g respectivamente. La resina y el endurecedor se mezclaron lentamente en un vaso plástico con la ayuda de un agitador de madera. Adicionalmente se le agregaron 15 gotas de azul de metileno, el cual es utilizado para entintar y resaltar los poros presentes. La mezcla se dejó reposar durante 5 a 10 minutos, para evitar la introducción excesiva de burbujas en la muestra. Posteriormente se impregnó el epoxi a las probetas, lo cual proporciona facilidad de manejo, mantiene la microestructura original, distribución de los componentes y los bordes de la muestra.

4.1.4 FASE 4. Calentamiento en el horno:

Una vez aplicada la resina, las probetas son introducidas nuevamente en el horno a 60°C por 12 horas para acelerar las reacciones poliméricas y acortar el tiempo de curado, es decir, proceso de secado y endurecimiento del epoxi.

4.1.5 FASE 5. Preparación petrográfica:

El fin de esta fase es producir una superficie plana, libre de cavidades y rayas, adquiriendo propiedades reflectantes, obteniendo así muestras aptas para el análisis petrográfico.

4.1.5.1 Actividad 1. Desbaste: Las operaciones previas al pulido, denominadas desbaste, se realizaron con un abrasivo llamado carburo de silicio (lijas de agua) de diferentes tamaños de grano: 240, 320, 400 y 600, los cuales fueron determinados en las pruebas preliminares de acuerdo al rango estipulado en la norma ASTM C457 y a la revisión bibliográfica previa, utilizando como lubricante agua. Después de cada sección la muestra se limpió cuidadosamente y se observó en el microscopio de luz reflejada, para comprobar el estado superficial. Si el desbaste alcanzado es satisfactorio (libre de planos y rayaduras), se procedió a una nueva sección utilizando un abrasivo de grano más fino y rotando la probeta 90° con respecto a la sección anterior.

4.1.5.2 Actividad 2. Pulido: La etapa final de pulido se realizó con paños de forma semiautomática con la ayuda de un disco giratorio horizontal el cual posee diferentes velocidades, utilizando como abrasivo pasta de diamante de distintas granulometrías 3 μ y 1 μ , extendidas sobre el paño. Los tiempos de pulido en ningún caso sobrepasaron los diez minutos, siendo la velocidad del disco de 125 r.p.m. En esta fase es imprescindible la limpieza, ya que cualquier tipo de impureza puede perjudicar el estado de la superficie pulida.

4.1.6 FASE 6. Análisis petrográfico del concreto

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó en el análisis petrográfico el Estereomicroscopio marca OLYMPUS 110AL WD38. Para llevar a cabo el análisis, la sección pulida se subdividió en una cuadrícula (rejilla) de 3*3 mm, tomándose como muestra representativa (número de cuadros) 34 cuadros para el conteo de los poros en cada uno de ellos; esto se obtuvo mediante un análisis estadístico [37] teniendo en cuenta la totalidad de los cuadros contenidos en la rejilla (Ver Anexo B).

Con el fin de realizar una inspección visual preliminar se realizó un análisis adicional en donde se determinaron la profundidad y área de la porosidad, se observaron las muestras en el video microscopio HIROX HK7700 para los diferentes días de curado. Cabe destacar que en el estudio realizado se encontraron poros de diferentes tamaños y formas en la matriz. El promedio de las áreas (A) y las profundidades (H) encontradas para cada relación a/c en los diferentes días de análisis son presentados en la Tabla 1.

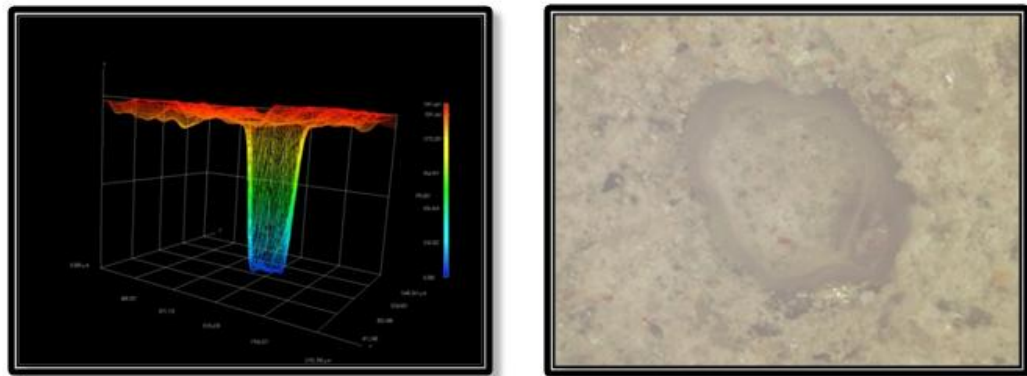
Tabla 1. Resultados obtenidos en la determinación de la profundidad y el área para las diferentes relaciones a/c en los días de análisis.

(A/C)	DÍA 7		DÍA 14		DÍA 28		DÍA 45		DÍA 60	
	Á [mm ²]	H [mm]	Á [mm ²]	H [mm]	Á [mm ²]	H [mm]	Á [mm ²]	H [mm]	Á [mm ²]	H [mm]
0,5	0,79	0,54	0,625	0,248	0,508	1,675	0,432	1,525	0,313	0,857
0,6	0,931	1,561	0,84	1,356	0,799	0,978	0,354	0,945	0,407	0,938
0,7	0,654	2,162	0,52	0,791	0,425	1,137	0,371	0,753	0,188	0,728

Fuente. Los autores

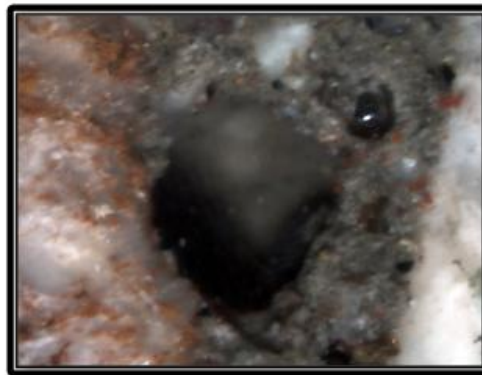
A continuación en las figuras 13 a 17 se presentan los resultados obtenidos en el seguimiento de un poro antes y después de aplicada la resina. Para cada una la figura (a) representa la determinación de la profundidad, la figura (b) muestra la determinación del área de la porosidad; procedimientos realizados después de la limpieza y antes de la aplicación de la resina epoxi haciendo uso del video microscopio HIROX. La figura (c) representa los resultados obtenidos en el análisis petrográfico posterior a la aplicación de la resina; es importante mencionar que la porosidad se observó a diferentes aumentos, sin embargo el mínimo aumento tomado fue 50X de acuerdo a como lo establece la norma y el máximo de 90X.

Figura 13. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 7 de curado.



a) Profundidad del poro

b) Área del poro

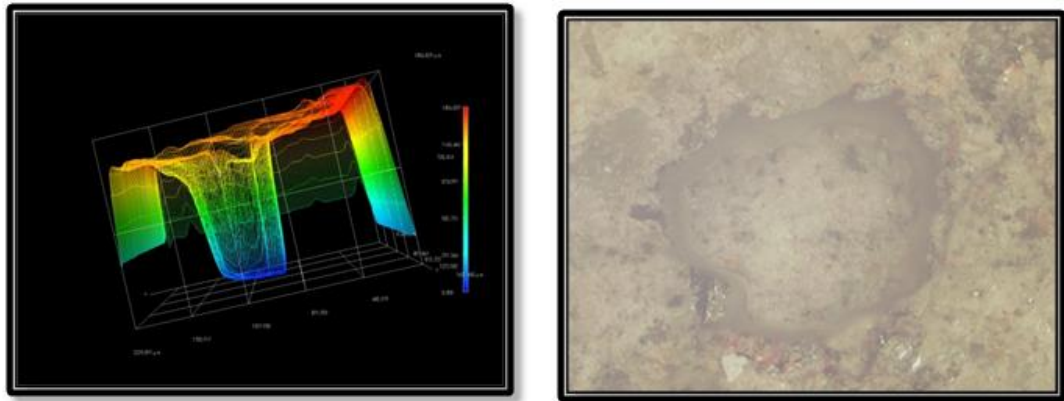


c) Análisis petrográfico (50X)

Fuente. Los autores

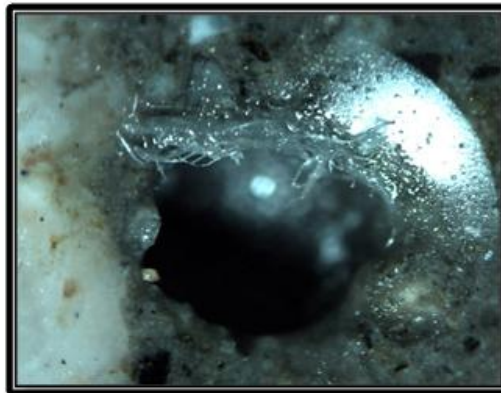
En la figura 13a se observa un poro en 3D, de la relación agua/cemento 0.6 con una profundidad de 1,561 mm y un área de 0,931 mm² (figura 13b); la observación en el estereomicroscopio OLYMPUS (figura 13c) fue realizada a 50X para el análisis petrográfico, evidenciando un poro de forma elíptica con tonalidad gris.

Figura 14. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 14 de curado.



a) Profundidad del poro

b) Área del poro

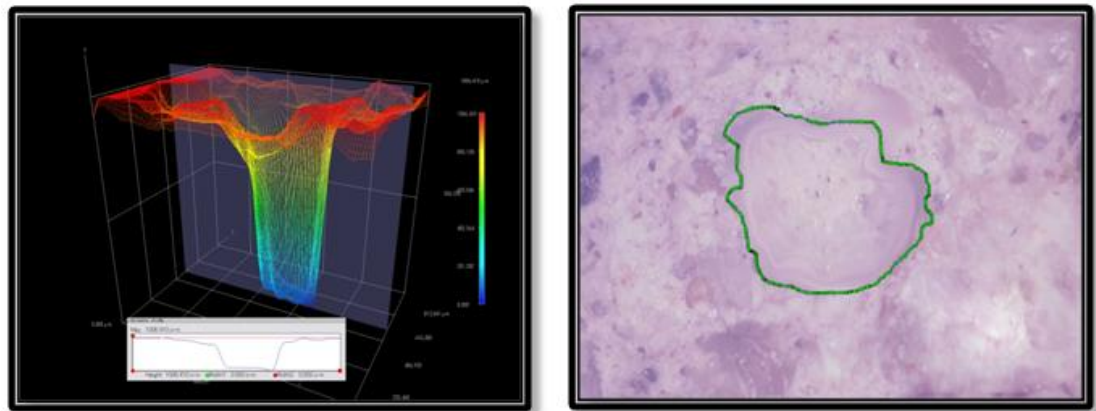


c) Análisis petrográfico (80X)

Fuente. Los autores

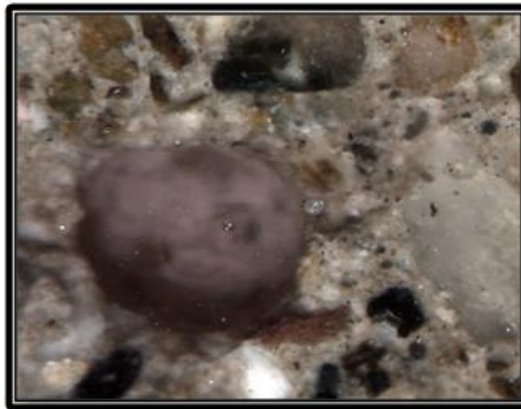
En la figura 14a se observa un poro en 3D, de la relación agua/cemento 0.6 con una profundidad de 1,340 mm y un área de 0,813 mm² (figura 14b); durante la observación en el estereomicroscopio OLYMPUS (figura 14c) a 80X, se determinó que el poro era de forma circular y presentaba una tonalidad más oscura, esto se debe posiblemente a la presencia de aire atrapado en el poro haciendo que la resina no penetrara y quedando este descubierto.

Figura 15. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 28 de curado.



a) Profundidad del poro

b) Área del poro

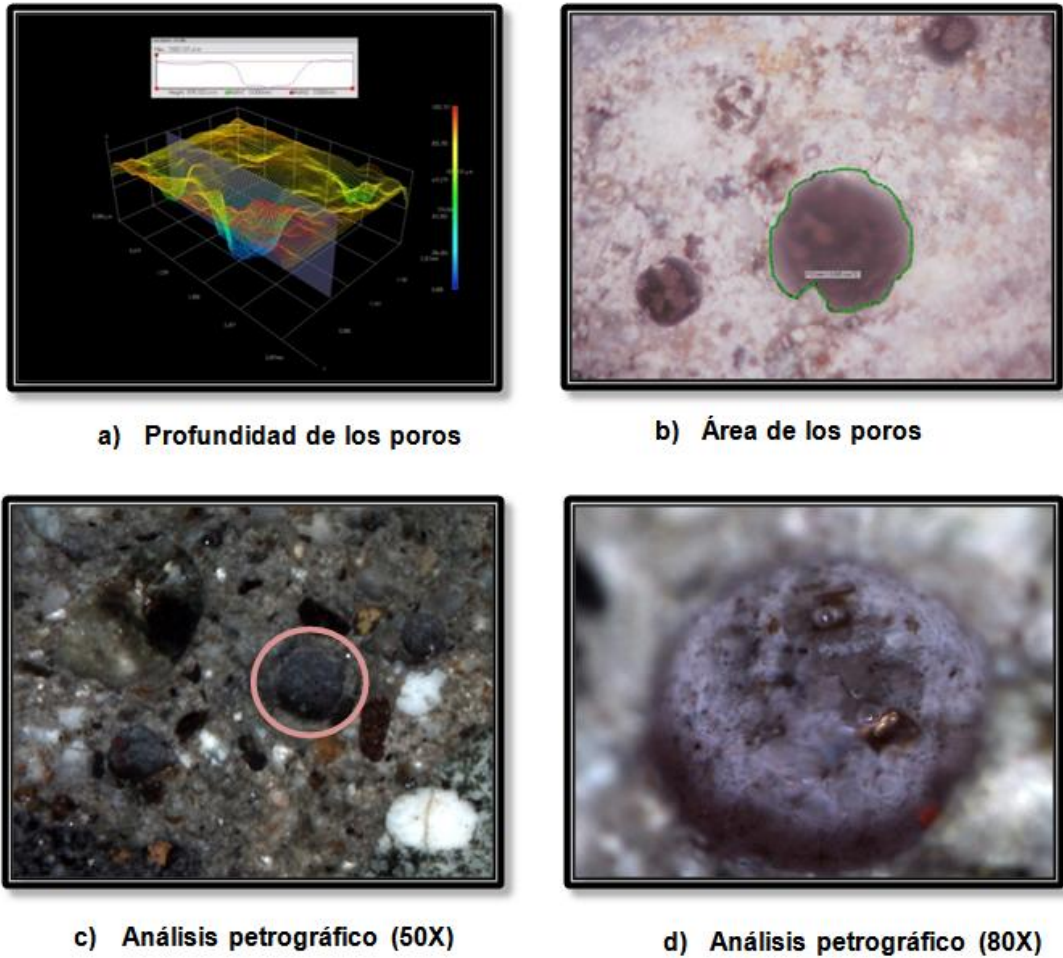


c) Análisis petrográfico (50X)

Fuente. Los autores

En la figura 15a se observa un poro en 3D, de la relación agua/cemento 0.7 con una profundidad de 1,006 mm y un área de 0,97 mm² (figura 15b); la observación en el estereomicroscopio OLYMPUS (figura 15c) para el análisis petrográfico fue realizada a 50X, encontrando un poro con tonalidad gris y con morfología variable, el cual no se pudo estimar una forma cualitativa debido a las irregularidades que presentaba.

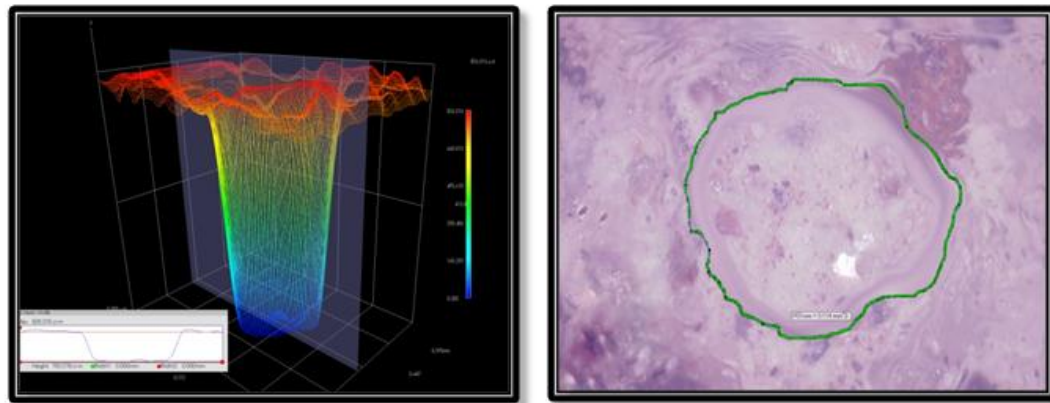
Figura 16. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 45 de curado.



Fuente. Los autores

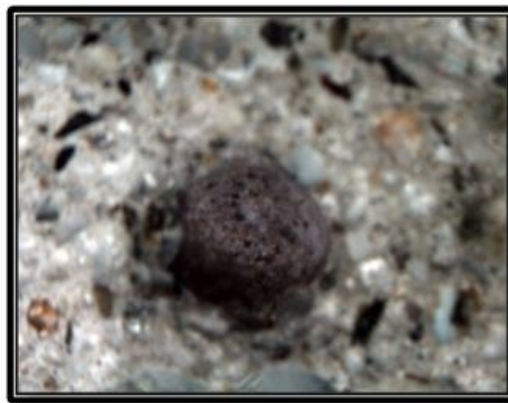
En la figura 16a se observa un poro en 3D, de la relación agua/cemento 0.7 con una profundidad de 1,032 mm y un área de 0,685 mm² (figura 16b); el poro analizado petrográficamente en el estereoscopio OLYMPUS a 50X (figura 16c) es delimitado por una circunferencia para diferenciarlo de los poros adyacentes. Para estimar la morfología del poro con tonalidad azul, este fue observado a 80X (figura 16d) encontrándose que era circular.

Figura 17. Análisis petrográfico de las diferentes relaciones agua/cemento en el día 60 de curado.



a) Profundidad de los poros

b) Área de los poros



c) Análisis petrográfico (50X)

Fuente. Los autores

En la figura 17a se observa un poro en 3D, de la relación agua/cemento 0.5 con una profundidad de 0,826 mm y un área de 0,114 mm² (figura 17b); la observación en el estereomicroscopio OLYMPUS (figura 17c) para el análisis petrográfico fue realizada a 50X estimándose que este poro con tonalidad gris era de forma elíptica.

4.2 COMPARACIÓN ENTRE LA POROSIDAD DEL AGREGADO Y DE LA PASTA DE CEMENTO EN LAS SECCIONES PULIDAS OBSERVADAS EN EL ANÁLISIS PETROGRÁFICO.

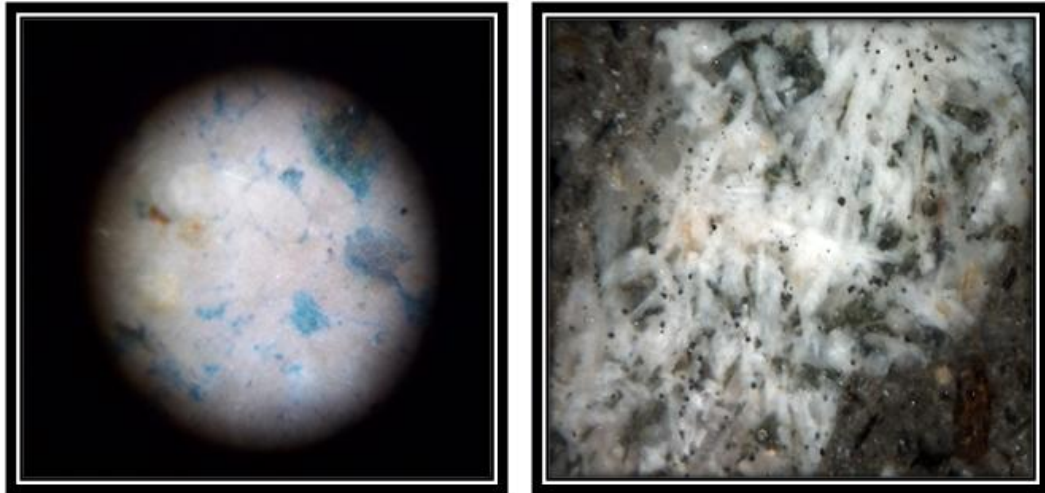
La porosidad observada mediante el estereoscopio en las secciones pulidas de concreto sin refuerzo se identificó de manera disímil para los poros del agregado y los poros de la pasta de cemento.

La porosidad del agregado fue identificada por la coloración azul y la morfología variable, siendo ésta una limitación para realizar la clasificación cualitativa de la forma que presentaban los poros en la superficie de la roca; a diferencia de la porosidad de la pasta de cemento que fue reconocida por una coloración más oscura debido a la mayor profundidad que poseían los poros observados fácilmente en el estereoscopio OLYMPUS. No obstante, se estimó cualitativamente que las formas más comunes que exhibían los poros de la pasta de cemento fueron elípticas y circulares.

A continuación en las Figuras 18 y 19 se presenta esquemáticamente las diferencias encontradas para el reconocimiento de la porosidad del agregado y de la pasta de cemento.

En la Figura 18 (a y b) se presenta la porosidad de dos agregados diferentes observándose el entintado azul que corresponde a la presencia de poros en la superficie de la roca de la sección pulida para una relación agua/cemento de 0.5 en el día 7 de curado.

Figura 18. Porosidad de los agregados del concreto

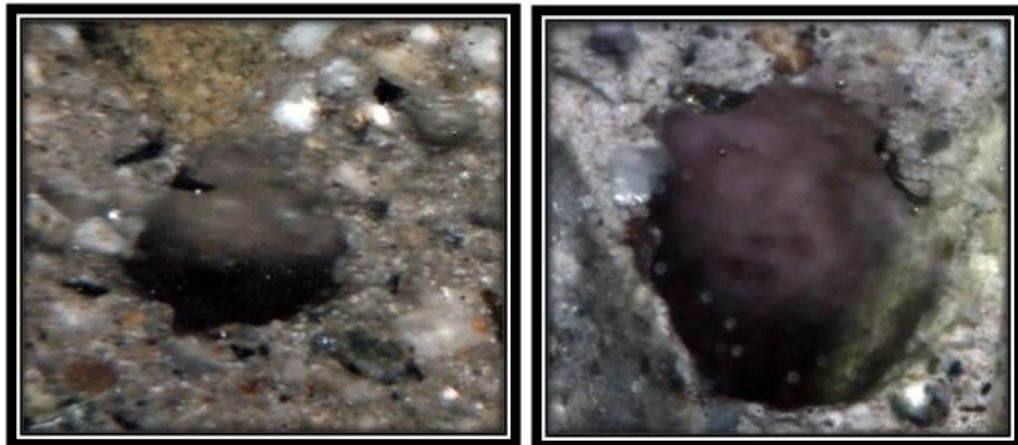


a) Fotografía tomada a 80X

b) Fotografía tomada a 50X

Fuente. Los autores

Figura 19. Porosidad de la Pasta de Cemento



a) Fotografía tomada a 80X

b) Fotografía tomada a 90X

Fuente. Los Autores

La Figura 19 (a y b) representa la porosidad de la pasta de cemento, apreciándose la mayor profundidad y coloración oscura del poro, que hace parte de una muestra analizada en el día 7 de curado y de relación agua/cemento 0.5.

Es importante mencionar que la porosidad tanto del agregado como de la pasta de todas las secciones pulidas de concreto fue identificada de la misma manera para las distintas relaciones agua/cemento y días evaluados.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD:

Los ensayos de porosidad se realizaron a 3 probetas para cada relación a/c, en los diferentes días de curado. En la Tabla 2 se presentan la relación del promedio total de poros encontrados en las secciones pulidas respecto a la muestra representativa (34 cuadros) obtenida de la cuadrícula. (Anexo C).

Tabla 2. Resultados del conteo de poros de las diferentes relaciones a/c en los respectivos días de curado.

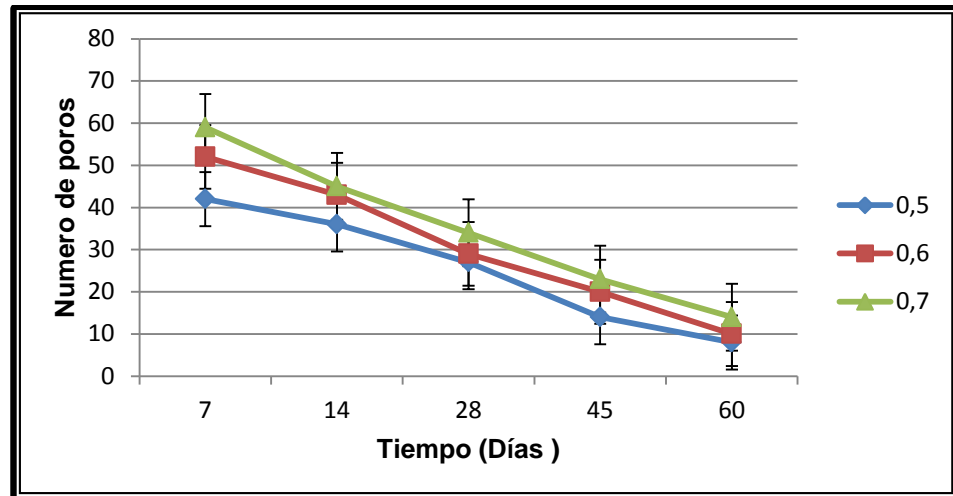
RELACIÓN (a/c)	NUMERO DE POROS POR ACETATO				
	Día 7	Día 14	Día 28	Día 45	Día 60
0,5	42	36	27	14	8
0,6	52	43	29	20	10
0,7	59	45	34	23	14

Fuente. Los autores

De los resultados presentados en la tabla anterior se destaca un comportamiento creciente de la porosidad con respecto a la relación agua/cemento para las tres relaciones analizadas, en la cual se presentó baja porosidad para la relación 0.5 y alta porosidad para la relación 0.7 en todos los días de estudio. Siendo la mezcla con mayor porosidad la de 0.7 con un total de 59 poros correspondiente al día 7 y la de menor porosidad la de 0.5 con un total de 8 poros en el día 60. Esto es debido principalmente a la cantidad de agua presente en cada una de las relaciones, ya que al evaporarse el agua libre de la mezcla quedan espacios vacíos inmersos dentro de la masa del material; adicionalmente, las reacciones de

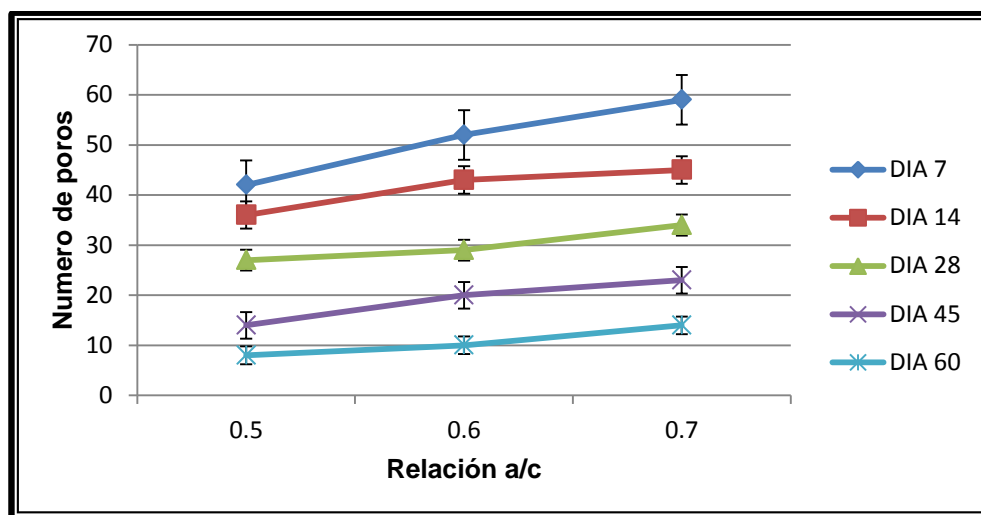
hidratación se fueron completando a medida que pasaba el tiempo de curado y por ende la cantidad de poros disminuye con el tiempo. En las Figuras 20 y 21, se presenta el comportamiento mencionado anteriormente.

Figura 20. Comportamiento de la porosidad en función del tiempo de curado para las diferentes relaciones agua/cemento.



Fuente. Los autores

Figura 21. Comportamiento de la porosidad en función de la relación agua/cemento para los diferentes días de curado.

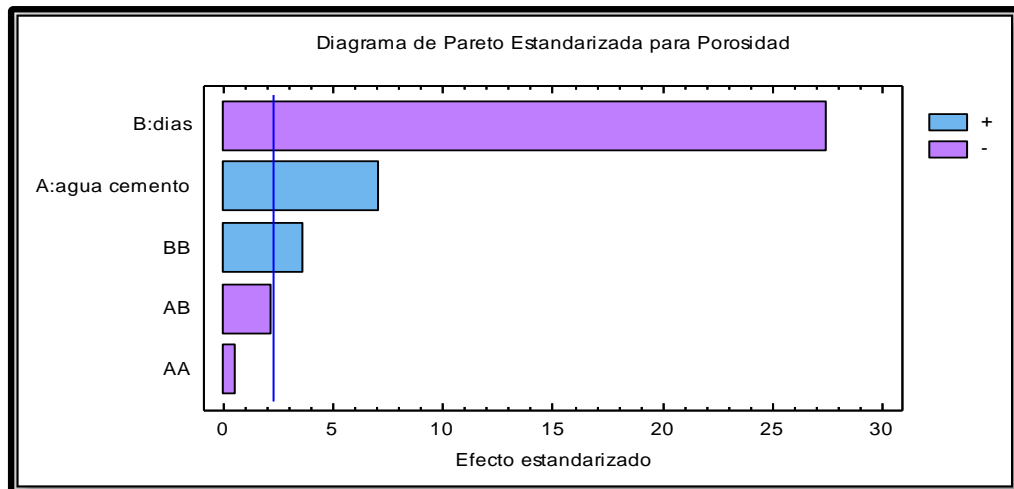


Fuente. Los autores

Con el fin de conocer el efecto real de la relación agua/cemento y el tiempo sobre la porosidad se realizó un análisis con el paquete estadístico STATGRAPHICS obteniendo a partir de él los diagramas de Pareto y gráficas de Efectos Principales, los cuales muestran en las figuras 22 y 23.

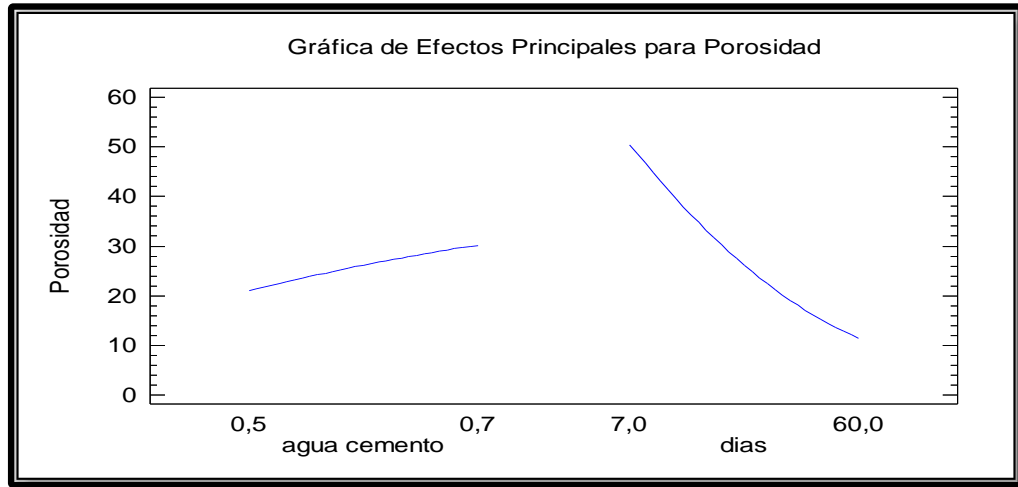
La Figura 22 indica que el mayor efecto (efecto negativo) es el del tiempo sobre la porosidad ya que a medida que transcurre el tiempo de curado disminuye la porosidad de las muestras; por el contrario la relación agua/cemento (efecto positivo) presenta un efecto menos marcado; el cual indica que al aumentar la relación agua/cemento, la porosidad aumenta. Lo anterior se corrobora con la figura 23 de interacción entre las variables, en donde se ve el efecto del tiempo comparado con la relación agua/cemento sobre la porosidad.

Figura 22. Diagrama de Pareto Estandarizado para las mediciones de porosidad.



Fuente. Los autores

Figura 23. Interacción entre las variables para las mediciones de porosidad.



Fuente. Los autores

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, representa un 98,9327% de la variabilidad en Porosidad y el estadístico R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, indica un 98,3397%.

4.4 ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

En la Tabla 3 se presentan los resultados promedio obtenidos para las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico de las probetas de concreto sin refuerzo con respecto a las diferentes relaciones agua/cemento y tiempo de curado; el comportamiento es observado en la figura 24. Los resultados tomados a las muestras son presentados en el Anexo D.

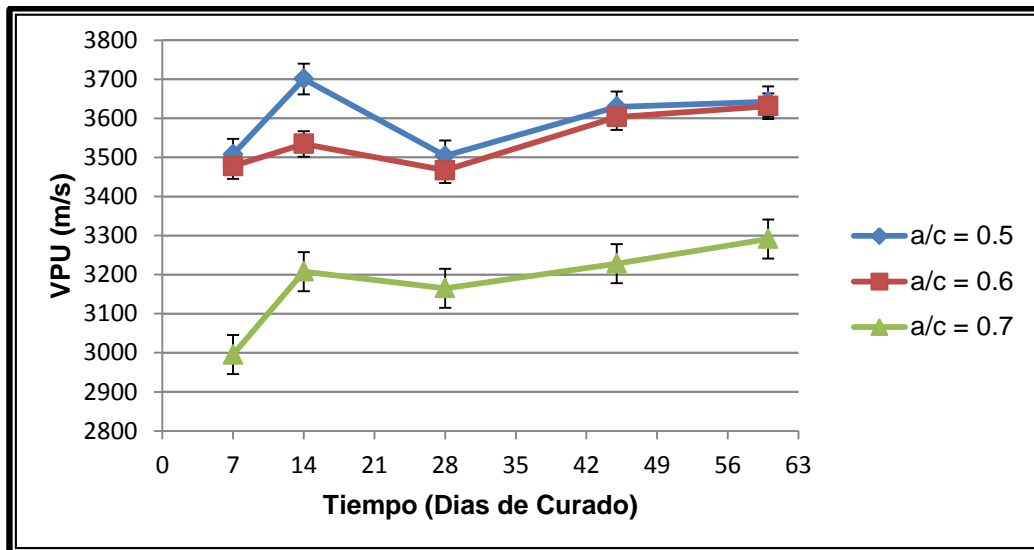
Tabla 3. Resultados obtenidos de las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasonico (VPU) en función de la relación agua/cemento

Relación a/c	VPU Día 7 (m/s)	VPU Día 14 (m/s)	VPU Día 28 (m/s)	VPU Día 45 (m/s)	VPU Día 60 (m/s)
0,5	3508,057	3700,623	3503,894	3629,572	3642,587
0,6	3477,677	3534,584	3467,086	3603,179	3631,147
0,7	2995,369	3207,624	3165,024	3228,396	3291,42

Fuente. Los autores

Se observa en las figura 24, el aumento significativo que presenta la VPU a medida que transcurre el tiempo hasta el día 14, en el cual se presenta una disminución en dichas medidas; esto puede deberse a que en este día las muestras aún presentaban humedad a pesar de haberse realizado el curado bajo techo, la cual afectó los resultados de VPU. A partir del día 28 los valores de VPU están relativamente más cercanos; además se ve claramente un comportamiento decreciente en la Velocidad de Pulso Ultrasonico a medida que se aumenta la relación agua/cemento.

Figura 24. Comportamiento de la Velocidad de Pulso Ultrasonico en Función de los días de curado del concreto

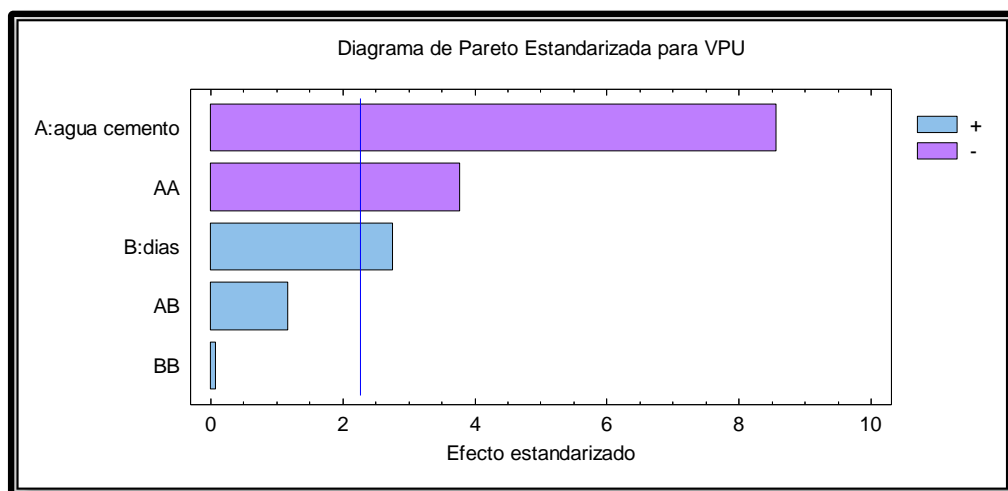


Fuente. Los autores

Las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico a partir del día 28 aumentaron al pasar los días de curado del concreto, ésto es debido a que las probetas sufren un fenómeno de secado en el cual los espacios capilares que antes estaban siendo ocupados por el agua, van siendo llenados de aire o vacíos, generando un mayor tiempo de propagación de la onda. Es importante mencionar que la relación que alcanzó mayores velocidades fue 0.5 y menores velocidades 0.7, siendo el mayor valor de VPU alcanzado de 3700.623 m/s correspondiente a la relación a/c de 0.5 en el día 14 y el menor valor de 2995.369 m/s obtenido de la relación a/c de 0.7 en el día 7. Lo anterior es debido a que la cantidad de humedad presente y, por ende, la relación a/c son factores fundamentales en la determinación de VPU, además la variabilidad de las medidas es causada probablemente por la heterogeneidad de las probetas de concreto, forma de agregado y fallas en el proceso de fabricación.

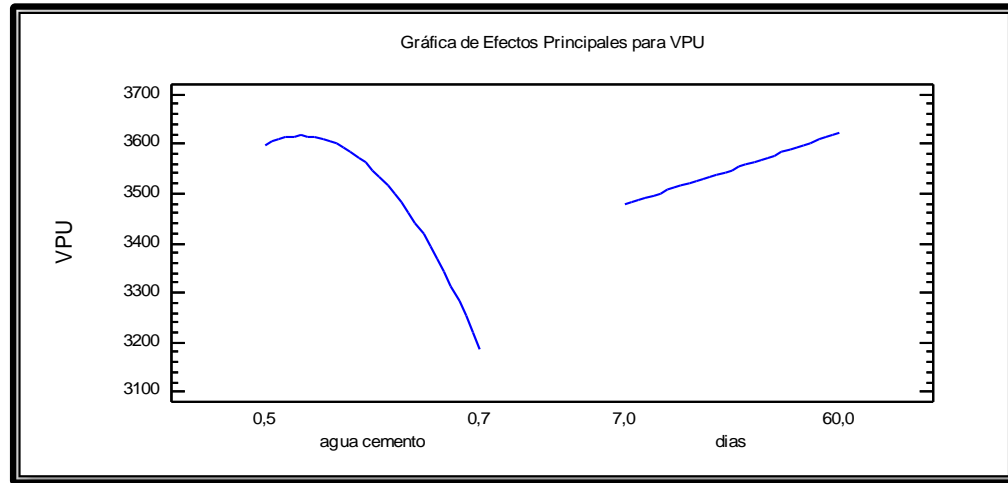
En la figura 25 y 26 se presentan los diagramas de Pareto y gráficas de Efectos Principales para la VPU, obtenidos en el análisis con el paquete estadístico STATGRAPHICS.

Figura 25. Diagrama de Pareto Estandarizado para las mediciones de VPU.



Fuente. Los autores

Figura 26. Interacción entre las variables para las mediciones de VPU.



Fuente. Los autores

Al analizar la figura 25 se puede deducir que la relación agua/cemento tiene un efecto negativo sobre la velocidad de pulso ultrasónico, ya que a medida que aumenta la relación a/c disminuye la VPU. Por el contrario, los días de curado tienen un efecto positivo ya que a medida que aumentan los días, aumenta las medidas de velocidad de pulso ultrasónico. Lo anterior se corrobora con la figura 26 de interacción entre las variables en donde se ve el efecto del tiempo comparado con la relación agua/cemento sobre la VPU.

En este caso el R-Cuadrado representa un 91,8066% de la variabilidad en VPU, mientras que el R-cuadrado ajustado fue de 87,2547%.

4.5 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:

La Tabla 4 muestra los datos promedio obtenidos, realizados a cuatro probetas por día para cada relación a/c en los tiempos de curado 7, 14, 28, 45 y 60. Los resultados de este ensayo se expresan en unidades de esfuerzo (MPa) y son

presentados en el Anexo E. Estos valores se calcularon de acuerdo a la ecuación 1; usando un radio promedio de las probetas analizadas en cada día.

$$f'c = \frac{Carga (N)}{\pi * R_{prom}^2(mm)^2} \quad (1)$$

Tabla 4. Resistencia a la compresión para probetas ensayadas.

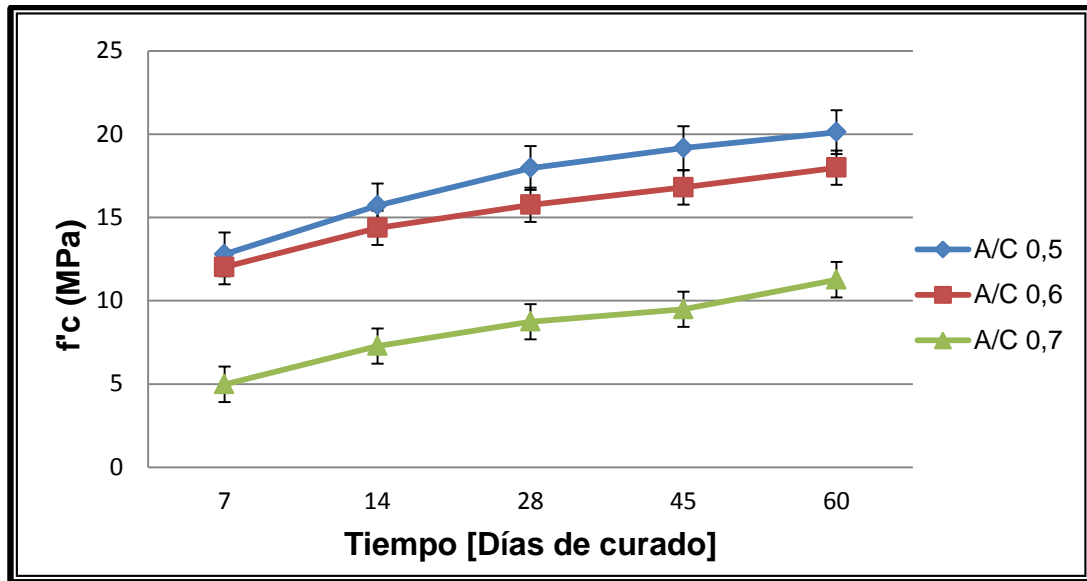
RELACIÓN (a/c)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
	DÍA 7	DÍA 14	DÍA 28	DÍA 45	DÍA 60
0,5	12,785	15,719	17,972	19,166	20,123
0,6	12,019	14,373	15,760	16,806	17,989
0,7	4,981	7,279	8,743	9,487	11,264

Fuente. Los autores

A partir de los datos anteriormente mostrados se puede observar un comportamiento directamente proporcional, ya que ocurre un incremento en la resistencia a medida que aumenta el tiempo de curado de las probetas para cada una de las relaciones agua/cemento. Además, se observa simultáneamente un comportamiento inversamente proporcional entre la resistencia y las relaciones a/c, obteniéndose mayores resistencias para la relación (a/c) de 0.5.

La figura 27 muestra el comportamiento que presenta la resistencia a la compresión analizada durante los diferentes días de curado. Dicho comportamiento se debe a la interacción entre las materias primas y el cemento al entrar en contacto con el agua [38], ocasionando reacciones de hidratación que se van completando permitiendo que el concreto adquiera propiedades mecánicas. Se observa que la relación que mayor resistencia obtiene es la de 0.5 en el día 60 con un valor de 20.123 MPa y la relación que menor resistencia presentó es la de 0.7 en el día 7 con un valor de 4.981 MPa.

Figura 27. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de los días de curado para las diferentes relaciones agua/cemento.



Fuente. Los autores

Estudios colombianos han clasificado el uso del concreto de acuerdo a su resistencia a la compresión a los 28 días [39], clasificando como concretos con resistencia a la compresión normal los que se encuentran en un rango entre 7 – 42 MPa. Por lo que se puede deducir que las resistencias obtenidas para todas las relaciones en este día se encontraron dentro de este rango de dicha clasificación. Adicionalmente, los requerimientos para la resistencia a la compresión varían desde 17 – 28 MPa para concreto residencial y más para estructuras comerciales, requerimiento que sólo cumple la relación 0.5 a partir del día 28.

Durante el ensayo de compresión, las líneas de falla presentadas variaron en algunos cilindros como se puede observar en la figura 28. Es importante resaltar que la falla presentada cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparado, es una falla de tipo cónica [40], es decir en forma de X alrededor del eje en el que se aplicaba la carga. Sin embargo, las líneas de falla generadas en la mayoría de los cilindros fueron líneas

transversales (inclinadas), lo que se pudo generar principalmente por una pequeña variación de concavidad o convexidad presente sobre la superficie de las caras de aplicación de la carga o por una ligera desviación de las tolerancias de paralelismo establecidas. Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro en más 0.5% y los extremos deben hallarse planos dentro de un margen de 0.002 pulgadas (0.05 mm) [41]; a pesar de esto la mayoría de las probetas ensayadas estaban dentro del límite de tolerancia especificado.

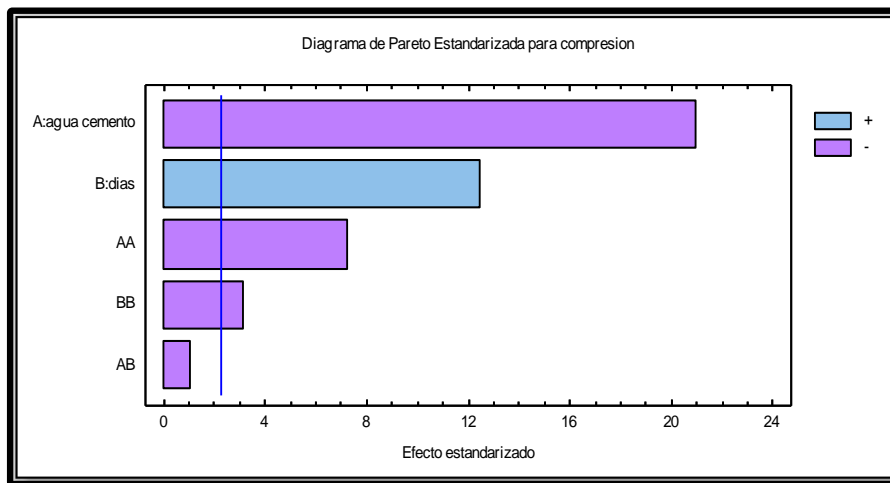
Figura 28. Líneas de falla presentadas en los cilindros ensayados



Fuente: Los autores

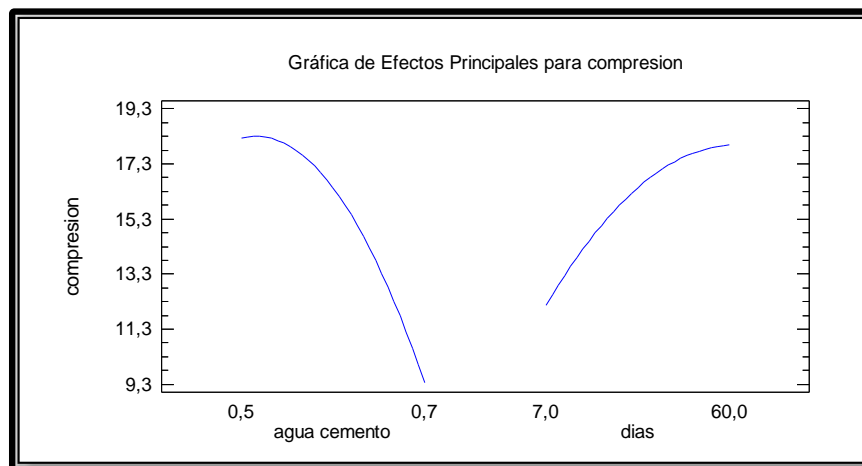
A continuación se muestran los diagramas de Pareto y graficas de Efectos Principales obtenidos en el análisis con el paquete estadístico STATGRAPHICS, en donde se observa el efecto real de la relación (a/c) y el tiempo (días) sobre la técnica destructiva de resistencia a la compresión.

Figura 29. Diagrama de Pareto Estandarizado para las mediciones de resistencia a la compresión.



Fuente. Los autores

Figura 30. Interacción entre las variables para las mediciones de resistencia a la compresión



Fuente. Los autores

La figura 29 muestra el efecto negativo que presenta la relación agua/cemento sobre la resistencia a la compresión; sin embargo, es la variable con mayor influencia. Por otra parte, el diagrama corrobora el efecto positivo del tiempo de curado, ya que a medida que transcurre el tiempo aumenta la resistencia. Lo anterior se comprueba con la figura 30 de interacción entre las variables, en donde se ve el efecto menos marcado del tiempo comparado con la relación (a/c) sobre la resistencia a la compresión.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, representa un 98,6628% de la variabilidad en compresión. Se tiene también que el estadístico R-cuadrado ajustada es 97,9199%.

4.6 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO PARA LAS DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO.

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y VPU. Posteriormente se presenta la figura 31 donde se relaciona el comportamiento de éstos dos ensayos para las relaciones agua/cemento (0.5, 0.6 y 0.7) en cada día de curado de las probetas de concreto.

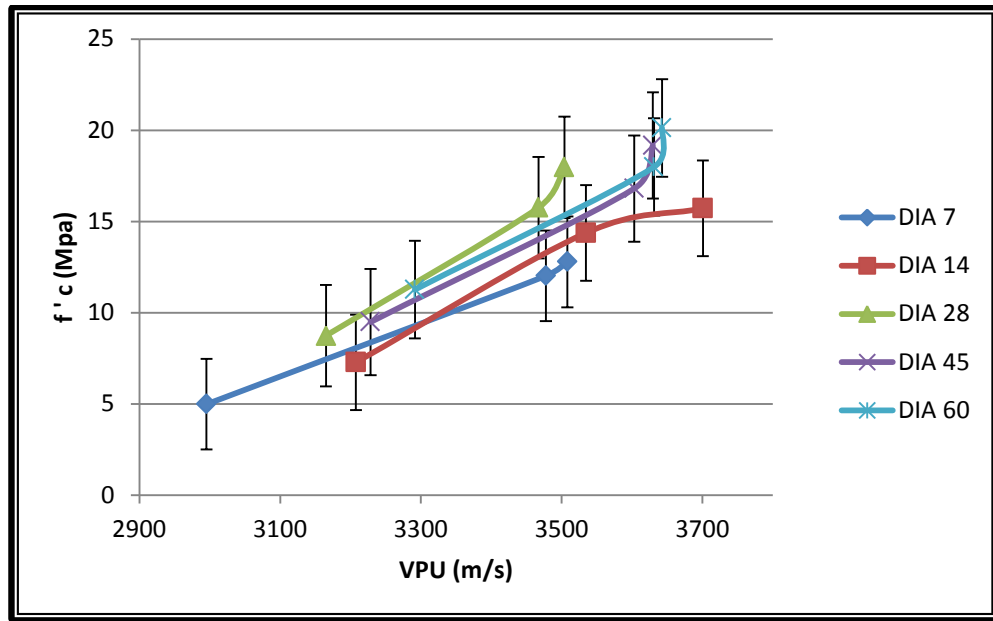
Tabla 5. Relación de los resultados obtenidos de las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.

Relación a/c	Día 7		Día 14		DIA 28		DIA 45		DIA 60	
	VPU (m/s)	f'c (MPa)	VPU (m/s)	f'c (MPa)	VPU (m/s)	f'c (MPa)	VPU (m/s)	f'c (MPa)	VPU (m/s)	f'c (MPa)
0,5	3508,057	12,785	3700,623	15,719	3503,894	17,972	3629,572	19,166	3642,587	20,123
0,6	3477,677	12,019	3534,584	14,373	3467,086	15,76	3603,179	16,806	3631,147	17,989
0,7	2995,369	4,981	3207,624	7,279	3165,024	8,743	3228,396	9,487	3291,42	11,264

Fuente. Los autores

La velocidad de pulso y la resistencia a la compresión al transcurrir el tiempo se comportan de manera similar, presentando un aumento rápido inicialmente y posteriormente una estabilización. La figura 31 representa el comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), en el cual se puede analizar que a medida que aumenta la resistencia a la compresión aumenta la VPU para las relaciones 0.5, 0.6 y 0.7 en los días de evaluación del concreto. En el día 28 la máxima resistencia a la compresión y VPU alcanzada fue para la relación a/c 0.5. Con base en lo anterior se puede deducir que las dos variables de respuesta presentan un comportamiento directamente proporcional respecto al factor tiempo; además la correlación entre resistencia y VPU se ve afectada por diferentes factores tales como tipo y contenido de agregados, densidad, microestructura y principalmente por el contenido de agua/cemento.

Figura 31. Comportamiento de la Resistencia a la Compresión en función de las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico en los días evaluados.



Fuente. Los autores

4.7 RELACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA POROSIDAD DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO.

En la Tabla 6 se presentan los resultados promedio obtenidos para las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico de las probetas de concreto sin refuerzo con respecto al número de poros encontrados en las muestras en los diferentes días de curado; este comportamiento es observado en la figura 32.

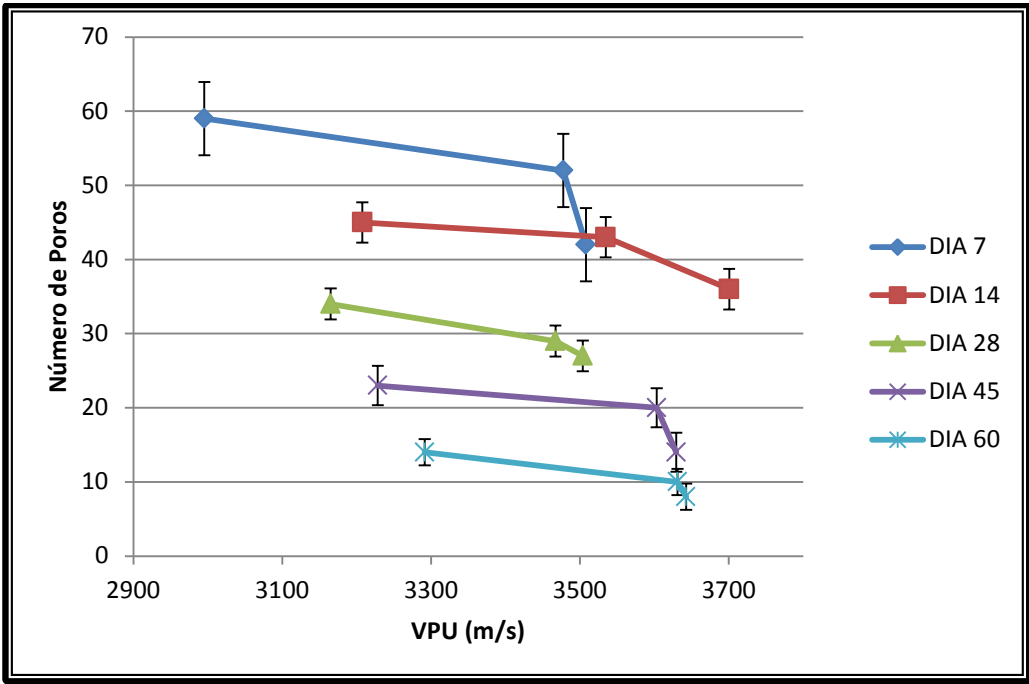
Tabla 6. Relación de los resultados obtenidos de las Medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de la Porosidad.

Relación a/c	DIA 7		DIA 14		DIA 28		DIA 45		DIA 60	
	VPU (m/s)	# Poros	VPU (m/s)	# Poros	VPU (m/s)	# Poros	VPU (m/s)	# Poros	VPU (m/s)	# Poros
0,5	3508,057	42	3700,623	36	3503,894	27	3629,572	14	3642,587	8
0,6	3477,677	52	3534,584	43	3467,086	29	3603,179	20	3631,147	10
0,7	2995,369	59	3207,624	45	3165,024	34	3228,396	23	3291,42	14

Fuente. Los autores

La figura 32 permite la representación del comportamiento inversamente proporcional presentado por el número de poros encontrados con relación a la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), lo cual es debido a que al haber mayor cantidad de agua en el concreto, mayor será la porosidad y, por tanto, la onda tomará más tiempo en el recorrido de la trayectoria. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo va completando reacciones de hidratación y la cantidad de poros va disminuyendo, lo que explica que entre menor sea la porosidad presente en las probetas las medidas de VPU aumentan para las tres relaciones a/c analizadas.

Figura 32. Comportamiento del Número de Poros en función de las medidas de Velocidad de Pulso Ultrasónico en los días evaluados.



Fuente. Los autores

4.8 RELACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO.

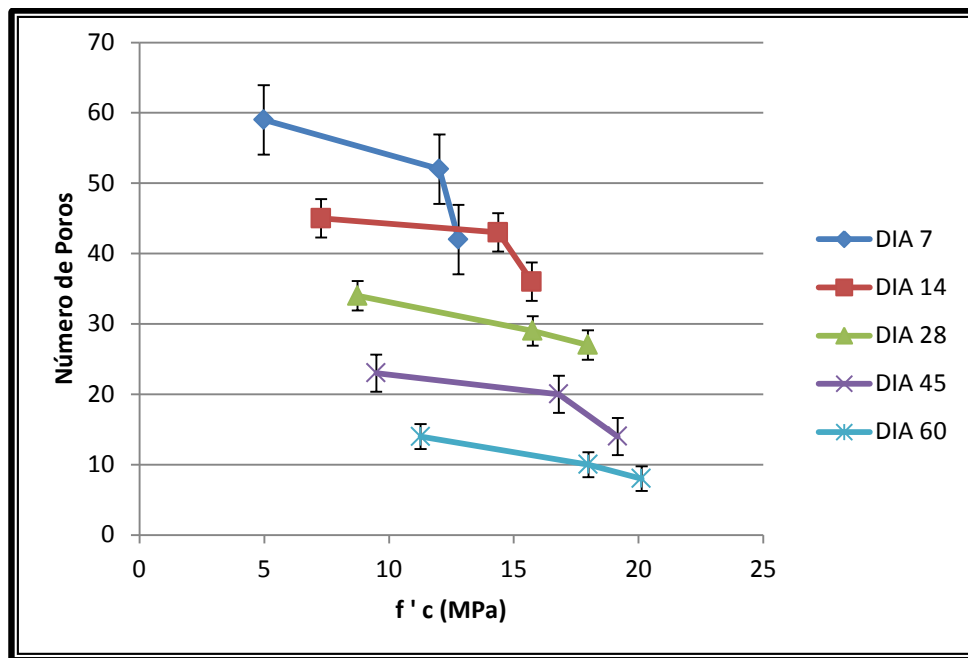
Los resultados promedio obtenidos en la Tabla 7 indican que al igual que con la VPU existe una relación inversa entre las diferentes resistencias a la compresión de las probetas de concreto sin refuerzo con respecto al número de poros encontrados en las muestras en los diferentes días de curado; el comportamiento es observado en la figura 33.

Tabla 7. Relación de los resultados obtenidos de la Resistencia a la Compresión y de la porosidad.

Relación a/c	DIA 7		DIA 14		DIA 28		DIA 45		DIA 60	
	f 'c (MPa)	# Poros	f 'c (MPa)	# Poros	f 'c (MPa)	# Poros	f 'c (MPa)	# Poros	f 'c (MPa)	# Poros
0,5	12.785	42	15.719	36	17.972	27	19.166	14	20.123	8
0,6	12.019	52	14.373	43	15.76	29	16.806	20	17.989	10
0,7	4.981	59	7.279	45	8.743	34	9.487	23	11.264	14

Fuente. Los autores

Figura 33. Comportamiento del Número de Poros en función de las medidas de Resistencia a la compresión en los días evaluados.



Fuente. Los autores

Analizando los comportamientos decrecientes mostrados en la figura 33, se observa claramente que la porosidad tiene efectos muy notables en la resistencia, ya que a medida que aumentan los días de curado disminuye el número de poros y aumenta la resistencia a la compresión. No obstante es importante mencionar

que en el día 60 es alcanzada la mayor resistencia para cada una de las relaciones agua/cemento y por ende el número de poros es el mínimo, esto es debido a que el concreto endurece progresivamente durante el periodo de curado hasta adquirir su resistencia característica. Dicho proceso de solidificación se debe al proceso químico de hidratación.

Aunque la resistencia a compresión depende principalmente de la relación a/c, también se ven implícitos otros factores como lo son las propiedades y las proporciones de los materiales que constituyen el concreto, el grado de compactación y las condiciones de curado. Desde el punto de vista de la resistencia, la relación entre la porosidad y la relación agua/cemento es el factor más importante; además, la porosidad es un factor importante que influye en el material, ya que permite el ingreso de agentes agresivos dentro de la matriz del concreto afectando su resistencia a la compresión, y, en general, disminuyendo el tiempo de vida útil proyectado para una estructura.

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados y análisis realizados para las probetas de concreto sin refuerzo con diferentes relaciones agua/cemento (0.5, 0.6 y 0.7) y curadas en condiciones ambientales bajo techo, se puede concluir que:

A medida que aumenta la relación agua/cemento, los valores de velocidad de pulso ultrasónico disminuyen notablemente, esto es debido a que el agua que no interviene en las reacciones de hidratación genera unos vacíos que son catalogados como obstáculos durante el viaje de la onda ultrasónica produciendo así un mayor tiempo de vuelo.

Los comportamientos obtenidos de la Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistencia a la Compresión dependen de la porosidad del concreto, característica sujeta a la relación agua/cemento; es relevante aclarar que éstos comportamientos varían al utilizar componentes de diferentes resistencias, tamaños y orígenes de agregados que no fueron objeto del presente estudio.

Es importante el estudio de la porosidad del concreto a partir de técnicas destructivas y no destructivas porque es una característica inevitable de este material, ya que afecta directamente las propiedades mecánicas, la calidad y por ende la vida útil de una estructura.

De acuerdo a los resultados obtenidos de porosidad de las muestras de concreto mediante el análisis petrográfico se puede deducir que a medida que aumentan los días de curado, el número de poros disminuye notablemente para cada relación agua/cemento porque las reacciones de hidratación fueron completándose a medida que el tiempo transcurría, y aumentando así los valores

de Velocidad de Pulso Ultrasónico y resistencia a la compresión, obteniéndose una relación inversamente proporcional al número de poros encontrados en las muestras de concreto.

Las metodologías mencionadas en la norma ASTM C457 para la determinación de la porosidad por microscopía en muestras de concreto, fueron revisadas pero no empleadas en su totalidad para la realización del análisis de porosidad en este proyecto, debido a que no se contaba con un microscopio petrográfico que posea un dispositivo de nivelación lineal-transversal con carro direccionado que permite establecer un número de paradas durante el conteo de poros y que cuenta con un software interno el cual graba la rotación de tornillos durante las paradas, dato necesario para encontrar el porcentaje de porosidad.

El ensayo del análisis petrográfico en las muestras de concreto sin refuerzo con diferentes relaciones a/c, se llevó a cabo implementando una nueva metodología para la determinación de la porosidad, usando el videomicroscopio HIROX y el estereoscopio OLYMPUS, adaptando a la sección pulida un acetato circular con 474 cuadros de 3 x 3 [mm] de los cuales fueron evaluados 34 siendo ésta una muestra representativa resultado de efectuar el análisis estadístico correspondiente para el conteo de poros y así proporcionando una contribución a las metodologías presentadas por la norma ASTM C457.

La metodología propuesta para la preparación y análisis petrográfico de muestras de concreto permitió identificar la porosidad según la relación agua/cemento evaluada; además esta metodología permite relacionar la porosidad con los ensayos de VPU y resistencia a la compresión, siendo esto importante para el estudio del concreto como material estructural.

6. RECOMENDACIONES

Después de realizado este proyecto se recomienda lo siguiente:

Para futuros proyectos sobre el tema, se recomienda emplear un dispositivo de nivelación para la aplicación de la resina epoxy, permitiendo así una capa uniforme durante el pulido. Además es recomendable introducir las muestras de concreto con resina en una cámara de vacío para extraer el aire y evitar la formación de burbujas en la superficie de la sección.

Teniendo en cuenta los tipos de poros existentes en el concreto, se sugiere realizar la medición de diámetros de los poros en las secciones pulidas para efectuar una clasificación cuantitativa de la porosidad existente en cada relación agua/cemento.

Se recomienda calcular el porcentaje de porosidad en muestras de concreto mediante la metodología de preparación aportada en la investigación, variando el tamaño de agregado y la relación agua/cemento.

Complementar el análisis petrográfico en los concretos, no sólo en porosidad sino también realizando un estudio de la microestructura cuando se ve afectada al fuego, reacciones álcali sílice ó carbonatación.

Elaborar ensayos de permeabilidad en el concreto ya que es un factor importante a estudiar y establecer una correlación con el análisis petrográfico de la porosidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MEHTA Kumar, MONTEIRO Paulo, Concreto, Estructura y propiedades, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C México, IMCYC. Vol. 1 (2004), p. 51-74.
- [2] NEVILLE, Adam, Tecnología del Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C México, IMCYC Vol. 2 (2006), p.32-45.
- [3] LOZANO PEÑA, Jorge Enrique. La petrografía, una herramienta de control de calidad y diagnóstico de lesiones en la industria de la construcción. Universidad Nacional de Colombia (2008), p. 25-29.
- [4] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO, Colección Básica del concreto, Tecnología y propiedades, Colombia, Vol. 1 (2004), p. 107.
- [5] LÓPEZ OROZO, Juan Orlando. Porosidad del concreto. Universidad de San Carlos de Guatemala, Ingeniería Civil (2009), p. 1-2.
- [6] P. Maiza, S. Marfil, Petrografía del hormigón endurecido: estudio de un pavimento con patologías. Revista Hormigón, N°35 (2000), p.11-21.
- [7] P. Mehta, P Monteiro, Concrete: Structure, Properties and materials. Prentice-Hall Inc.(2000), p.548.
- [8] S. Marfil, P. Maiza, R. Salomón. Examen petrográfico aplicado al estudio del hormigón de una ruta interurbana con evidencias de deterioro. Revista de la

Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, N° 17 (2002), p 75-79.

[9] DONALD A. ST Jhon, ALAN W. Poole. Concrete Petrography. ISBN: 0 340 69266 9, ISBN 0 470 23772 4, Euston Road, London (1998), p 120-124.

[10] H. N. Walker and B. F. Marshall, Methods and Equipment Used in Preparing and Examining Fluorescent Ultrathin section of Portland Cement Concrete, Cem. Concr. Aggs, (2005), p 1-9.

[11] NEVILLE, Adam, Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, México (2004), p 2-5.

[12] D. N. Hadley, The Nature of the Paste-Aggregate Interface; PhD Thesis, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, (2008).

[13] SCRIVENER, L. Study of the Microstructure of Two Old cements Pastes, Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 2. Finep, Rio de Janeiro, Brasil, (2000), p 125.

[14] LÓPEZ OROZCO, J Orlando. Porosidad del Concreto. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Civil (2004).

[15] SÁNCHEZ DE GÚZMAN Diego, "Tecnología del concreto y del mortero". Bhandar Editores Ltda., Pontificia Universidad Javeriana, (1996).

[16] CRUZ BARILLAS, Sergio Augusto. Aplicación del método de análisis petrográfico del concreto endurecido. Universidad San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Civil (2000).

[17]SANCHEZ, D. Durabilidad y patología del concreto. Asociación colombiana de productores de concreto-Asocreto. Bogotá Colombia (2003). p. 11-220.

[18] CORZO PATIÑO, Laura Angélica. GARCIA DUARTE J. Ximena. Relación entre resistencia a la compresión, la porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento. Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2009.

[19] KUMAR Mehta P, MONTEIRO Paulo J.M Concrete Microstructure, Properties and Materials. Vol. 3 (2006), p.51.

[20] SKALNY, Jan O. Materials science of concrete. Estados Unidos, Vol. 1 (2002) p.157.

[21] MARQUEZ, Ronald. Química Industrial del Concreto. Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Manizales (2006).

[22] CONSTRUAPRENDE. Ingeniería Civil y Arquitectura. Tesis, apuntes y trabajos. [En línea] Pagina Web. Colombia. Disponible en: www.construaprende.com. Visitada en marzo del 2012.

[23] CENTRO DE MICROSCOPIA, UPR-RUM. Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. [En línea] Pagina Web. Puerto Rico. Disponible en: <http://microscopico.wordpress.com/estereoscopio/>. Visitada en abril del 2012.

[24] PCE INSTANT. Microscopios. [En línea] Pagina Web. Disponible en:<http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores/microscopios.htm> Visitada en abril del 2012.

[25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. ASTM C457/C457M - 10a. USA, 2011.

[26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*. ASTM C856 – 11.USA, 2011.

[27] FERNÁNDEZ, J.L., GONZÁLEZ, E.L., BROWN, S.A. Y BATIC, O.R. Evolución de la porosidad de pastas de cemento Portland por la incorporación de una puzolana natural, (2004) p.221.

[28] DE LA CUESTA, Jorge Andrés. Manual de Statgraphics Centurión XV, (2004) p.41-69.

[29] NTC 121 (1995). Cementoportland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[30]NTC 321 (1995). Cemento portland. Especificaciones químicas. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[31]NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[32] NTC 176 (1995).Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[33]NTC 237 (1995).Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[34] NTC 77 (1995).Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[35]NTC 78 (1995).Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 µm en agregados minerales. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[36]NTC 1377 (1995).Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[37] HERNÁNDEZ Sampieri Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO Carlos, LUCIO BAPTISTA Pilar. Metodología de la Investigación. Cuarta Edición (2004). p. 244-245.

[38] MÉRUBÉ, M.A., The Mineralogical and Petrographic Analysis of Concrete Aggregates, (2001).

[39] SANCHEZ DE GUZMÁN, D., Concretos y morteros “manejo y colocación en obra”. Instituto del concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto, (2004)

[40]EL CONCRETO EN LA OBRA. PROBLEMAS, Causas y Soluciones., Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba, IMCYC (Instituto Mexicano del Concreto y el Cemento), Noviembre (2008).

[41]SKOKIE, I.L., Tips on control tests for quality concrete, Portland Cement Association, (2009).

ANEXOS

ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO

ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA:

Para la realización de la caracterización de los agregados se hizo un análisis granulométrico en el cual se determinaron las principales propiedades de los agregados (fino y grueso), propiedades que se pueden observar en la tabla siguiente. Este análisis se realizó bajo las normas NTC 92 [31], NTC 176 [32] y NTC 237 [33].

Caracterización de la materia prima

CARACTERISTICAS	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO (1/2)"
Gravedad Especifica Aparente S.S.S	2.65	2.634
Peso Unitario del Agregado S.S.S Compactado (kg/m ³)	1560	1584
Peso Unitario del Agregado S.S.S. Suelto (Kg/ m ³)	1490	1448
Porcentaje de Absorción (%)	2.0	1.091
Porcentaje de Vacíos (%)	36.0	99.94

Fuente. Los autores

La clasificación de los agregados por tamaños se realizó bajo las normas NTC 77 [34] y NTC 78 [35]. Una vez caracterizado el material se realiza el análisis granulométrico del agregado fino, para esto se utilizaron una serie de tamices en donde el material retenido en cada uno de ellos se pesó para obtener el análisis

granulométrico, del cual se obtuvo los resultados presentados en la siguiente tabla..

Análisis granulométrico del agregado fino

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4	7.2	0.72	0.72	99.28
8	9.8	0.98	1.70	98.30
16	39.3	3.93	5.63	94.37
30	192.1	19.21	24.84	75.16
50	495.3	49.53	74.37	25.63
100	168.5	16.85	91.22	8.78
Fondo	87.2	8.72	99.94	0.06
TOTAL	999.4	99.94	Peso Muestra	1000 gr

Fuente. Los autores

Para la determinación del módulo de finura del agregado fino se utilizó la siguiente ecuación 2:

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\text{Retenido Acumulado Tamiz } 4 - 100}{100} \quad (2)$$

$$\text{Módulo de finura} = \frac{198.95}{100}$$

$$\text{Módulo de finura} = 1.9895$$

ETAPA 2. DISEÑO DE MEZCLA:

El método seguido para desarrollar el diseño de mezcla empleado en la presente investigación fue el ACI (American Concrete Institute); el cual se basa en tablas empíricas experimentales mediante las cuales se determinan cada uno de los componentes de la mezcla. A continuación se presentan los cálculos y pasos seguidos para esta etapa.

I. Selección del asentamiento

Es un valor escogido de acuerdo a la aplicación de la mezcla, en este caso, basándose en una consistencia media para el concreto en estado fresco y una aplicación en pavimentos compactados a mano, columnas, vigas y muros reforzados con vibración, se determina como asentamiento adecuado para las probetas a analizar un valor de 5 a 10 cm.

II. Selección del tamaño máximo de agregado

El tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura. De acuerdo a las dimensiones de las probetas (7.5 X 15 cm) se establece un tamaño máximo de agregado de $1\frac{1}{2}$ " (12.7 mm).

III. Estimación del contenido de agua

La cantidad de agua por volumen unitario de concreto que se requiere para producir un asentamiento dado depende del tamaño máximo del agregado; teniendo en cuenta que el asentamiento para nuestro diseño de mezcla esta entre 5 y 10 cm y que el tamaño máximo de agregado es de 12.5 mm se determina la cantidad de agua, la cual corresponde a 215 Kg/m^3 de concreto.

IV. Selección de la relación agua/cemento

La selección de agua/cemento requerida se determina no solo por los requisitos de resistencia, sino también por factores como la durabilidad y propiedades para el acabado.

Con el fin de cumplir los objetivos de la presente investigación se determinaron tres relaciones agua/cemento 0.5, 0.6 y 0.7.

V. Calculo del contenido de cemento (c)

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene a partir de la relación agua/cemento y del contenido de agua, los cuales se determinaron en

los pasos anteriores. La ecuación 3 utilizada para este cálculo se presenta a continuación:

$$c = \frac{a}{a/c} \quad (3)$$

Para el caso de nuestras relaciones agua/cemento los valores son:

- $C = \frac{215}{0.5} = 430 \frac{kg}{m^3} \text{ cemento}$
- $C = \frac{215}{0.6} = 358.33 \frac{kg}{m^3} \text{ cemento}$
- $C = \frac{215}{0.7} = 307.14 \frac{kg}{m^3} \text{ cemento}$

VI. Estimación del contenido de agregado grueso (b)

Los agregados que tengan esencialmente la misma granulometría y tamaño máximo, producirán un concreto de trabajabilidad satisfactorio cuando se emplea un volumen determinado de agregado grueso seco y compactado, por un volumen unitario de concreto. El cálculo se hace de acuerdo a la ecuación 4.

$$b = \frac{b}{b_o} * b_o \quad (4)$$

- b = Volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto
- b/b_o = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto
- b_o = Relación entre la masa unitaria seca compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

El módulo de finura del agregado fino para este diseño de mezcla es de 1.98 y el tamaño máximo del agregado grueso de 12.7 mm, por lo tanto la relación b/b_o es igual a 0.632 y b_o es igual a 0.60137.

Con los datos determinados anteriormente se calcula el contenido de agregado grueso $b = 0.632 * 0.60137 = 0.3789$

VII. Contenido del agregado fino

El volumen de agregado fino a utilizar en la mezcla se calcula al sumar el volumen de cada uno de los componentes en la mezcla, los cuales son restados con un metro cúbico de concreto, según la ecuación 5.

$$Vaf = 1000 - Va + Vc + Vag \quad (5)$$

- Va = Volumen de agua
- Vc = Volumen de cemento
- Vag = Volumen de agregado grueso (Cantidad de agregado grueso/Densidad aparente ag)

Los datos obtenidos par cada una de las relaciones agua/cemento empleadas son:

- $Vaf_{(0.5)} = 1000 - 215 + 141.91 + 378.9 = 264.19 \text{ m}^3$
- $Vaf_{(0.5)} = 1000 - 215 + 118.260 + 378.9 = 287.84 \text{ m}^3$
- $Vaf_{(0.5)} = 1000 - 215 + 101.366 + 378.9 = 304.734 \text{ m}^3$

Este volumen se multiplica por la densidad aparente del agregado fino, con el fin de calcular su cantidad en kilogramos.

En la siguiente tabla, se presentan las dosificaciones empleadas para la fabricación de 35 probetas para cada relación agua/cemento. Tomando como base de cálculo 1 m^3 de concreto.

Dosificaciones de los componentes de la mezcla de las diferentes relaciones agua/cemento.

CONSTITUYE NTE	RELACIÓN AGUA/CEMENTO					
	0,5		0,6		0,7	
	Masa [Kg/m ³]	Masa [Kg] 35P	Masa [Kg/m ³]	Masa [Kg] 35P	Masa [Kg/m ³]	Masa [Kg] 35P
Agua	215	4,053	215	4,053	215	4,053
Cemento	430	9,971	358,33	8,309	307,14	7,122
Ag. Grueso	997,92	23,142	997,92	23,142	997,92	23,142
Ag. Fino	700,196	16,236	762,776	17,689	807,54	18,725

Fuente. Los autores

ANEXO B. MODELO ESTADÍSTICO PARA CÁLCULO DE MUESTRA RERESPRESENTATIVA

El modelo estadístico utilizado para determinar la muestra representativa de la cuadrícula elaborada con el fin de analizar la porosidad presente en las muestras analizadas, se muestra a continuación.

$$n' = \frac{S^2}{V^2}$$

$$n = \frac{n'}{1 + \frac{n'}{N}}$$

$$S^2 = P(1 - P)$$

$$V^2 = Se^2$$

$$P + q = 1$$

Dónde:

- Se = Desviación estándar de la distribución muestral
- Se^2 = Error estándar al cuadrado
- S^2 = varianza de la muestra
- P = % estimado de la muestra
- n = Tamaño de la muestra
- n' = Tamaño de la muestra sin ajustar
- N = Tamaño de la Población
- V^2 = Varianza de la población al cuadrado

Se parte de un total de cuadros por cuadrícula de 474 los cuales tienen como dimensiones 3 x 3 mm y la cuadrícula un diámetro de 7.5 cm. Según las condiciones establecidas para el modelo estadístico el total de cuadros representativos para el análisis es de 34 cuadros, calculados de la siguiente manera:

$$P = 90\% = 0.9$$

$$Se = 5\% = 0.05$$

$$S^2 = 0.9(1 - 0.9)$$

$$S^2 = 0.09$$

$$V^2 = 0.05^2 = 0.0025$$

$$n' = \frac{0.09}{0.0025} = 36$$

$$n = \frac{36}{1 + \frac{36}{474}} = 34 \text{ cuadros por evaluar}$$

ANEXO C .REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS PETROGRÁFICO.

El análisis petrográfico fue realizado mediante el conteo de poros a través de un acetato circular con cuadros de 3x3 mm. Los datos que se presentan a continuación corresponden al número total de poros encontrados en los 34 cuadros evaluados para cada sección pulida de diferente relación agua/cemento y días de curado.

POROSIDAD RELACIÓN A/C 0.5 (Nº de Poros)					
PROBETA	DIA 7	DIA 14	DIA 28	DIA 45	DIA 60
1	53	46	39	21	12
2	28	20	21	11	7
3	35	33	26	17	15
4	50	47	20	12	9
5	45	37	31	15	5
6	39	35	27	10	2

POROSIDAD RELACIÓN A/C 0.6 (Nº de Poros)					
PROBETA	DIA 7	DIA 14	DIA 28	DIA 45	DIA 60
1	52	29	27	19	9
2	56	50	28	23	14
3	47	46	32	29	8
4	49	44	25	11	6
5	53	51	42	26	10
6	55	39	23	15	12

POROSIDAD RELACIÓN A/C 0.7 (Nº de Poros)					
PROBETA	DIA 7	DIA 14	DIA 28	DIA 45	DIA 60
1	54	51	39	21	18
2	66	54	36	15	12
3	71	45	29	22	9
4	52	39	31	18	15
5	53	44	40	34	17
6	56	40	32	27	13

ANEXO D. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

- DÍA 7 DE CURADO:

RELACIÓN A/C 0,5 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	45,5	45	44,3	44,4	43,9	44	155,07	75	44,516	3483,414
2	44,6	44	43,5	43,2	43,8	43,3	157,39	74,71	43,733	3598,857
3	41,8	41,6	42,3	41,5	42,7	42,2	151,58	74,13	42,016	3607,616
4	43,2	43,7	43,5	43,8	43,2	42,6	150,01	74,68	43,333	3461,769
5	44,7	44,5	44,3	43,8	44,7	44,1	153,28	75,22	44,35	3456,144
6	44,4	43,9	44,1	43,9	44,7	44,1	152,93	75	44,183	3461,260
7	42,9	42,6	43,7	43	42,7	41,8	149,2	74,52	42,783	3487,339

RELACIÓN A/C 0,6 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	44,6	43,9	44,5	44,1	44,3	44,2	155,06	75,04	44,266	3502,861
2	43,7	43,1	44,2	43,4	43,3	42,3	155,08	75,65	43,333	3578,769
3	45,6	44,6	45	44,8	46,1	46,4	155,86	75,5	45,4166	3431,780
4	45,2	44,9	43,2	42,8	42,4	41,9	148,7	74,43	43,4	3426,267
5	42,5	43,3	43,5	43,3	42,8	42,5	149,06	74,06	42,983	3467,856
6	43,4	43,6	44,8	44,9	43,6	43,4	154,93	75,15	43,95	3525,142
7	44,7	44,5	44,6	44,4	45,6	45,5	153,1	74,89	44,883	3411,066

RELACIÓN A/C 0,7 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	51,4	50,7	50,2	50,4	53,1	53	153,22	75,18	51,466	2977,073
2	52,2	52,6	52,2	52,5	52,9	52,6	152,08	74,14	52,5	2896,762
3	47,1	47,5	46,3	46,6	46,1	45,9	142,88	76,25	46,583	3067,191
4	50,2	50,6	49,1	49,3	49,8	50	148,6	74,09	49,833	2981,940
5	51,9	52,4	51,9	52,2	49,9	50,2	157,2	75,25	51,416	3057,374
6	48,2	48,2	50,5	50,1	49,3	49,6	154,51	75,65	49,316	3133,018
7	52,8	53,2	52,6	52,9	55,7	55,9	153,7	75,19	53,85	2854,225

- DÍA 14 DE CURADO:

RELACIÓN A/C 0,5 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	41,2	41,1	40,2	40,6	40,6	40,8	147,98	75,21	40,75	3631,411
2	41,4	41,6	42	41,8	41,6	41,3	157,65	76,4	41,616	3788,146
3	41	41,4	40,9	40,7	41,3	41,6	156,57	75,01	41,15	3804,860
4	40,9	40,9	41,3	41,4	41,4	41,5	152,27	74,85	41,233	3692,886
5	39,8	40	40,4	40,3	40	40,4	151,71	74,08	40,15	3778,580
6	41,4	41,6	41,9	41,8	41,8	42,2	154,58	75,39	41,783	3699,561
7	40,7	40,8	40,6	40,7	41,3	41,6	143,69	74,84	40,95	3508,913

RELACIÓN A/C 0,6 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	43,4	43,3	44,3	42,8	42,5	42,8	149,97	74,56	43,183	3472,868
2	42,8	43,3	41,5	41,8	42,8	42,4	152,93	75,26	42,433	3604,006
3	42,3	42,7	42,1	42,2	42	42,1	148,06	74,8	42,233	3505,762
4	44,1	44,1	44,6	44,4	44,6	44,4	155,91	74,9	44,366	3514,125
5	45	45,4	45,4	45,7	46	45,6	157,59	75,34	45,516	3462,248
6	42,5	42,6	42,8	42,3	43,8	43,4	153,94	74,87	42,9	3588,345
7	43,8	44,1	43,5	43,8	43,5	43,4	157,03	75,28	43,683	3594,735

RELACIÓN A/C 0,7 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	48,9	48,5	49,6	49,2	48,7	49,1	154,47	74,9	49	3152,449
2	48,2	48,8	47,5	47,4	47,3	47,5	153,03	75,03	47,783	3202,581
3	46,7	46,8	46,4	46,6	46,6	46,6	151,89	74,5	46,616	3258,277
4	48	48,1	47,7	48	47,4	47,6	156,17	74,69	47,8	3267,155
5	48,4	48,6	49	48,9	48	48,1	157,35	74,74	48,5	3244,330
6	47,6	47,9	48,1	49,4	46,7	46,5	151,57	75,03	47,7	3177,568
7	47	47,2	46,6	46,9	47,2	47,2	148,15	75,76	47,016	3151,010

- DÍA 28 DE CURADO:

RELACIÓN A/C 0,5 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	42,8	42,7	42,7	42,6	43,2	43,2	152,44	74,52	42,866	3556,143
2	43	42,8	42,4	42,5	42,6	42,9	155,97	74,49	42,7	3652,693
3	45,2	45,3	45,9	45	44,7	45,1	158,28	75,61	45,2	3501,770
4	42	41,8	42,2	42,4	41,9	41,7	150,42	74,44	42	3581,429
5	41,9	41,8	42,3	41,9	42,4	42,3	143,48	74,5	42,1	3408,076
6	42,8	42,7	42,5	42,8	42,7	43,1	144,24	74,79	42,766	3372,720
7	44,3	43,9	43,9	43,8	42,7	42,3	150,21	74,37	43,483	3454,427

RELACIÓN A/C 0,6 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	42,8	42,9	43,1	43,5	43,2	42,7	153,15	74,54	43,033	3558,869
2	43	43,3	43,2	43,5	42,9	43,1	138,92	74,46	43,166	3218,224
3	43,2	43,1	42,9	42,8	43,1	43	140,95	75,54	43,016	3276,637
4	43,1	42,8	42,9	43,4	42,7	42,7	146,22	74,76	42,933	3405,745
5	43,4	43,2	42,9	43	42,8	42,7	150,92	75,21	43	3509,767
6	43,3	43	42,7	42,8	42,7	43,2	157,83	73,86	42,95	3674,738
7	42,7	42,8	43,1	43,3	42,9	42,8	155,66	75,73	42,933	3625,621

RELACIÓN A/C 0,7 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	47,5	47,3	46,9	47,1	47	47,2	153,15	74,54	47,166	3246,996
2	47	47,1	46,9	46,8	47,6	47,5	138,92	74,46	47,15	2946,341
3	46,8	46,7	47	47,2	47,4	47,1	140,95	75,54	47,033	2996,811
4	46,7	46,8	47,5	47,8	46,9	47,1	146,22	74,76	47,133	3102,263
5	47,1	47,4	47,7	47,5	46,8	46,9	150,92	75,21	47,233	3195,201
6	46,9	46,9	47,3	47,1	47,4	47,3	157,83	73,86	47,15	3347,402
7	46,6	46,8	47,4	47	46,6	46,9	155,66	75,73	46,883	3320,156

- DÍA 45 DE CURADO:

RELACIÓN A/C 0,5 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	42,4	42,3	42	41,8	42	41,9	151,41	75,04	42,066	3599,287
2	41,1	41,2	41,5	41,4	41,6	41,6	150,92	75,65	41,4	3645,411
3	43,3	43,6	41,8	41,9	42,4	42,5	157,05	75,5	42,583	3688,063
4	41,4	41,2	42,2	41,8	42,9	42,8	151,6	74,43	42,05	3605,232
5	43,5	43,2	42,8	43	44,7	44,5	154,15	74,06	43,616	3534,199
6	43,2	42,9	42	41,8	41,8	41,4	154,5	75,15	42,183	3662,584
7	42,8	42,6	42,4	42	41	40,9	154,05	74,89	41,95	3672,229

RELACIÓN A/C 0,6 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	43,6	43,7	43	43,2	44	44,2	155,19	75,21	43,616	3558,044
2	41,8	42	41,3	41,7	42,3	42	153,98	75,13	41,85	3679,331
3	39,5	39,2	40,2	40,7	39,5	39,2	144,27	75,07	39,716	3632,480
4	43,4	43,6	43	43,2	43,6	43,3	153,29	75,16	43,35	3536,101
5	42,9	43,2	43,2	43,4	43,4	43,6	158,76	74,58	43,283	3667,925
6	44,1	44,3	44,6	44	44,8	44,6	156,11	75,19	44,4	3515,991
7	43,9	43,6	44,2	44,1	43,8	43,5	159,28	74,82	43,85	3632,383

RELACIÓN A/C 0,7 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	46,6	46,1	46,2	46,6	46,6	46,4	155,28	74,56	46,416	3345,350
2	47,4	47,6	47,8	47,8	47,9	47,8	156,21	75,26	47,716	3273,699
3	47,1	47,3	47,6	47,4	47,3	47,2	149,09	74,03	47,316	3150,898
4	48,4	48	48,3	48,4	48,5	48,1	154,39	75,29	48,283	3197,584
5	45,7	46,1	46,6	46,9	46,1	46,5	153,56	75,47	46,316	3315,437
6	47,3	47,6	46,7	46,9	47,8	47,4	149,11	74,41	47,283	3153,542
7	44,6	44,9	44,7	44,3	43,3	43,7	139,93	76,08	44,25	3162,260

- DÍA 60 DE CURADO:

RELACIÓN A/C 0,5 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	41,3	41	41,1	41,2	40,5	40,4	150,17	74,63	40,916	3670,143
2	41	40,9	41,4	41,4	41,6	41,8	153,66	74,82	41,35	3716,082
3	40,8	41,2	40,3	40,6	41,3	41	150,07	73,8	40,866	3672,186
4	43,2	42,8	43,6	43,7	43,6	43,1	154,45	75,27	43,333	3564,231
5	40,6	40,9	41,9	41,5	41,7	42	153,6	74,33	41,433	3707,160
6	45	44,7	44,7	44,3	44,5	44,4	157,27	75,1	44,6	3526,233
7	42,9	42,9	43,4	43,2	42	42,3	155,82	75,2	42,783	3642,072

RELACIÓN A/C 0,6 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	41,3	41	41,3	41,5	41,1	41,6	152,56	75	41,3	3693,947
2	42,8	42,6	42,4	42	42,3	42,5	154,55	74,71	42,433	3642,184
3	43,6	43,2	43,6	43,3	43,7	43,6	156,36	74,13	43,5	3594,483
4	41,4	41,3	41,3	41,8	41,5	41,8	152,69	74,68	41,516	3677,800
5	43,4	43,3	44,3	42,8	42,5	42,8	151,69	75,22	43,183	3512,698
6	42,2	42,1	42,5	42	42,4	42,5	154,1	75	42,283	3644,462
7	41	41,2	41,7	41,4	41,5	41,4	151,09	74,52	41,366	3652,458

RELACIÓN A/C 0,6 (VPU)										
PROBETA	A [μ s]		B [μ s]		C [μ s]		LONGITUD [mm]	DIAMETRO [mm]	Prom. Tiempo [μ s]	VPU [m/s]
1	46,5	46,3	45,8	46,1	46,2	46,6	150,22	75,38	46,25	3248,000
2	50	49,8	49,8	50	49,1	49	157,75	75,71	49,616	3179,375
3	46,5	46,1	45,4	45,6	44,9	44,7	153,22	75	45,533	3365,007
4	46,1	46,2	46,4	46,8	46,8	46,9	154,45	75,04	46,533	3319,126
5	45,4	45,5	46	46,4	46,6	46,6	153,62	75,1	46,083	3333,526
6	45,9	46	46,7	46,9	46,8	48,5	153,46	75,15	46,8	3279,060
7	47,2	46,9	46,8	46,9	47,1	47,2	155,9	75	47,016	3315,845

ANEXO E. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los datos que se obtuvieron en este ensayo fueron los de Resistencia última (kg), los cuales fueron divididos por el área de aplicación de la carga, con el fin de obtener el esfuerzo (Kg/cm²). Esta área fue determinada mediante la ecuación 6.

$$A = \pi * r^2 \quad (6)$$

Dónde:

- A = área de aplicación de la carga.
- r = radio de la probeta (Diámetro promedio de las probetas analizadas en cada día para las respectivas relaciones agua/cemento).

A continuación se presentan los datos obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para los diferentes días de curado.

- DÍA 7 DE CURADO:

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,5			
RESISTENCIA ÚLTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm ²]	ÚLTIMO [MPA]	ÁREA [cm ²]
5000	112,877	11,069	44,296
6200	139,967	13,726	44,296
6400	144,482	14,169	44,296
5500	124,164	12,176	44,296

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,6			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
5400	122,560	12,019	44,06
5700	129,369	12,687	44,06
5400	122,560	12,019	44,06
5100	115,751	11,351	44,06

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,7			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
2000	45,150	4,427	44,296
1800	40,635	3,985	44,296
2500	56,438	5,534	44,296
2700	60,953	5,977	44,296

- DÍA 14 DE CURADO:

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,5			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
6400	144,482	14,169	44,296
7500	169,315	16,604	44,296
7300	164,800	16,161	44,296
7200	162,542	15,940	44,296

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,6			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
6700	151,659	14,873	44,178
6400	144,868	14,207	44,178
6200	140,341	13,763	44,178
6600	149,395	14,651	44,178

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,7			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
3300	74,797	7,335	44,119
3200	72,531	7,113	44,119
3500	79,331	7,779	44,119
3100	70,264	6,890	44,119

- DÍA 28 DE CURADO:

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,5			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
7700	175,839	17,244	43,79
8300	189,541	18,588	43,79
8100	184,973	18,140	43,79
8000	182,690	17,916	43,79

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,6			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
7200	163,543	16,038	44,025
6900	156,729	15,370	44,025
7100	161,272	15,815	44,025
7100	161,272	15,815	44,025

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,7			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
3900	88,586	8,687	44,025
4000	90,857	8,910	44,025
3800	86,314	8,464	44,025
4000	90,857	8,910	44,025

- DÍA 45 DE CURADO:

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,5			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
8600	194,874	19,111	44,131
8500	192,608	18,889	44,131
8800	199,406	19,556	44,131
8600	194,874	19,111	44,131

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,6			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
7600	171,937	16,861	44,202
7400	167,413	16,418	44,202
7500	169,675	16,640	44,202
7800	176,462	17,305	44,202

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,7			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
4500	101,832	9,986	44,19
4200	95,044	9,321	44,19
4000	90,518	8,877	44,19
4400	99,570	9,764	44,19

- DÍA 60 DE CURADO:

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,5			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
9800	223,433	21,912	43,861
10200	232,552	22,806	43,861
8400	191,514	18,781	43,861
7600	173,274	16,993	43,861

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,6			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
7900	180,020	17,654	43,884
8200	186,856	18,324	43,884
8100	184,577	18,101	43,884
8000	182,298	17,878	43,884

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA RUPTURA A/C 0,7			
RESISTENCIA ULTIMA [kg]	ESFUERZO [Kg/cm²]	ULTIMO [MPA]	AREA [cm²]
5000	112,607	11,043	44,402
4900	110,355	10,822	44,402
5300	119,363	11,706	44,402
5200	117,111	11,485	44,402