

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETOS A  
PARTIR DE MEDIDAS DE VPU POR EL MÉTODO SEMIDIRECTO.

NELSON ENRIQUE PÉREZ ARIAS  
DIANA ORFELINA RODRÍGUEZ NOVA

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

2013

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETOS A  
PARTIR DE MEDIDAS DE VPU POR EL MÉTODO SEMIDIRECTO.

NELSON ENRIQUE PÉREZ ARIAS  
DIANA ORFELINA RODRÍGUEZ NOVA

Trabajo de grado realizado para optar al título de ingeniero(a) metalúrgico(a)

DIRECTORA:  
MsC. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

CODIRECTOR:  
MsC. JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ

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

2013

## **AGRADECIMIENTOS**

Especialmente queremos agradecer a Dios por ser nuestro guía y fortaleza para cumplir con esta etapa de nuestras vidas.

A nuestra directora de proyecto, la Ingeniera Luz Amparo Quintero Ortiz, por su apoyo, confianza y entrega durante el desarrollo de esta investigación.

A nuestro codirector, el ingeniero Julián Orlando Herrera Ortiz, por su confianza, apoyo, disposición cuando más lo requerimos y por compartir su conocimiento, el cual fue esencial para el éxito del presente proyecto de investigación.

A nuestro querido profesor, el ingeniero Custodio Vásquez Quintero, por su amistad, apoyo y orientación.

A Jairo “la mechuda” por su aporte técnico y colaboración permanente durante la realización de este proyecto.

A nuestros calificadores, los ingenieros Álvaro Viviescas y Carlos Ruiz, por sus observaciones las cuales contribuyeron al mejoramiento del proyecto.

A nuestras familias y amigos por su incondicional apoyo, amor y por creer en nosotros, también aquellas personas que de cierta forma contribuyeron en la realización de este proyecto de grado, solamente queda por decir mil y mil gracias.

## DEDICATORIA

*Primero que todo, a Dios por darme la salud, fortaleza y por iluminar mi camino para culminar esta etapa importante de mi vida.*

*A mi madre, Ruth Janneth por su inigualable amor, dedicación, ayuda, y por enseñarme que de la mano de Dios todo es posible.*

*A mi padre, Hipólito por su esfuerzo, ejemplo y consejos pues han hecho de mí una persona soñadora y luchadora para conseguir lo que quiero.*

*A mis hermanas, Leidy Johanna, Sara Marcela y Sonía Janneth, por ser mis ejemplos de superación.*

*A mis amigos y amigas por su compañía y amistad durante toda mi carrera, por brindarme tiempos de esperanza e incondicional apoyo, en los momentos más difíciles de mi vida.*

*A mi novio Mario Fernando, por su amor infinito, su compañía, su confianza y por ser mi fuente de felicidad.*

*Diana Orfelina Rodríguez Nova*

## DEDICATORIA

*Este logro va dedicado a todas esas personas que estuvieron allí presentes, ya sea con sus consejos, palabras de aliento, ánimos o cualquier forma de llevar a desarrollar este proyecto de investigación y capítulo en mi vida.*

*A Dios por permitirme estar aquí, estudiando esta ingeniería y llevar a cabo paso a paso, con todos los desafíos presentes en el camino para cumplir con esta etapa de mi vida.*

*A mi familia, mis padres, mi hermana Andrea, por siempre apoyarme, durante el transcurso de mi vida universitaria, siempre siendo sus valiosos consejos y enseñanzas, una razón para seguir el día a día, madurando como persona y creciendo intelectualmente como profesional, tan solo su existencia, mi motor para seguir adelante.*

*A todos mis amigos, la junta "ASOÑOME", Marly, Andrés, Diana, Jenny, Jackeline, Jhoanna, Harrison, Oscar, Ana milena, Sofía, Jenny mantilla, Evelid, Heilyn, Adriana, y todas esas personas que estuvieron presentes, les doy gracias de todo corazón, por compartir conmigo esa buena vibra, entre charlas, abrazos, risas, en los buenos y malos momentos, porque sin ellos no hubiera llegado a ser el poquito de mejor profesional como persona de lo que soy ahora.*

*Nelson Enrique Pérez Arias*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO .....	18
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. ....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	21
2.1 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETOS.....	21
2.1.1 Velocidad de pulso leído por el método directo .....	22
2.1.2 Velocidad de pulso leído por el método semidirecto.....	22
2.1.3 Comparación entre los métodos de lectura de VPU .....	23
2.1.4 Otros factores que afectan la medición de VPU en concreto.....	24
2.2.1 Contenido y forma del agregado.....	25
2.2.2 Relación agua/cemento .....	25
2.2.3 Edad del concreto .....	25
2.2.4 Contacto de los palpadores y acoplante .....	25
2.2.5 Longitud de trayectoria .....	26
2.2.6 Condiciones de curado .....	26
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	27
3.1 REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO. ....	28
3.2 CAPACITACIÓN Y MANEJO DE EQUIPOS.....	28
3.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO. ....	28
3.3.1 Caracterización de las materias primas .....	28
3.3.1.1 Agregado fino y grueso .....	29
3.3.1.2 Cemento .....	29
3.3.1.3 Agua.....	30
3.3.2 Diseño de mezcla .....	30
3.3.3 Elaboración de las probetas.....	31

3.4 REALIZACIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	32
3.4.1 Ensayo de inspección visual .....	33
3.4.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico .....	34
3.4.3. Ensayo de resistencia a la compresión.....	36
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
3.6 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	37
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	38
4.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO. ....	38
4.1.1 Caracterización de las materias primas .....	38
4.1.2 Diseño de mezcla .....	40
4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	40
4.2.1 Ensayo de inspección visual .....	40
4.2.1.1 Estado superficial de las muestras .....	41
4.2.1.2 Dimensiones .....	41
4.2.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) .....	42
4.2.2.1 Mediciones de VPU por el método directo en especímenes cilíndricos de concreto .....	42
4.2.2.2 Mediciones de VPU por el método directo en espécimen de 30x30x25 cm <sup>3</sup> de concreto .....	44
4.2.2.3 Mediciones de VPU por el método semidirecto en espécimen de 30x30x25 cm <sup>3</sup> de concreto .....	48
4.2.3 Resistencia a la compresión .....	53
4.2 RELACIÓN ENTRE LA VPU DIRECTO (Vd) Y LA VPU SEMIDIRECTO (Vs).56	
4.3 RELACIÓN ENTRE LA VPU DIRECTA Y Fc.....	58
4.4 RELACION ENTRE LA VPU SEMIDIRECTA Y Fc. ....	59
5. CONCLUSIONES .....	62
6. RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXOS.....	70

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de control de calidad del agua .....	30
Tabla 2. Parámetros de trabajo para mediciones de VPU .....	34
Tabla 3. Caracterización del agregado fino y agregado grueso usado en la preparación de la mezcla .....	38
Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado fino .....	39
Tabla 5. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto .....	40
Tabla 6. Diseño de mezcla para 28 probetas cilíndricas y 4 probetas de 30x30x25 cm <sup>3</sup> .....	40
Tabla 7. Registros de VPU por el método directo para especímenes cilíndricos ..	42
Tabla 8. Registros de VPU por el método directo en espécimen de 30x30x25 cm <sup>3</sup> .....	46
Tabla 9. Mediciones de VPU por el método semidirecto-distancia de separación constante entre palpadores .....	49
Tabla 10. Mediciones de VPU por el método semidirecto - moviendo el palpador receptor .....	51
Tabla 11. Resistencia a la compresión promedio de los especímenes cilíndricos de concreto .....	53
Tabla 12. Resultados obtenidos de Fc y VPU semidirecto en especímenes de 30x30x25 cm <sup>3</sup> .....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Métodos de transmisión por la técnica de VPU .....	22
Figura 2. Flujograma del procedimiento seguido en esta investigación.....	27
Figura 3. Proceso de elaboración de probetas de concreto.....	33
Figura 4. Mediciones de VPU mediante el método directo. ....	35
Figura 5. Toma de mediciones de VPU mediante el método semidirecto.....	36
Figura 6. Defectos presentes en los especímenes de concreto.....	41
Figura 7. Gráfica de la VPU leído por el método directo vs tiempo de curado.....	44
Figura 8. Denominación de las caras y arreglo de los palpadores.....	45
Figura 9. Gráfica de VPU leído por el método directo vs tiempo de curado .....	47
Figura 10. Arreglo de los palpadores para toma lecturas por el método semidirecto .....	48
Figura 11. Gráfica de la VPU leído por el método semidirecto a distancia constante Vs tiempo de curado .....	50
Figura 12. Gráfica de VPU semidirecto al variar la distancia entre palpadores vs tiempo .....	52
Figura 13. Gráfica de resistencia a la compresión en función del tiempo de curado .....	54
Figura 14. Formas de falla presentadas en los especímenes ensayados .....	56
Figura 15. Modelos ajustados de la VPU directo vs la VPU semidirecto. ....	57
Figura 16. Modelo ajustado que correlaciona la resistencia a la compresión con la VPU por el método directo .....	59
Figura 17. Modelos obtenidos de Fc vs VPU semidirecta.....	61

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Cálculos y diseño de mezcla siguiendo el método ACI .....	70
Anexo B. Tabla de datos de la VPU leída por el método directo en especímenes cilíndricos de concreto .....	73
Anexo C. Tabla de datos de la VPU leído por el método directo en espécimen de 30x30x25 cm <sup>3</sup> , evaluando superficies A-C y B-D.....	74
Anexo D. Tabla de datos de la VPU leído por el método semidirecto a distancia constante entre palpadores. ....	76
Anexo E. Tabla de datos de la VPU leído por el método semidirecto variando la distancia entre palpadores. Evaluando superficies A-B y C-D.....	77
Anexo F. Tabla de datos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. ....	79
Anexo G. Tabla de datos de VPU semidirecto a distancia variable, en especímenes de 30x30x25 cm <sup>3</sup> después de 56 días de curado .....	79
Anexo H. Tabla de datos de VPU semidirecto a distancia constante, en especímenes de 30x30x25 cm <sup>3</sup> después de 56 días de curado .....	80
Anexo I. Tabla de datos de VPU directo en especímenes de 30x30x25 cm <sup>3</sup> después de 56 días de curado.....	80

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CONCRETOS A PARTIR DE MEDIDAS DE VPU POR EL MÉTODO SEMIDIRECTO.\*

**AUTORES:** RODRÍGUEZ NOVA, Diana Orfelina. PÉREZ ARIAS, Nelson Enrique. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concreto, Velocidad de pulso ultrasónico (VPU), VPU por transmisión directa y transmisión semidirecta, Resistencia a la compresión.

### RESUMEN:

Actualmente se ha venido implementado el uso de ensayos prácticos, para llevar a cabo el diagnóstico de calidad e integridad física de estructuras de concreto durante su construcción y tiempo en servicio, siendo positivo el uso de los ensayos no destructivos para realizar dicha evaluación, no afectando la apariencia y desempeño del elemento estructural.

El propósito de este trabajo fue contribuir en la evaluación no destructiva de estructuras de concreto por velocidad de pulso ultrasónico (VPU), empleando el método directo y semidirecto. Aunque el método directo ofrece mayor precisión en los resultados obtenidos, su aplicación es más ajustada a situaciones de laboratorio que a condiciones in-situ, pues es necesario la accesibilidad a dos caras opuestas. Por tal razón se aplicaría el método semidirecto, aunque ha sido menos estudiado que el directo, permite la evaluación en situaciones donde sólo se tiene acceso a caras adyacentes, siendo ésta una condición bastante frecuente en las obras civiles. En el presente trabajo se evaluaron muestras de concreto sin refuerzo, 24 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud y una muestra patrón de 30x30x25 cm<sup>3</sup> con relación agua/cemento de 0.5 a diferentes tiempos de curado 3, 5, 7, 14, 28 y 56 días, a partir de medidas de VPU por los métodos directo y semidirecto. Se relacionó la VPU directa con la VPU semidirecta mediante un modelo de tipo lineal, dado por la siguiente ecuación,  $V_d = (0,95237 * V_s + 20,0587)$ . Además estos resultados se relacionaron con los obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión, para poder estimar la resistencia del material a diferentes tiempos de curado, a partir de medidas de VPU directa y semidirecta, mediante modelos exponenciales dados por las siguientes expresiones matemáticas  $F_c = \exp(0,00186677 * V_d - 3,956)$  y  $F_c = \exp(14,926 - 46533,5/V_s)$  respectivamente.

---

\*proyecto de grado.

\*\*facultad de ingeniería fisicoquímica. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Directora: MsC. Luz Amparo Quintero. Codirector: MsC. Julián Orlando Herrera Ortiz.

## ABSTRACT

**TITLE:** ESTIMATING OF COMPRESSION STRENGTH OF CONCRETE'S SAMPLES FROM MEASURES OF VPU BY THE METHOD SEMIDIRECT.

**AUTHORS:** RODRÍGUEZ NOVA, Diana Orfelina. PÉREZ ARIAS, Nelson Enrique. \*\*

**KEY WORDS:** Concrete, ultrasonic pulse velocity (VPU), VPU by Transmission Direct and Semi-Direct Nondestructive Testing, Compressive Strength.

### DESCRIPTION:

Currently it has been implemented using practical tests to perform diagnostics of quality and physical integrity of concrete structures during construction and time in service, being positive to use nondestructive testing to conduct that assessment, not affecting the appearance and performance of the structural element.

The purpose of this study was to contribute to the nondestructive evaluation of concrete structures by ultrasonic pulse velocity (VPU), using the direct and semi-direct method. Although the direct method provides greater accuracy in the results, their application is more adjusted to laboratory situations than in-situ conditions, it is necessary accessibility to two opposite faces. For that reason apply semidirect method, although it has been less studied than direct, enables the assessment in situations where you only have access to adjacent faces, being this a fairly common condition in civil works. In this paper we evaluated unreinforced concrete specimens, 24 specimens cylindrical 10 cm diameter and 20 cm in length and a standard sample of 30x30x25 cm<sup>3</sup> water / cement 0.5 at different curing times 3, 5, 7, 14, 28 and 56 days from VPU measures for direct and semi-direct method. Was related the VPU direct to the VPU semi-direct by linear model, given by the following equation,  $V_d = (V_s - 0.95237 * 20.0587)$ . Furthermore these results were related to data obtained from testing compressive strength, in order to estimate the strength of the material at different curing times, from on measurements of VPU direct and semi-direct by exponential models given by the following mathematical expressions  $F_c = \exp(0.00186677 * V_d - 3, 956)$  and  $F_c = \exp(14.926 - 46533.5 / V_s)$  respectively.

---

\* Graduated Project

\*\*Faculty of physic-chemical Engineerings, School of Metallurgical Engineering and Materials Science, MSc Director Luz Amparo Ortiz Quintero, Co-directo MsC Orlando Herrera Julián Ortiz.

## INTRODUCCIÓN

Grandes cantidades de material se requieren para construcciones de casas, túneles, puentes, edificios y otras infraestructuras de ingeniería, sin embargo existe un material que se ha destacado entre ellos, y con el paso del tiempo ha venido revolucionando el mundo, aportando innovación ilimitada en el diseño de las edificaciones. El concreto es ampliamente usado en este tipo de obras civiles, y sin duda ha venido dejando huella en importantes obras de ingeniería, debido a su excelente resistencia al agua, durabilidad y otras propiedades ingenieriles, además de su precio asequible. No obstante, durante su vida en servicio, puede sufrir alteraciones, impidiendo su buen desempeño, por ende es importante analizar y evaluar la estructura del concreto para obtener información detallada de sus propiedades, y así garantizar un buen funcionamiento del mismo.

El método por velocidad de pulso ultrasónico es un ensayo no destructivo, que nos permite mediante ondas mecánicas atravesar el material sin causar daño alguno, a partir del uso de un equipo de ultrasonido, permitiendo evaluar la calidad del concreto, y estimar la resistencia mecánica del material, a través de diversos métodos como el método directo, semidirecto e indirecto. Teniendo en cuenta los índices de demanda del concreto a nivel mundial, vale la pena optimizar los métodos de evaluación a los que es sometido el concreto.

Por lo tanto el propósito del presente trabajo es contribuir en la evaluación no destructiva de estructuras de concreto por VPU, empleando el método semidirecto, el cual ha sido menos estudiado que el método directo. Aunque el método directo ofrece mayor precisión en los resultados obtenidos, su aplicación es más ajustada a situaciones de laboratorio que a condiciones in-situ, pues es necesario la accesibilidad a dos caras opuestas. Por tal razón se aplicaría el método semidirecto, el cual permite la evaluación en situaciones donde sólo se tiene acceso a caras adyacentes, siendo ésta una condición bastante frecuente en las obras civiles.

# 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Actualmente la demanda por la construcción de estructuras de concretos ha venido incrementándose paulatinamente, de tal forma, que este material ha venido capturando la atención de muchos expertos, a tal fin, de promover un estudio más detallado para llevar a cabo su fabricación, y control de su integridad estructural. Son varias las investigaciones que se han adelantado en este campo, dando a conocer numerosos métodos de ensayo que permiten conocer la calidad y durabilidad del concreto<sup>[8][9]</sup>, sin perjudicar el rendimiento de la estructura.

El método de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es una técnica no destructiva, utilizada para la evaluación y ensayo de distintos materiales, siendo de gran importancia para conocer su interior. Además, es muy usado para estimar la resistencia mecánica del concreto<sup>[9][29]</sup>, a partir de tomas realizadas por transmisión directa de las ondas sonoras en el material (método directo), controlando así la calidad de la estructura.

Las medidas de VPU leídas sobre una muestra de concreto se pueden relacionar con los datos de resistencia a la compresión a través de expresiones matemáticas, permitiendo obtener resultados confiables de la resistencia a la compresión, a partir de lecturas ultrasónicas in situ, sin la necesidad de realizar ensayos destructivos como la extracción de núcleos, lo cual afecta la estructura en servicio, debilitándola.

Las investigaciones has mostrado que el método de transmisión directa es el más adecuado y satisfactorio, para la evaluación de concreto, dado a su facilidad de aplicación y a la precisión que ofrece<sup>[34][36]</sup>. Sin embargo, para su aplicación

siempre se necesita acceso a dos caras opuestas, lo cual no siempre es posible encontrar en inspección de estructuras de concreto tales como construcciones, edificaciones, viviendas, puentes, etc.

Por lo anterior, es necesario recurrir a otra forma de medición de la VPU, como es el caso del método semidirecto, el cual permite aplicar la técnica in situ con acceso a solo dos caras adyacentes. Sin embargo, no se dispone de bibliografía adecuada, y de normas técnicas que regulen su aplicación.

Debido a la situación expuesta anteriormente, la presente investigación pretende estimar la resistencia a la compresión de muestras de concreto sin refuerzo a partir de medidas de VPU por el método semidirecto.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estimar la resistencia a la compresión de concretos a partir de medidas de VPU por el método semidirecto.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el efecto del tiempo de curado en muestras de concreto sin refuerzo, con relación  $A/C=0.5$ , sobre las medidas de VPU por los métodos directo y semidirecto.
- Establecer relación entre las medidas de VPU tomadas por los métodos directo y semidirecto.
- Relacionar la resistencia a la compresión con las medidas de VPU, para el concreto en estudio, durante el tiempo de curado.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETOS.

La técnica se basa en el envío de ondas longitudinales producidas por un palpador (emisor) acoplado con la superficie del espécimen de concreto, propagándose a través del mismo, llegando finalmente a un palpador receptor, que recibe las señales emitidas para obtener como resultado el tiempo de vuelo de la onda de pulso; así mismo se debe conocer la distancia de trayectoria de la onda<sup>[29]</sup>, para obtener la medición de velocidad de pulso ultrasónico, mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{l}{T}$$

Donde:

V= velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

L= longitud o distancia de la onda de pulso (palpador emisor y receptor).

T= tiempo de vuelo.

El equipo de VPU funciona con pulsos de onda longitudinales de baja frecuencia que normalmente son de 20 KHz a 100 KHz para ensayos en concreto, generados por dos palpadores electro-acústicos que actúan como emisor (transforma la energía eléctrica en energía mecánica) y un receptor (transforma la energía mecánica en eléctrica).

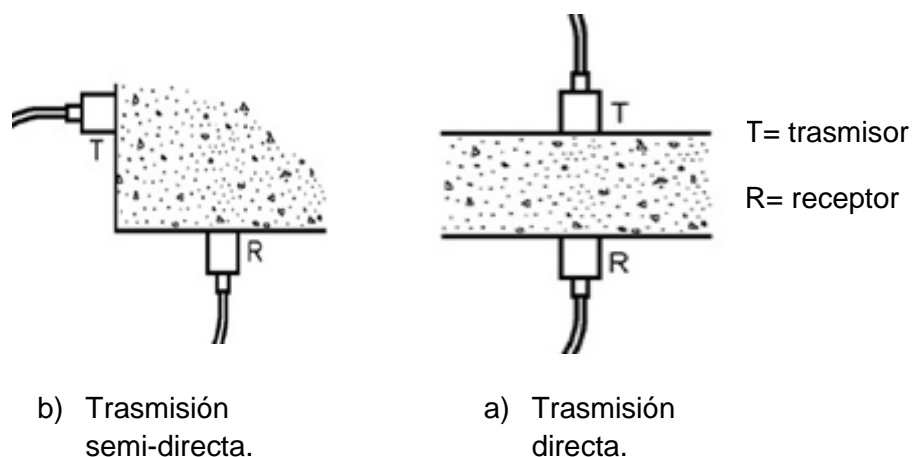
Existen tres tipos de arreglo de los palpadores; el método de transmisión directo, semidirecto e indirecto<sup>[29]</sup>. Para realizar las mediciones respectivas de VPU en la estructura de concreto, de acuerdo a la geometría y acceso de las zonas libres, siendo los dos primeros los utilizados en el presente proyecto; ver figura 1.

**2.1.1 Velocidad de pulso leído por el método directo.** Es el más utilizado por el máximo de energía que es transmitido, entre los dos palpadores (emisor y receptor), los cuales están ubicados en caras opuestas del espécimen de concreto, permitiendo obtener una mejor sensibilidad en los valores de medición<sup>[29]</sup>.

**2.1.2 Velocidad de pulso leído por el método semidirecto.** Se caracteriza por una ubicación de los palpadores o transductores a 90° (emisor del receptor) sobre la estructura de concreto; la distancia entre palpadores se mide mediante el teorema de Pitágoras, trazando un camino de trayectoria diagonal, entre las dos caras adyacentes del espécimen de concreto<sup>[9][23][29]</sup>.

Tiene una sensibilidad intermedia respecto al método tradicional “directo”, debido a que, no toda la energía emitida, es totalmente recibida, sin embargo, se pueden obtener valores satisfactorios, siempre y cuando se mantenga un control sobre la mayoría de factores que influyen, sobre las propiedades internas del concreto y las condiciones del ensayo.

**Figura 1.** Métodos de trasmisión por la técnica de VPU.



**Fuente:** Norma NTC 4325<sup>[23]</sup>.

**2.1.3 Comparación entre los métodos de lectura de VPU.** Algunas investigaciones realizadas acerca de los métodos de transmisión P. Turgut y otros<sup>[36]</sup>, estudiaron el efecto del uso de los diversos arreglos de VPU directo, semidirecto e indirecto, sobre 30 bloques de concreto reforzado de dimensiones de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, con diez diferentes relaciones agua/cemento, curados en agua, hallando una relación mediante sus respectivas mediciones de velocidad de pulso a través de los distintos arreglos y resultados de resistencia a la compresión de núcleos cilíndricos extraídos directamente de cada espécimen. Adicionalmente estos investigadores encontraron que para el método semidirecto la velocidad de pulso disminuye respecto al método directo un 4%. Además concluyeron que el método semidirecto tiene un grado sensibilidad satisfactorio para realizar evaluaciones de estructuras de concreto y detectar cambios en sus propiedades internas. Finalmente propusieron una expresión de tipo lineal donde relacionan la VPU leída por el método directo (Vd) con la leída por el método semidirecto (Vs),  $Vd = 0.8274Vs + 931.14$ , con un R cuadrado de 0.93, mostrando una gran correlación entre los resultados obtenidos, siendo posible realizar una conversión de datos de un método a otro por medio de la ecuación mencionada.

En esta investigación también se determinó que la dirección de fundición del concreto influía en la presencia de un mayor contenido de agregado y compactación del material por efectos de la gravedad y/o segregación del concreto, disminuyendo la presencia de porosidades del concreto en la zonas inferiores, permitiendo que el pulso tarde menos tiempo en atravesar el espécimen, aumentando la velocidad de pulso.

Además estimaron la resistencia a la compresión convencional, relacionándolo con el número de rebote (rebound number) y las mediciones de VPU leídas por el método directo, encontrando una correlación de tipo lineal con un valor alto de R cuadrado.

Así mismo C. Chih-Hung y otros<sup>[6]</sup>, realizaron estudios de VPU mediante el método semidirecto en especímenes de  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ , utilizando una relación agua/cemento de 0.58, agregado fino y grueso con densidad aparente seca de 2.31 y 3.16 respectivamente. Las muestras fueron curadas en agua, obteniendo como resultado de resistencia a los 28 días, de 20.7 Mpa o  $211 \text{ kg/cm}^2$ .

Sobre las muestras fabricadas se realizaron mediciones de VPU por el método semidirecto, encontrando un aumento de la velocidad en los bordes del bloque de  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ , en comparación con las zonas intermedias o centrales del espécimen. Algunas zonas no presentaron este comportamiento debido probablemente a la heterogeneidad del concreto, presencia de grietas o falta de uniformidad de los compuestos de mezcla.

Estos investigadores resaltan la sensibilidad para detectar cambios en las propiedades internas del espécimen por el método de transmisión semidirecto respecto al método directo, que aunque no es tan preciso, permite cuantificar la heterogeneidad del material, obteniendo resultados de velocidad de pulso entre un rango 1600 a 5100 m/s.

Además estudiaron el efecto de cilindros de plástico de 5 cm y 15 cm, empotrados en dos especímenes, indicando que las mediciones de velocidad de pulso disminuyeron significativamente por la presencia de este tipo de material.

**2.1.4 Otros factores que afectan la medición de VPU en concreto.** V. Mohan Malotra y otros<sup>[29]</sup>, desarrollaron y recopilaron información de investigaciones relacionadas sobre estudios de VPU en concretos, bajo el uso de los distintos métodos de transmisión, indicando que para garantizar la relación y confiabilidad en el análisis de resultados; se debe mantener un control sobre los diversos factores que intervienen en el proceso de fabricación, curado y toma de datos del

concreto bajo prueba, los cuales son factores que influyen directamente e indirectamente.

**2.2.1 Contenido y forma del agregado.** Se indica que la velocidad de pulso se ve influenciada por el contenido de agregado, siendo en general la pasta o matriz de cemento la que se caracteriza por tener una menor velocidad de pulso que la del agregado contenido en el concreto, y por la forma del mismo se recomienda un agregado triturado, no redondeado, ni de gran tamaño.

**2.2.2 Relación agua/cemento.** Muestran que el efecto de la relación agua/cemento sobre la velocidad de pulso, es inversamente proporcional, indicando que a menor relación mayor velocidad de pulso y viceversa.

**2.2.3 Edad del concreto.** Expresan que se desarrolla un aumento de la velocidad de pulso rápido, durante el inicio del fraguado y curado, pero que medida que transcurre el tiempo tiende a comportarse de manera constante o asintótica, según la curva velocidad vs edad de la muestra de concreto.

**2.2.4 Contacto de los palpadores y acoplante.** Para transmitir y recibir el pulso, los palpadores deben estar en contacto total con la pieza de prueba con una presión constante, debido a que se pueden crear espacios de aire entre el palpador y la pieza, induciendo errores en los valores de medición, debido al cambio radical del medio.

El tipo y uso de acoplante influye sobre la toma de valores de VPU, siendo recomendable escoger acoplantes de gran calidad como por ejemplo grasa, vaselina, entre otros; aplicándose una película delgada y uniforme.

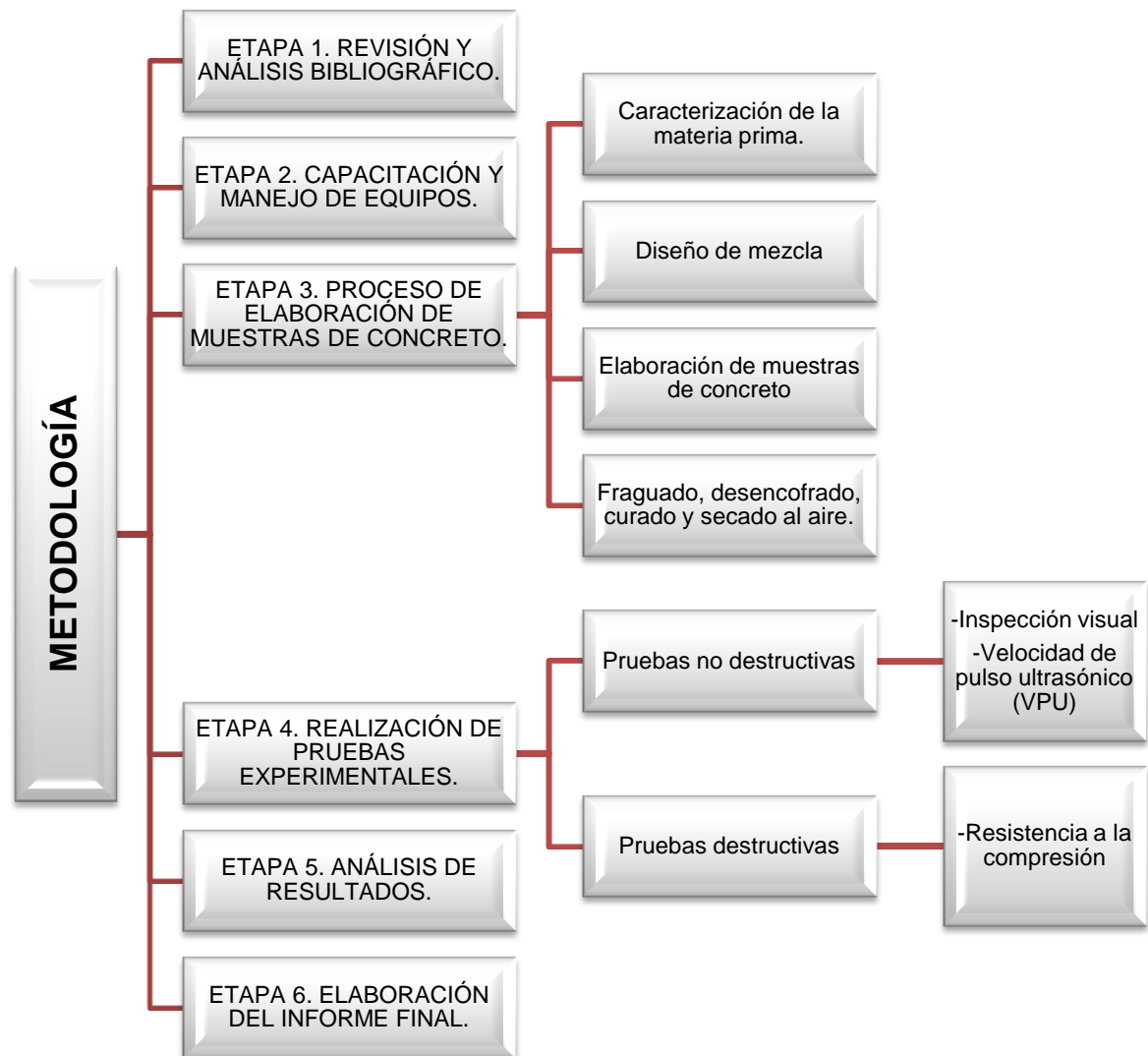
**2.2.5 Longitud de trayectoria.** Teóricamente, la longitud de la trayectoria no afecta de manera significativa la velocidad de pulso, sin embargo, se ha encontrado que a longitudes de trayectoria más pequeñas, se tienden a obtener valores variables y ligeramente altos de velocidad de pulso debido a la naturaleza no homogénea del concreto.

**2.2.6 Condiciones de curado.** La velocidad de pulso para un concreto saturado en agua es mayor, que la de un concreto expuesto a un ambiente aireado-seco, debido a que se excluye el compuesto que ayuda a favorecer las reacciones de hidratación del cemento para la formación de una mayor cantidad de productos de reacción que mejoran las propiedades del concreto y lo vuelven más compacto.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 2 se muestra un flujograma, el cual contempla las seis etapas desarrolladas en esta investigación. A continuación se presentan detalles de cada una de ellas.

**Figura 2.** Flujograma del procedimiento seguido en esta investigación.



**Fuente:** Los autores.

### **3.1 REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.**

Esta etapa se extendió durante todo el tiempo de la investigación. Se realizó una búsqueda, selección y a su vez un análisis de la información encontrada en artículos de investigación, proyectos de grado, handbook, normas técnicas existentes, base de datos e información de internet, referente a las generalidades del concreto, método de velocidad de pulso ultrasónico en concretos sin refuerzo y ensayos de resistencia a la compresión, esto con la finalidad de afianzar y adquirir conocimientos, para lograr un óptimo desempeño en la ejecución de la presente investigación.

### **3.2 CAPACITACIÓN Y MANEJO DE EQUIPOS.**

En esta etapa se recibieron instrucciones a cerca del funcionamiento, manejo y calibración del equipo de ultrasonido, marca **CNS Farnell** tipo **PUNDIT plus MODEL PC 1006**, llevándose a cabo el respectivo entrenamiento, además se realizó una capacitación para el manejo del equipo análogo de ensayos de compresión marca **AMSLER**.

### **3.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO.**

Para la ejecución de esta etapa se llevó a cabo la realización de varias actividades tales como, caracterización de las materias primas (agregados, cemento y agua), diseño de mezcla, elaboración de las probetas, fraguado y curado de las mismas. A continuación se especifican cada una de las actividades nombradas.

**3.3.1 Caracterización de las materias primas.** Para la fabricación de las muestras de concreto se emplearon los siguientes materiales: agregado fino, agregado grueso, cemento portland tipo I y agua potable. Los ensayos contemplados en esta etapa, se realizaron en los laboratorios de caracterización de materiales de Ingeniería Civil, ubicado en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón,

siguiendo la respectiva norma técnica NTC. A continuación se describe cada uno de las pruebas realizadas a los materiales:

**3.3.1.1 Agregado fino y grueso.** Para la preparación de la mezcla se utilizó arena como agregado fino y grava como agregado grueso. La caracterización de estos materiales consistió en determinar la masa unitaria en condición compactada y suelta, y el porcentaje de vacíos entre las partículas, bajo especificaciones de la norma técnica NTC 92<sup>[12]</sup>. Se calculó la densidad aparente y el porcentaje de absorción del agregado fino y del agregado grueso siguiendo las normas técnicas NTC 237<sup>[17]</sup> y NTC 176<sup>[15]</sup> respectivamente.


Adicionalmente se realizó un análisis granulométrico a los agregados, una vez lavado y secado el material, con la finalidad de conocer el módulo de finura del agregado fino, y el tamaño máximo del agregado grueso. Para el análisis de la arena fue necesario utilizar una serie de tamices N° 4, 8, 16, 30, 50 y 100, pesando el material retenido en cada uno de los tamices, para obtener el análisis granulométrico. Para el caso del agregado grueso se tamizó el material por los tamices  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y número 4, a fin de obtener su respectivo análisis. Concluido el análisis granulométrico se procedió a determinar las impurezas orgánicas en el agregado fino, siguiendo la norma NTC 127<sup>[14]</sup>. Los resultados obtenidos en esta actividad se presentan en el siguiente capítulo.

**3.3.1.2 Cemento.** El cemento utilizado en esta investigación fue cemento portland tipo I, el cual cumple con las especificaciones mecánicas, químicas y físicas, establecidas por las normas NTC 121<sup>[13]</sup> y NTC 321<sup>[18]</sup>.

Este material se caracterizó con la finalidad de conocer su densidad como lo indica la norma NTC 221<sup>[16]</sup>, la cual es fundamental para determinar el diseño de mezcla. La densidad obtenida para el cemento utilizado fue de 3030 Kg/m<sup>3</sup>.

**3.3.1.3 Agua.** El agua empleada para la elaboración de las muestras de concreto, es suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, la cual se verificó mediante un análisis de calidad del agua que no superara los límites permisibles de ácidos, cloruros, carbonatos, sulfatos, sales, aceites, sustancias orgánicas y otras sustancias que puedan afectar negativamente el concreto o su resistencia, como lo recomienda la norma NTC 3459<sup>[22]</sup>. Este análisis es presentado a continuación en la tabla 1.

**Tabla 1.** Análisis de control de calidad del agua.

No Aplica F CC 507-006 Rev.:0		CALIDAD FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCIÓN																		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA			AÑO:		2012													
PARAMETROS MES	Parámetros Físicoquímicos												Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL		
	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl <sub>2</sub> /L	Turbiedad UNT	Color Aparente Unidades Pt-Co	pH	Unidades de pH	Clor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO <sub>3</sub> /L	Dureza mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO <sub>4</sub> /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO <sub>3</sub> /L	Nitritos mg NO <sub>2</sub> /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales		% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli
Julio	93	0,87	1,08	6,4	7,42	0	0,08	50,4	75,3	3,3	23,1	N.D.	1,2	N.D.	186	0	100	0	100	0,58
Agosto	93	0,87	1,30	6,7	7,23	0	0,09	45,4	62,8	2,7	21,7	N.D.	1,4	N.D.	186	0	100	0	100	0,41
Septiembre	90	0,86	1,11	6,1	7,25	0	0,08	49,2	69,4	3,1	33,1	N.D.	1,2	N.D.	180	0	100	0	100	0,61
Octubre	93	0,88	1,24	6,9	7,09	0	0,08	43,5	66,2	2,7	26,4	N.D.	1,2	N.D.	186	0	100	0	100	0,98
Noviembre	90	0,90	1,15	6,7	7,25	0	0,08	47,2	66,7	2,6	25,0	N.D.	1,2	N.D.	180	0	100	0	100	0,61
<b>PROMEDIO</b>	<b>91</b>	<b>0,91</b>	<b>1,10</b>	<b>6,3</b>	<b>7,22</b>	<b>0</b>	<b>0,08</b>	<b>46,2</b>	<b>68,1</b>	<b>2,9</b>	<b>22,2</b>	<b>N.D.</b>	<b>1,3</b>	<b>N.D.</b>	<b>182</b>	<b>0,0</b>	<b>100</b>	<b>0,0</b>	<b>100</b>	<b>0,53</b>
<b>RES. 2115/07</b>	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/día	0	100	0	100	0 - 5
<b>Convenciones:</b>	mg/L: miligramos por litro    UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad    Unidades Pt-Co: Unidades de Platino Cobalto    IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua    ND: No Detectable																			
<b>Nota:</b>	El IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																			

**Fuente:** Acueducto Metropolitano de Bucaramanga<sup>[5]</sup>.

De acuerdo a la tabla 1 se puede observar que el agua utilizada en el mes de Noviembre cumple con los requerimientos fisicoquímicos establecidos por la norma NTC 3459<sup>[22]</sup>, presentando menos de un mg/L de cloro residual y un pH mayor a 7.

**3.3.2 Diseño de mezcla.** El diseño se planteó siguiendo el método ACI 211, para el cual se utilizó cada uno de los resultados obtenidos en las pruebas anteriores.

Se diseñó una mezcla con relación agua/cemento=0.5, para 28 probetas cilíndricas de 20x10 cm<sup>2</sup>, con un volumen total de 0.044 m<sup>3</sup> y 4 probetas de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, con un volumen total de 0.09 m<sup>3</sup>, cabe aclarar que el diseño se hizo con base a un metro cúbico de concreto. Los resultados obtenidos del diseño de mezcla se muestran en el capítulo 4.

**3.3.3 Elaboración de las probetas.** A partir del diseño de mezcla se llevó a cabo la elaboración de las muestras de concreto como lo indica la norma NTC 1377<sup>[20]</sup>. El procedimiento seguido se presenta a continuación: inicialmente se prepararon las herramientas necesarias de trabajo como: moldes previamente limpios y secos, martillo de cabeza de goma, varilla metálica de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud, ACPM, bandeja metálica, probeta de un litro, palas, baldes, palustre, balanza electrónica, regla, plastilina y brocha.

Posteriormente, se realizó la preparación de los cilindros, los cuales se les colocó un tapón de plastilina en el orificio de desencofrado, para luego aplicar grasa en las uniones para impedir filtraciones y ACPM en su interior, para evitar que la mezcla se uniera al molde, y así facilitar el desencofrado de las probetas. Esta misma actividad fue realizada en las probetas de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, excepto el tapón de plastilina, pues se trató de un molde desarmable.

Una vez listos los moldes, se procedió a preparar la mezcla, pesando cada uno de los materiales en una balanza electrónica de capacidad máxima de 22 Kg, marca **SHIMADZU**, tipo **BW22KH**. La preparación consistió en mezclar en un recipiente metálico, el cemento y la arena hasta que estuvieran completamente combinados, después se adicionó el agregado grueso, se mezcló a tal fin que estuviera distribuido uniformemente en la mezcla, y por último se agregó el agua, para continuar mezclando hasta que el concreto alcanzara una buena consistencia y homogeneidad. Concluida la mezcla, se realizó el llenado de los moldes en tres capas, se apisona cada capa con la varilla metálica, 25 veces para los cilindros y 50 veces para las probetas cúbicas. Después de que cada capa es apisonada, se

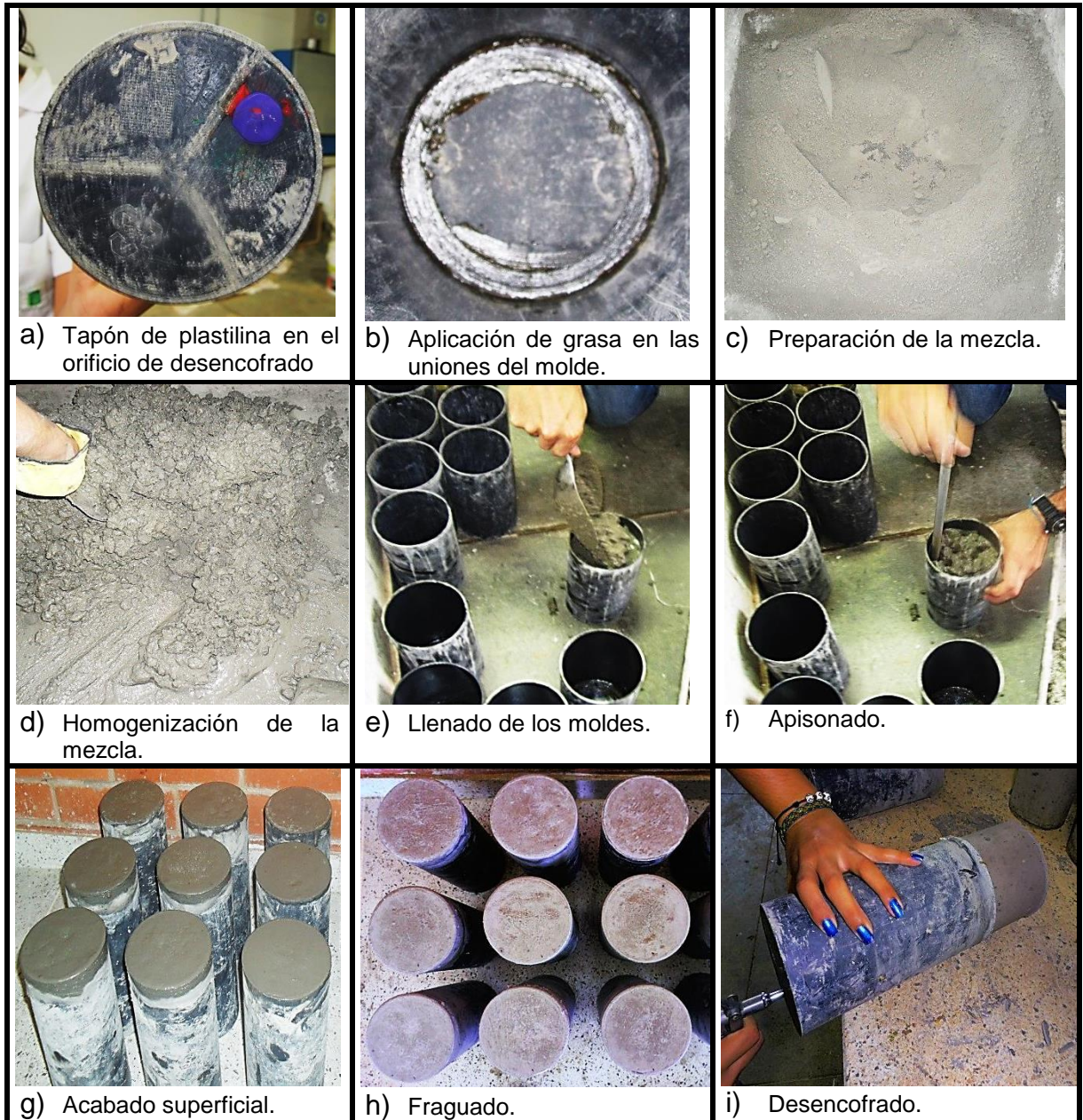
golpea de 10 a 15 veces la parte exterior del molde con un martillo de cabeza de goma, con el fin de cerrar los huecos dejados por el apisonado y sacar el aire atrapado dentro las capas de concreto. Para finalizar con el palustre se realizó un buen acabado superficial, obteniendo una superficie lisa y uniforme. En total se fabricaron 27 probetas cilíndricas, las cuales 24 fueron evaluadas. En cuanto a las probetas de  $30 \times 30 \times 25 \text{ cm}^3$ , se elaboraron 4 con la finalidad de seleccionar la de mejor acabado superficial, para realizar las mediciones de VPU. Este procedimiento se ilustra en la figura 3.

**3.3.4 fraguado y curado de las probetas.** Después de 24 horas de fraguado al aire libre y a temperatura ambiente, (véase figura 3h), se procedió a desencofrar las probetas cilíndricas de concreto (ver figura 3i) por medio de un compresor de aire, marca **BLACK & DECKER**. Por el contrario, los moldes de las probetas de  $30 \times 30 \times 25 \text{ cm}^3$  fueron desarmados, una vez finalizada esta actividad las probetas se dejaron curar al aire durante 56 días, pues este, es el tiempo máximo de ensayos realizados en esta investigación, cabe aclarar que las probetas se curan al aire para evitar la influencia del agua en las mediciones de VPU.

### **3.4 REALIZACIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES**

Es esta etapa de la investigación las muestras de concreto fueron evaluadas a 3, 5, 7, 14, 28 y 56 días de curado. Se emplearon 4 cilindros por día de curado, las cuales se les realizaron inspección visual, VPU y resistencia a la compresión. La probeta de  $30 \times 30 \times 25 \text{ cm}^3$ , se evaluó mediante inspección visual y mediciones de VPU por los métodos directo y semidirecto. Estas pruebas se realizaron con el propósito de conocer el estado superficial de las probetas, además el comportamiento físico, químico y mecánico del concreto, a continuación se describe lo realizado en cada una de las pruebas. Los resultados obtenidos en estas pruebas se presentan en el capítulo 4.

**Figura 3.** Proceso de elaboración de probetas de concreto.



**Fuente:** Los autores.

**3.4.1 Ensayo de inspección visual.** Mediante el ensayo visual directo se pudo evaluar la condición superficial de las muestras de concreto, detectando discontinuidades y/o defectos que afectaran su desempeño en las pruebas.

**3.4.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.** Antes de aplicar el método de ultrasonido, fue necesario llevar a cabo una preparación superficial de las caras sobre las cuales se ubicarían los palpadores, en el caso de los cilindros el desbaste fue realizado en las dos caras planas, es decir la tapa y el fondo, para la probeta de 30x30x25 cm<sup>3</sup> se prepararon las caras laterales. Esta preparación se hizo con una piedra esmeril hasta obtener una superficie plana y libre de rugosidades.

Finalizada la preparación superficial se midió el diámetro y longitud de los cilindros en su día de prueba, por medio de un calibrador digital marca **DISCOVER**, con lecturas de hasta dos cifras decimales. Posteriormente se conectaron los transductores de 54 KHz., en sus puertos correspondientes y se ajustaron los parámetros de trabajo necesarios para las mediciones de VPU, estos parámetros son los mostrados en la tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros de trabajo para mediciones de VPU.

CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS	
Voltaje	500 V
Unidades	Métricas
Modo del pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	Apagado
Frecuencia de repetición del pulso	10 pulsos/seg. (10/s)
Retardo del pulso	No se requiere. El pulso es continuo
TIEMPO DE TRÁNSITO	
Resolución	0.1 μs
Corrección	100%

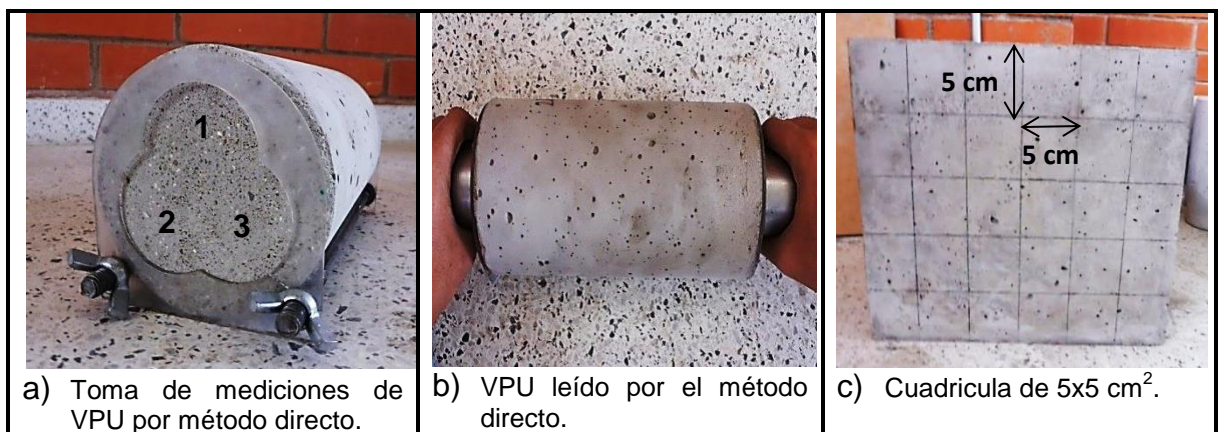
**Fuente:** Los autores.

Después se calibró el equipo de ultrasonido, para ello se puso en contacto cara a cara los palpadores impregnados de acoplante (vaselina blanca), el tiempo de tránsito medido, debe estar entre el siguiente rango 1.5-1.7 μs, si se logra, esto

indica que el equipo ha sido calibrado, de lo contrario se debe repetir el procedimiento hasta obtener uno de estos valores.

Concluido el ajuste y calibración del equipo se procedió a evaluar las probetas cilíndricas por día de curado. Se leyeron tiempos de tránsito en tres puntos diferentes de la cara del cilindro, como se indica en la figura 4(a). En cada punto se tomaron dos lecturas de tiempo de tránsito, los cuales fueron promediados y usados con la longitud para determinar la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Los tiempos de vuelo fueron obtenidos mediante transmisión directa, esta forma se puede observar en la figura 4(b).

**Figura 4.** Mediciones de VPU mediante el método directo.



**Fuente:** Los autores.

Para la toma de datos de VPU en la probeta de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, fue necesario dibujar una cuadrícula guía de 5x5 cm<sup>2</sup> sobre las caras laterales, obteniendo 6 columnas y 5 filas como se aprecia en la figura 4(c). En esta probeta se realizan mediciones tanto por transmisión directa como semidirecta, se toman dos lecturas de tiempo de vuelo por cuadrícula, para así posteriormente promediar y con la distancia de recorrido de la onda, obtener las medidas de VPU.

Las mediciones por transmisión semidirecta, se realizan de dos maneras: Distancia constante entre palpadores igual a 18.6 cm y moviendo el transductor receptor, según lo indicado en la bibliografía<sup>[6][36]</sup>. La figura 5 muestra el proceso seguido.

**3.4.3. Ensayo de resistencia a la compresión.** Después de obtener los valores de VPU por transmisión directa de cada una de las probetas cilíndricas estas fueron sometidas al ensayo de resistencia a la compresión, en la máquina marca **AMSLER**. El ensayo fue realizado a cuatro probetas por día de curado, la máquina indicaba el valor de carga aplicada a partir del cual se calculó la resistencia a la compresión de las muestras. Este ensayo fue realizado en las instalaciones del edificio Álvaro Beltrán de Ingeniería Civil, bajo criterios de la norma NTC 673<sup>[19]</sup>.

**Figura 5.** Toma de mediciones de VPU mediante el método semidirecto.



**Fuente:** Los autores.

### **3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se analizaron e interpretaron los resultados obtenidos de las pruebas mencionadas anteriormente a medida que estas se llevaron a cabo. Se establecieron relaciones entre los resultados obtenidos con el fin de evaluar la variable tiempo de curado sobre las mediciones de VPU.

### **3.6 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL**

Para concluir con esta investigación se redactó un informe final donde presenta los resultados obtenidos, su respectivo análisis, conclusiones y recomendaciones derivadas de las relaciones existentes entre las medidas de VPU, tiempo de curado y resistencia a la compresión.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas desarrolladas durante la fase experimental, y su respectivo análisis. Adicionalmente con estos resultados se establecen algunas relaciones y se evalúa el efecto del tiempo de curado sobre las mediciones de VPU.

### 4.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados fino y grueso, y el diseño de mezcla utilizado en esta investigación.

**4.1.1 Caracterización de las materias primas.** En la tabla 3 se presenta las características obtenidas de los agregados fino y grueso.

**Tabla 3.** Caracterización del agregado fino y agregado grueso usado en la preparación de la mezcla.

CARACTERÍSTICAS	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
Gravedad específica real	2.740	2.687
Gravedad específica aparente	2.538	2.642
Gravedad específica aparente S.S.S.	2.612	2.659
Peso unitario suelto (Kg/m <sup>3</sup> )	1393.43	1408.62
Peso unitario compactado (Kg/m <sup>3</sup> )	1606.22	1523.15
% absorción	2.90	0.63
Porcentaje de vacíos	38.51%	42.72%
Materia orgánica	1	-----

**Fuente:** Los autores.

Los resultados que se presentan en la tabla 3, fueron empleados para elaborar el diseño de mezcla (ver anexo A). Es importante resaltar que el contenido de materia orgánica obtenido en la arena se encuentra dentro de los lineamientos establecidos por la norma técnica NTC 127<sup>[14]</sup>, la cual indica que el color de la

solución sobrenadante no debe ser más oscuro que el color estándar de la placa orgánica No 3. En esta investigación y como se muestra en la tabla 3, el líquido mostró un color acorde a la placa orgánica No 1, confirmando que la arena no presenta materiales orgánicos perjudiciales por lo tanto puede ser usada en el concreto.

Otra característica fundamental para el diseño de mezcla es el módulo de finura de la arena. Para determinar esta característica fue necesario realizar un análisis granulométrico, este se describe en la tabla 4. El módulo de finura obtenido fue de 2.82, el cual se encuentra entre los valores solicitados por la ACI 211<sup>[1]</sup>, (módulo de finura entre 2.4 y 3.0).

**Tabla 4.** Análisis granulométrico del agregado fino.

AGREGADO FINO				
TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	%QUE PASA
4	0.4	0.04%	0.04%	99.6%
8	111.2	11.25%	11.29%	88.71%
16	210.8	21.33%	32.62%	67.38%
30	252.3	25.52%	58.14%	41.86%
50	265.3	26.84%	84.98%	15.02%
100	95.9	9.70%	94.68%	5.32%
Fondo	52.6	5.32%	100%	0%
<b>total</b>	<b>988.5</b>	<b>100%</b>	<b>Peso muestra</b>	<b>1000 g.</b>
Módulo de finura			<b>2.82</b>	

**Fuente:** Los autores.

En cuanto al agregado grueso se determinó el tamaño máximo a partir de un análisis granulométrico, el cual fue de  $\frac{3}{4}$ ", seguido mediante la norma técnica NTC 78<sup>[9]</sup>.

**4.1.2 Diseño de mezcla.** En las tablas 5 y 6, se indican las cantidades en masa de los diferentes materiales para un metro cúbico de concreto y para el diseño de los especímenes acordados en esta investigación.

**Tabla 5.** Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto.

CONSTITUYENTE	MASA (Kg)
Agua	202
Cemento	404
Agregado grueso	929.05
Agregado fino	823.56

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 6.** Diseño de mezcla para 28 probetas cilíndricas y 4 probetas de 30x30x25 cm<sup>3</sup>.

CONSTITUYENTE	MASA (Kg) 28 probetas cilíndricas	MASA (Kg) 4 probetas 30x30x25 cm <sup>3</sup>	MASA (Kg) total probetas
Agua	8.89	18.18	27.07
Cemento	17.77	36.35	54.12
Agregado grueso	40.88	83.61	124.49
Agregado fino	36.24	74.12	110.36

**Fuente:** Los autores.

## 4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

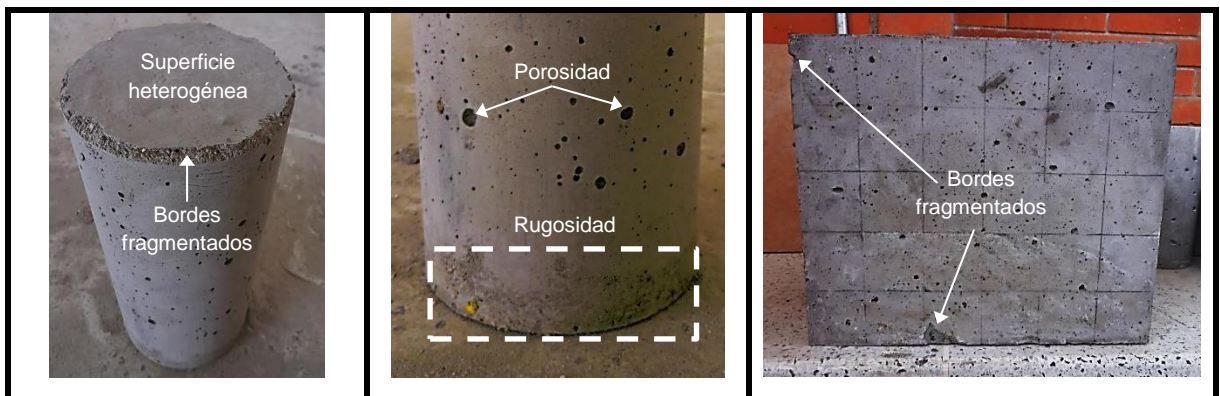
En esta parte se presenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos de inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión (Fc)

**4.2.1 Ensayo de inspección visual.** Durante esta prueba se tuvo en cuenta dos aspectos importantes para la evaluación de las probetas: el estado superficial y las dimensiones de las mismas. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

**4.2.1.1 Estado superficial de las muestras.** Mediante el ensayo visual directo se pudo evaluar la condición superficial de las muestras de concreto y se observó la presencia de porosidad heterogénea, debido a una insuficiente compactación, además se identificaron algunas rugosidades en la base de algunos de los cilindros, atribuido posiblemente a un exceso de grasa en las uniones del molde. Adicionalmente se presentaron algunos bordes fragmentados y superficies no uniformes. Imágenes de estas imperfecciones se muestran en la figura 6.

Al presentarse estas imperfecciones en los especímenes de concreto, se optó por escoger las mejores probetas para aplicar mediciones de VPU, sin embargo es importante destacar que la mayoría de los especímenes lucían una condición estable y uniforme, la cual no afecta los resultados obtenidos.

**Figura 6.** Defectos presentes en los especímenes de concreto.



**Fuente:** Los autores.

**4.2.1.2 Dimensiones.** A cada uno de los especímenes de concreto, se les midió los diámetros con la finalidad de determinar el área de la sección transversal, y a su vez se midieron las longitudes, para después calcular la velocidad de pulso ultrasónico. Los valores obtenidos están alrededor de  $103.91 \pm 0.55$  mm para el diámetro y  $208.45 \pm 0.80$  mm para la longitud. Los resultados obtenidos se pueden observar en el anexo B y F.

**4.2.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).** Como se indicó en la metodología, en ésta etapa se utilizaron dos métodos de transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico: el método directo y el método semidirecto, para evaluar la calidad del concreto a diferentes días de curado. Durante el desarrollo experimental, se tomaron lecturas del tiempo de vuelo, es decir el tiempo que demora la onda en atravesar el material, para después obtener la velocidad de pulso ultrasónico mediante la expresión 1.

$$VPU = \frac{\text{Longitud de trayectoria (m)}}{\text{Tiempo de vuelo del pulso (s)}} \quad (1)$$

**4.2.2.1 Mediciones de VPU por el método directo en especímenes cilíndricos de concreto.** En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la mediciones de la VPU leído por el método directo en cilindros de concreto. El valor promedio de la VPU presentado para cada probeta, comprende el obtenido a partir de los 6 valores leídos y el promedio general por día de curado es obtenido a partir de la toma de 24 lecturas, obteniendo un total de 144 datos leídos de la VPU durante el desarrollo de esta actividad. Todos los valores obtenidos se presentan en el anexo B.

**Tabla 7.** Registros de VPU por el método directo para especímenes cilíndricos.

Tiempo (días)	VPU (m/s)				
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio
<b>3</b>	3361,93	3165,42	3174,50	3287,34	<b>3247,30</b>
<b>5</b>	3436,63	3385,14	3402,46	3428,74	<b>3413,24</b>
<b>7</b>	3538,23	3496,03	3547,51	3424,38	<b>3494,80</b>
<b>14</b>	3609,53	3641,28	3624,55	3542,60	<b>3604,50</b>
<b>28</b>	3626,82	3667,01	3633,27	3585,29	<b>3628,10</b>
<b>56</b>	3710,20	3623,10	3565,67	3705,91	<b>3651,22</b>

**Fuente:** Los autores.

A partir de la tabla 7 se observa que a medida que ocurre el proceso de curado, se van incrementando los valores de VPU. Esto se debe a que durante este proceso se generan las reacciones de hidratación, transformando el hormigón en un material más denso y resistente a medida que transcurre el tiempo, lo cual permite que el pulso ultrasónico atraviese el material en un menor tiempo. Por otra parte las variaciones de VPU dependen de la densidad y las propiedades elásticas del material, por lo tanto se confirma que durante el proceso de curado aumenta la velocidad de pulso ultrasónico al adquirir densidad y resistencia el material. El comportamiento sugerido por los resultados concuerda con lo expresado por otros investigadores<sup>[4][9]</sup>.

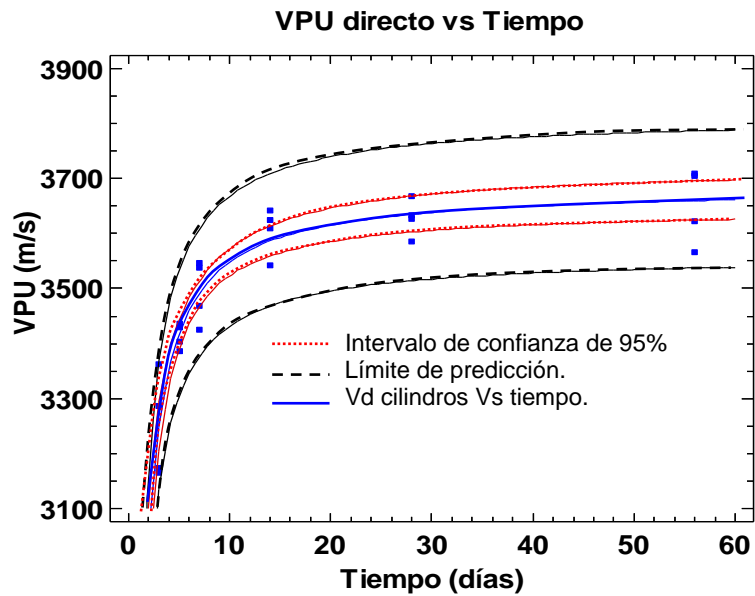
Las gráficas obtenidas en el presente capítulo fueron realizadas mediante el software estadístico Statgraphics Centurion XVI versión 16.1.15, en el cual se realizó una regresión simple a partir de los datos leídos, para obtener un modelo de comportamiento entre las variables relacionadas, con un nivel de confianza de 95%. Los parámetros de dichos modelos fueron determinados por el método de mínimos cuadrados. En las gráficas se presentan unas líneas rojas, las cuales representan el intervalo de confianza y las líneas negras el límite de predicción.

En la figura 7 se presenta la gráfica obtenida con los valores de la VPU leídos por el método directo vs tiempo de curado. A partir de esta gráfica se puede observar que la velocidad de pulso ultrasónico aumentó de manera significativa durante los primeros 14 días, al mostrar la curva una mayor pendiente durante este tiempo. A edades mayores de 14 días se puede observar que la pendiente de la curva tiende a estabilizarse, presentando un aumento de la velocidad no tan apreciable. Esto se debe posiblemente que durante los primeros 14 días de curado, hay mayor generación de productos de reacción y a edades mayores estas reacciones de hidratación se generan en menor proporción<sup>[9]</sup>.

A partir de esta gráfica se encontró que estos resultados siguen un comportamiento de tipo exponencial (ver ecuación 2), con un coeficiente de

correlación de **-0.939137**, el cual indica una fuerte relación entre las variables mencionadas, así mismo se demuestra que el modelo propuesto se ajusta un **88,19%** a los valores obtenidos, con un error de estimación de **0,015**.

**Figura 7.** Gráfica de la VPU leído por el método directo vs tiempo de curado.



**Fuente:** Los autores.

La ecuación obtenida del modelo ajustado se presenta a continuación:

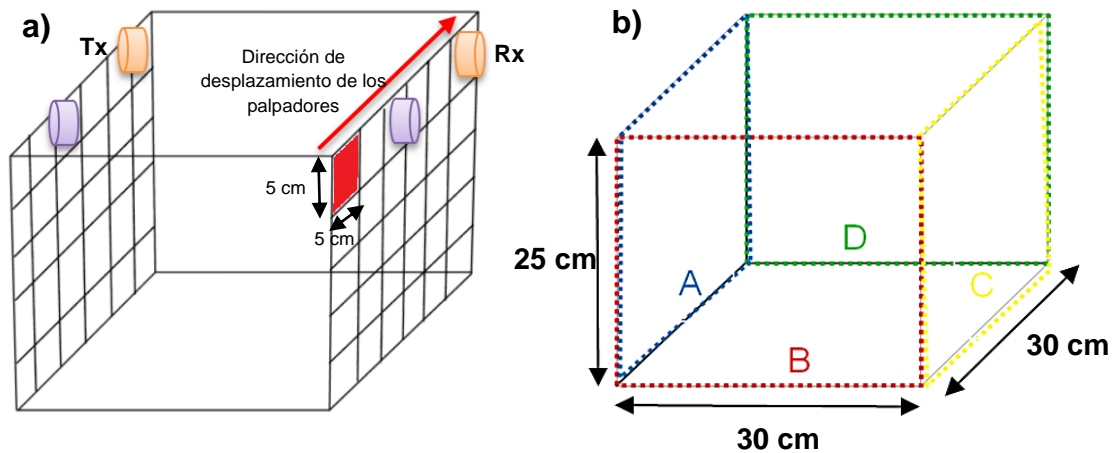
$$VPU = \exp(8,21192 - 0,378121/Tiempo) \quad (2)$$

La ecuación 2 puede ser empleada para predecir la VPU directo a cualquier tiempo en estructuras diseñadas con las mismas características de esta investigación.

**4.2.2.2 Mediciones de VPU por el método directo en espécimen de 30x30x25 cm<sup>3</sup> de concreto.** Para llevar a cabo las mediciones de VPU en el espécimen de concreto de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, se requirió trazar una malla con cuadrículas de 5x5

cm<sup>2</sup> en las caras laterales del mismo, ver figura 8a. Posteriormente se procedió a denominar las caras del espécimen para saber la ubicación de los palpadores y el orden de la toma de lecturas de tiempo de vuelo por el método directo (ver figura 8b).

**Figura 8.** Denominación de las caras y arreglo de los palpadores.



**Fuente:** Los autores.

Para las mediciones de tiempo de vuelo se ubicó el palpador transmisor (Tx) y el palpador receptor (Rx) en las superficies A y C del espécimen respectivamente, se tomaron dos lecturas por recuadro hasta completar todas las 5 filas. También fue evaluada las superficies B y D de la probeta. A continuación en la tabla 8 se presenta la velocidad de pulso promedio, para los diferentes días de ensayo. Cada promedio obtenido de acuerdo a la fila comprende 24 valores leídos, y el valor promedio general por día de curado se obtiene a partir de 120 lecturas tomadas. En el anexo C se registran algunos de los 720 resultados obtenidos.

A partir de la tabla 8 se puede observar para la mayoría de los datos un aumento de los valores de velocidad de pulso, a medida que aumenta el tiempo de curado. Así mismo se puede apreciar que los valores de velocidad de pulso presentan variación y un aumento ligero cuando se acercan los palpadores a la zona inferior de la muestra (base), esto probablemente se debe a que en esta zona el material

tiende a ser más denso, ya que efectos de la gravedad causan una mayor concentración de agregados gruesos (segregación), por lo tanto el pulso ultrasónico se demorará menos tiempo en atravesar esta zona que la parte superior del material.

**Tabla 8.** Registros de VPU por el método directo en espécimen de 30x30x25 cm<sup>3</sup>.

VPU POR EL MÉTODO DIRECTO (m/s)						
FILAS	DIA 3	DIA 5	DIA 7	DIA 14	DIA 28	DIA 56
1	3289,28	3442,86	3607,32	3720,71	3831,44	3915,00
2	3275,45	3422,94	3614,41	3715,90	3823,74	3917,48
3	3326,57	3462,67	3641,00	3748,34	3857,16	3945,64
4	3373,72	3502,46	3670,79	3781,95	3891,38	3964,76
5	3460,83	3579,89	3771,48	3880,33	3964,70	4066,54
<b>PROMEDIO</b>	<b>3345,17</b>	<b>3482,16</b>	<b>3661,00</b>	<b>3769,45</b>	<b>3873,68</b>	<b>3961,89</b>

**Fuente:** Los autores.

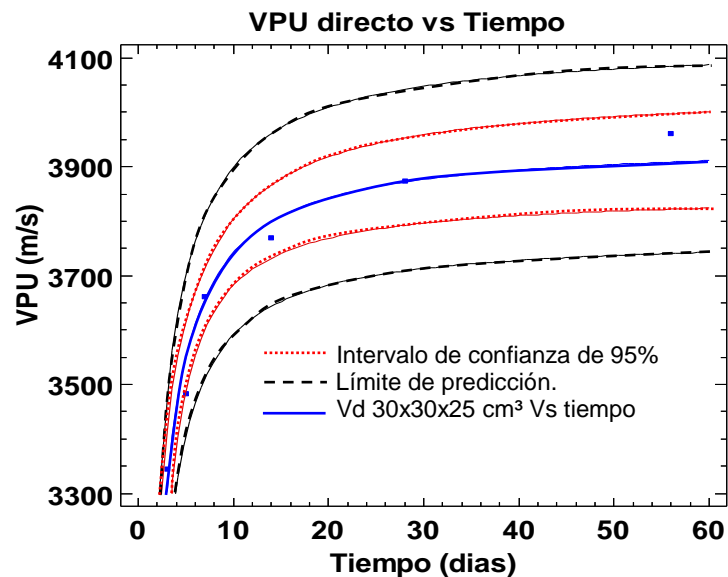
En la figura 9 se presenta la gráfica con los valores promedios de la VPU leídos por el método directo en función del tiempo de curado. A partir de esta gráfica se puede observar como incrementó la velocidad de pulso a medida que avanza el tiempo, mostrando cambios significativos durante todo el proceso de curado, sin embargo el incremento es más apreciable durante los primeros 14 días al presentarse en la curva una mayor pendiente durante este tiempo, a partir de este tiempo se observa que la curva tiende a estabilizarse al presentarse un comportamiento casi asintótico, no mostrando cambios significativos en los valores de la VPU. Este comportamiento probablemente se debe a que durante los primeros 14 días hay una mayor producción de las reacciones de hidratación, en cambio a partir de este tiempo estas reacciones se generan en menores proporciones<sup>[9]</sup>. El comportamiento sugerido por los datos obtenidos concuerda con lo reportado por otros investigadores<sup>[8][9]</sup>.

A partir de un análisis estadístico se encontró que esta relación describe un comportamiento de tipo exponencial, con un coeficiente de correlación de -

**0,982082**, un R cuadrado de **96,45%** y un error estándar de **0,013**. Al presentarse un coeficiente de correlación cercano a -1, se confirma la fuerte relación entre las variables mencionadas, demostrando que el modelo exponencial es útil para describir la relación entre la VPU y el tiempo de curado. De acuerdo al intervalo de datos obtenidos el modelo estadístico mostrado en la ecuación 3 es el que presentó la mayor precisión matemática.

$$\text{VPU} = \exp(8,28046 - 0,531058/\text{Tiempo}) \quad (3)$$

**Figura 9.** Gráfica de VPU leído por el método directo vs tiempo de curado.



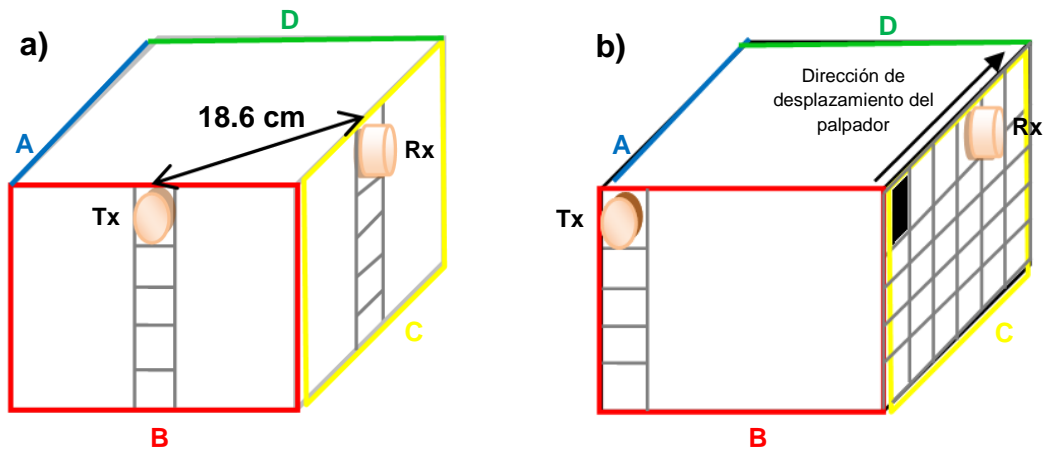
**Fuente:** Los autores.

Al comparar los valores obtenidos de VPU por el método directo se observó que la velocidad es mayor en el espécimen de 30x30x25 cm<sup>3</sup> que la obtenida en los cilindros de concreto, siendo el mismo elemento estructural, con las mismas características de fabricación y tiempo de curado. Lo anterior posiblemente se deba a una mayor cantidad de agua presente por el volumen de la muestra de

30x30x25 cm<sup>3</sup>, influyendo al parecer en las reacciones de hidratación, ocasionando una alta generación de fases hidratadas y altos valores de VPU.

**4.2.2.3 Mediciones de VPU por el método semidirecto en espécimen de 30x30x25 cm<sup>3</sup> de concreto.** Como se indicó en la metodología en esta actividad se realizaron mediciones de VPU de dos maneras: la primera, a distancia constante entre los dos transductores ver figura 10a; la segunda, manteniendo en la misma posición el palpador transmisor y desplazando el palpador receptor, ver figura 10b. Para llevar a cabo las mediciones de velocidad de pulso a distancia constante, se ubicaron los palpadores en las caras adyacente B y C respectivamente, a una distancia de 186 mm entre ellos, ver figura 10a. Para las mediciones de velocidad a distancia variable, se utilizó como distancia mínima 286 mm y la máxima 389 mm, esto de acuerdo a la ubicación del palpador receptor en la cuadrícula dibujada. También fue evaluada las superficies D y A del espécimen en todos los casos.

**Figura 10.** Arreglo de los palpadores para toma lecturas por el método semidirecto



**Fuente:** Los autores.

La tabla 9 presenta los valores promedio de velocidad de pulso obtenidos de las 4 superficies de la probeta para cada día de ensayo, (3, 5, 7, 14, 28 y 56 días),

ubicados los palpadores a una distancia de separación constante. El valor promedio de VPU de acuerdo a la fila comprende la toma de 4 lecturas, y el valor promedio por día de curado se obtuvo a partir de 20 valores leídos. En el anexo D se registran los 120 datos leídos durante esta prueba.

**Tabla 9.** Mediciones de VPU por el método semidirecto-distancia de separación constante entre palpadores.

VPU POR EL MÉTODO SEMIDIRECTO (m/s)						
FILAS	DIA 3	DIA 5	DIA 7	DIA 14	DIA 28	DIA 56
1	3240,63	3536,48	3691,33	3882,40	4036,63	4034,60
2	3371,25	3600,39	3808,23	4034,94	4007,32	4191,86
3	3384,99	3592,68	3777,23	4002,67	4079,78	4187,01
4	3401,96	3629,37	3871,62	4103,81	4078,41	4264,64
5	3538,95	3767,15	3998,06	4156,61	4203,83	4282,29
<b>PROMEDIO</b>	<b>3387,56</b>	<b>3625,21</b>	<b>3829,29</b>	<b>4036,09</b>	<b>4081,19</b>	<b>4192,08</b>

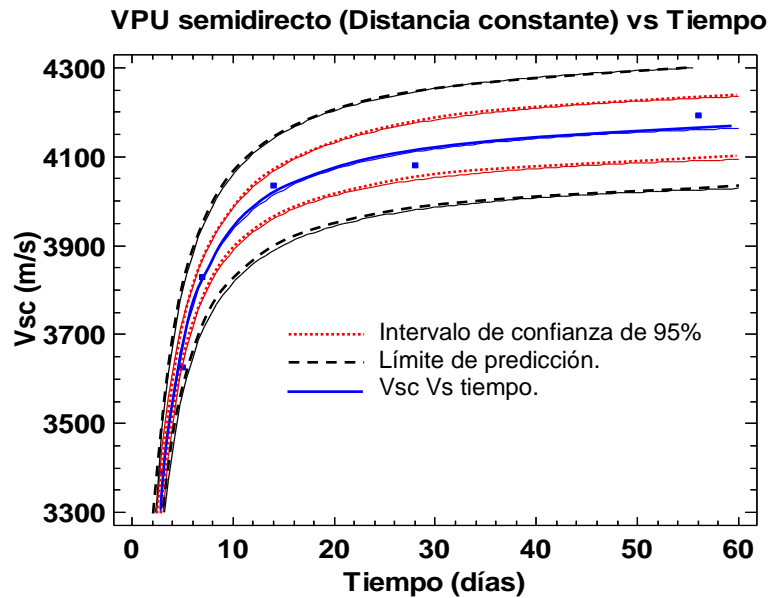
**Fuente:** Los autores.

A partir de la tabla 9 se puede observar que el comportamiento de la velocidad es muy similar al obtenido mediante el método directo, presentando un incremento al transcurrir los días de curado, además estos valores tienden hacer mayores en la parte inferior del espécimen debido a la mayor segregación de los agregados en el material. De acuerdo a los resultados obtenidos se aprecia que el método semidirecto puede detectar las diferencias en compactación, mostrando un aumento de los valores en la dirección de fundición. Además muestra sensibilidad al efecto del tiempo de curado así como lo indicado por el método directo.

En la figura 11 se graficaron los valores de velocidad promedio para cada día de ensayo registrados en la tabla 9, tomando como variable dependiente la VPU semidirecto y como variable independiente el tiempo de curado. A partir de esta gráfica se puede observar la influencia del tiempo en la VPU semidirecto, mostrando un comportamiento ascendente a medida que transcurre el tiempo de curado. Durante los primeros 14 días se observa un crecimiento significativo, y a

edades mayores un comportamiento casi estable, esto debido probablemente a que las reacciones de hidratación durante los primeros 14 días se producen en mayores cantidades que las obtenidas después de este tiempo.

**Figura 11.** Gráfica de la VPU leído por el método semidirecto a distancia constante Vs tiempo de curado.



**Fuente:** Los autores.

En la gráfica anterior se presenta un modelo similar al obtenido mediante el método directo; este modelo es de tipo exponencial el cual describe la relación entre la VPU semidirecta y el tiempo de curado. A partir del análisis estadístico se encontró que existía otro modelo con mayor precisión matemática, sin embargo el modelo propuesto explica el comportamiento desde el punto de vista físico, describiendo adecuadamente el fenómeno estudiado. A partir de esta gráfica se obtiene un coeficiente de correlación de **-0,993626** demostrando la estrecha relación entre las variables estudiadas, además se obtuvo un R cuadrado de **98,72%** y un error estándar de **0,010**. A continuación se presenta la ecuación del modelo ajustado.

$$VPU = \exp(8,34552 - 0,675247/\text{Tiempo}) \quad (4)$$

Con el fin de mirar el otro arreglo de los palpadores, a continuación en la tabla 10 se muestra los resultados promedios de la VPU semidirecto variando la distancia de separación entre los palpadores para diferentes días de curado. Los valores promedios de VPU presentado para cada fila, comprende lo obtenido a partir de los 24 valores leídos y el promedio general por día de curado se obtiene a partir de 72 lecturas tomadas. En el anexo E se presentan los 432 datos obtenidos en esta actividad.

**Tabla 10.** Mediciones de VPU por el método semidirecto - moviendo el palpador receptor.

VPU POR EL MÉTODO SEMIDIRECTO						
FILAS	DIA 3	DIA 5	DIA 7	DIA 14	DIA 28	DIA 56
1	3451,83	3598,55	3733,71	3894,45	3971,02	4063,69
3	3482,98	3621,18	3753,66	3927,93	4049,50	4124,17
5	3551,58	3747,73	3847,02	4045,37	4124,28	4227,06
<b>PROMEDIO</b>	<b>3495,46</b>	<b>3655,82</b>	<b>3778,13</b>	<b>3955,92</b>	<b>4048,27</b>	<b>4138,31</b>

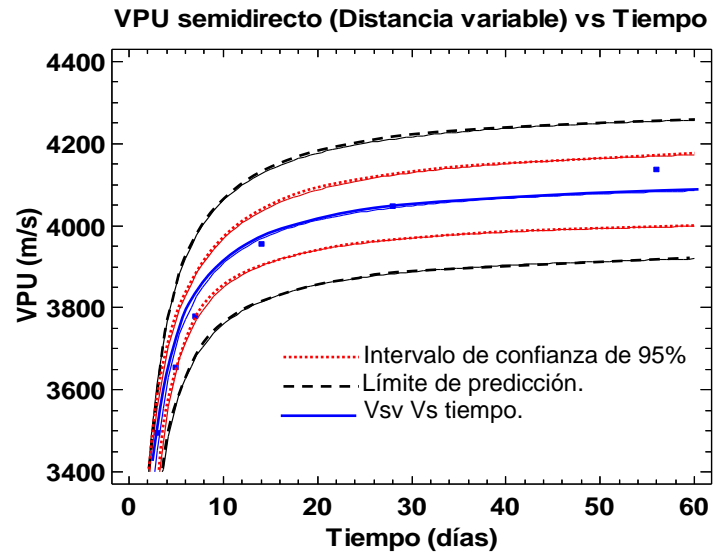
**Fuente:** Los autores.

A partir de la tabla 10 se puede observar nuevamente el comportamiento ascendente de los valores de velocidad a medida que aumenta el tiempo de curado y cuando se acercan los palpadores a la zona inferior del espécimen. De acuerdo con estos resultados, nuevamente se puede decir que el método semidirecto es sensible ante las diferentes zonas de compactación y días de curado, de acuerdo a lo indicado por el método directo.

En la figura 12, se muestra gráficamente el comportamiento de la VPU semidirecto-desplazando el palpador receptor, en función del tiempo de curado. A partir de esta gráfica se observa un incremento característico de la velocidad a medida que aumenta el tiempo de curado, pero es más significativo durante los primeros 14 días, al presentarse en la gráfica una mayor pendiente, esto debido a

que se generan en mayor cantidad las reacciones de hidratación. Por el contrario a tiempos mayores se puede observar que la curva tiende a un comportamiento casi horizontal, debido a que estas reacciones se generan en menores proporciones.

**Figura 12.** Gráfica de VPU semidirecto al variar la distancia entre palpadores vs tiempo.



**Fuente:** Los autores.

Del análisis estadístico se pudo determinar un modelo de tipo exponencial, con un coeficiente de correlación de **-0.984108**, lo cual indica que los valores de VPU están fuertemente relacionados con los días de curado, además se obtuvo un R cuadrado de **96,84%** y un error estándar de **0,012**. A continuación en la ecuación 5 se muestra el modelo estadístico que presentó mayor precisión matemática.

$$VPU = \exp(8,32388 - 0,531634/Tiempo) \quad (5)$$

La ecuación 5 puede ser útil para establecer valores de VPU semidirecto conociendo cualquier tiempo de curado, para muestras curadas a condiciones ambientales.

De los datos obtenidos de VPU por el método semidirecto se puede observar que la forma de aplicación del método, no muestra influencia significativa sobre los valores de velocidad, al encontrarse una máxima diferencia de aproximadamente el 3% entre los valores de velocidad leídos a distancia constante y distancia variable. Lo anterior demuestra que cualquiera que sea la forma de aplicación del método se obtiene valores confiables de VPU semidirecto.

**4.2.3 Resistencia a la compresión.** Para esta prueba se ensayaron 4 especímenes cilíndricos de concreto por cada día de curado. Los valores de resistencia a la compresión se calcularon mediante la ecuación 6, y se expresan en unidades de Mpa.

$$f_c = \frac{P}{A} = \frac{\text{Carga axial aplicada al cilindro (kgf)}}{\text{área de la sección transversal (cm}^2\text{)}} \quad (6)$$

$$1 \text{ Mpa} = 10,197 \text{ Kgf/cm}^2$$

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión promedio de acuerdo a la edad de la muestra se presentan a continuación en la tabla 12. El valor promedio de resistencia a la compresión presentado para cada día de curado comprende el obtenido a partir de 4 valores tomados. En el anexo F, se presenta los 24 datos obtenidos.

**Tabla 11.** Resistencia a la compresión promedio de los especímenes cilíndricos de concreto.

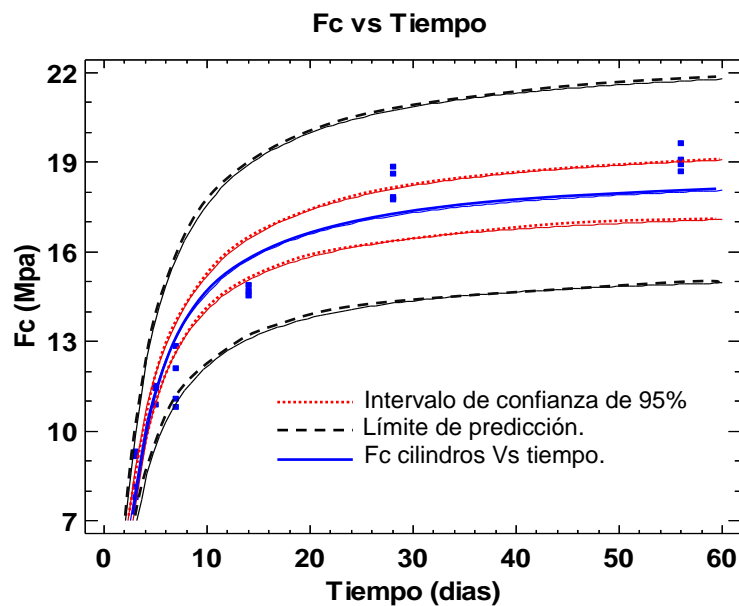
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)					
Tiempo	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio
3	7,77	8,15	9,15	9,30	8,59
5	11,50	10,88	11,43	11,46	11,32
7	12,86	10,80	11,07	12,09	11,71
14	14,55	14,69	12,39	14,90	14,13
28	18,61	17,75	17,83	18,86	18,26
56	18,92	19,09	18,69	19,63	19,08

**Fuente:** Los autores.

A partir de la tabla 11 es evidente la influencia del tiempo de curado en la resistencia a la compresión del concreto. Se observa claramente un incremento proporcional de la resistencia a medida que transcurre el tiempo, sin embargo el desarrollo de esta resistencia resulta de la hidratación de las fases de silicato de calcio, la cual es responsable de la reacción entre los agregados y la pasta de cemento hidratada, confiriéndole así al material su resistencia y durabilidad<sup>[9]</sup>. El curado es un factor determinante en el rendimiento de las muestras de concreto, pues a medida que avanza la maduración del material se mejoran de forma significativa las propiedades ingenieriles del mismo<sup>[31][32]</sup>.

Estos resultados están acorde con la norma técnica ASTM C39<sup>[2]</sup> y por otras investigaciones<sup>[30][35]</sup>, donde establecen que la resistencia de especímenes de concreto de 100mm x 200mm curadas a 28 días, bajo condiciones de laboratorio, se encuentra en un rango de 13,78-55 Mpa. Lo que se puede decir que la resistencia promedio obtenida de 18,26 Mpa se encuentra dentro de este rango establecido<sup>[35]</sup>.

**Figura 13.** Gráfica de resistencia a la compresión en función del tiempo de curado.



**Fuente:** Los autores.

En la figura 13 se graficaron los valores registrados en la tabla 12, tomando  $F_c$  como variable dependiente y el tiempo de curado como variable independiente. A partir de esta figura se observa que al aumentar el tiempo de curado se incrementa la resistencia a la compresión del material. Sin embargo se presenta un aumento significativo durante los primeros 14 días al describir la curva una mayor pendiente durante este tiempo, esto debido probablemente por la actividad de las reacciones de hidratación, generando productos de reacción en mayores proporciones; a partir de este tiempo lo más probable es que se siguieran generaron menores cantidades de los productos de reacción, al presentarse un comportamiento casi estable de la resistencia a la compresión<sup>[28][30]</sup>.

Así mismo se encontró que estos resultados siguen un comportamiento de tipo exponencial con una ecuación modelo:  **$F_c = \exp (2,93549 - 2,52482/\text{Tiempo})$  (7)** con un coeficiente de correlación de **-0,958954**, el cual indica una fuerte relación entre las variables mencionadas, demostrando que el modelo planteado se ajusta a los datos obtenidos, con un R cuadrado de **91,95%**, y un error de estimación de **0.086**.

Durante el ensayo de compresión se observaron las líneas de fallas en cada una de los especímenes de concreto. Una forma típica de buena ruptura se presenta cuando las líneas de falla se ven cónicas o en forma de X, esta falla se observa cuando la carga de compresión es bien aplicada sobre muestras bien preparadas<sup>[2]</sup>, sin embargo se pueden producir otros tipos de fallas. Estas otras formas se ven claramente en la figura 14 presentándose generalmente falla en forma de cono en el cabezal de las muestras y fracturas diagonales, derivado a la falta de uniformidad sobre las caras de carga, donde presentan una superficie cóncava o convexa, también se puede atribuir a la deficiencia del material de cabeceo<sup>[2]</sup>. A pesar de esto, cabe aclarar que estas formas de fallas se encuentran entre los patrones de falla aceptados por la respectiva norma ASTM C39<sup>[2]</sup>.

**Figura 14.** Formas de falla presentadas en los especímenes ensayados.



**Fuente:** Los autores.

#### **4.2 RELACIÓN ENTRE LA VPU DIRECTO ( $V_d$ ) Y LA VPU SEMIDIRECTO ( $V_s$ )**

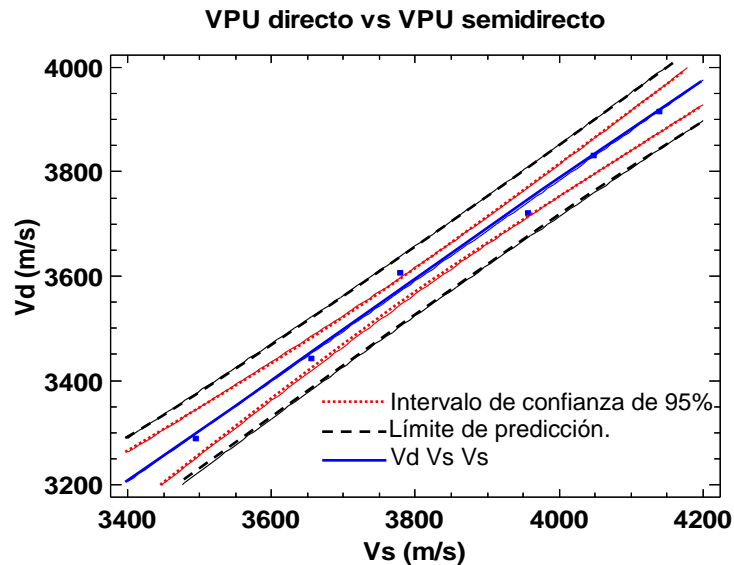
Conocidos los valores de la VPU por transmisión directa y los de VPU por transmisión semidirecta para cada día de curado, se construyó una gráfica que describe la relación comparativa entre estas dos variables.

A pesar de que los valores de VPU semidirecto para las dos formas de medición son similares, se realiza un estudio de desviación estándar para seleccionar el conjunto de datos que presente el menor grado de dispersión, para poder establecer la relación mencionada anteriormente. Al determinar la desviación estándar se encontró que los datos obtenidos a distancia variable presentan una desviación menor en comparación con la obtenida a distancia constante, por lo tanto la gráfica 15 se construyó a partir de los valores de velocidad promedio registrados en las tablas 8 y 10.

Aunque en este estudio se lograron otros modelos estadísticos que describen con mayor precisión matemática este suceso, se ajustó un modelo lineal ya que tiene sentido desde el punto de vista físico, describiendo adecuadamente el fenómeno

estudiado. El comportamiento sugerido por los resultados concuerda con lo reportado por otros investigadores<sup>[36]</sup>.

**Figura 15.** Modelo ajustado de la VPU directo vs la VPU semidirecto.



**Fuente:** Los autores.

La figura 15 muestra que las variables mencionadas para este modelo lineal, se encuentran altamente relacionadas, al obtener un coeficiente de correlación cercano a 1 (**0,995363**). Por otra parte el estadístico R cuadrado indica que el modelo ajustado explica **99,07%** que la variabilidad de la velocidad directa es debida a la velocidad semidirecta.

De acuerdo a lo anterior, a partir de este modelo propuesto, se puede predecir valores de VPU directo con datos de VPU semidirecto para un concreto que presente valores de Vs en el intervalo estudiado, mediante la siguiente expresión matemática:

$$Vd = (0,95237 * Vs + 20,0587) \quad (8)$$

Al hacer una comparación entre los datos obtenidos de VPU directo y los valores de VPU semidirecto se observó que los valores de VPU semidirecto son mayores 5% a los valores obtenidos de VPU directo. Estos resultados son contrarios a lo expresado por otros investigadores<sup>[36]</sup> donde demuestran que los valores de VPU directo son 4% más altos que los valores de VPU semidirecto. Lo anterior probablemente pudo deberse a un posible error de medición, pues la técnica de VPU muestra sensibilidad a ligeras variaciones de la distancia de separación entre los palpadores afectando los valores de VPU.

#### **4.3 RELACIÓN ENTRE LA VPU DIRECTA Y Fc.**

Para relacionar la VPU directa y la resistencia a la compresión (Fc) para cada tiempo de curado, se graficaron los promedios que se indican en las tablas 7 y 11. A continuación se presenta en la figura 16, el modelo de regresión ajustado para Fc como variable dependiente y VPU como variable independiente.

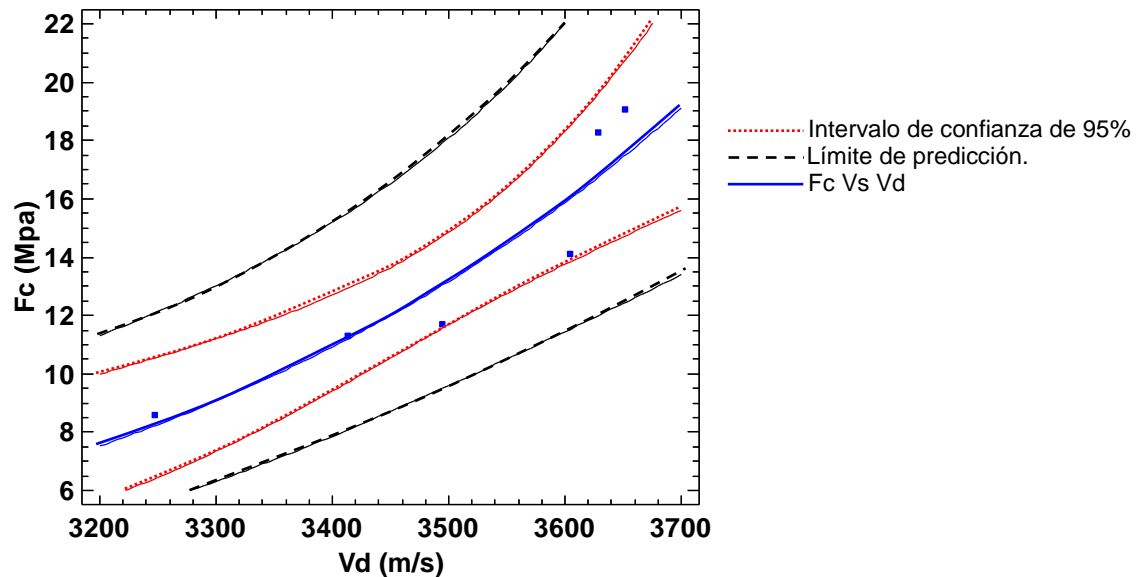
La presente investigación permitió obtener para estas variables un modelo de tipo exponencial, lo cual concuerda con lo expresado por otros investigadores<sup>[9]</sup>. A continuación en la ecuación 9 se presenta el modelo de mayor precisión matemática.

$$F_c = \exp(0,00186677 * V_d - 3,956) \quad (9)$$

En la figura 16 se presenta la correlación entre la resistencia a la compresión y la VPU directa, mostrando una relación significativa al obtener un coeficiente de correlación cercano a 1 (**0,950957**). De acuerdo con esto, la ecuación 9 permite determinar la calidad del material a partir de medidas VPU directo para un concreto que presente valores de VPU dentro del intervalo estudiado.

**Figura 16.** Modelo ajustado que correlaciona la resistencia a la compresión con la VPU por el método directo.

**Modelo obtenido de resistencia a la compresión (Fc) vs VPU**



**Fuente:** Los autores.

#### 4.4 RELACIÓN ENTRE LA VPU SEMIDIRECTA Y Fc.

Al encontrar que valores de la VPU leído por el método directo, son diferentes en los cilindros y en la probeta de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, no se pudo establecer una relación entre las variables Fc y la VPU semidirecta. Por lo anterior, se procedió a medir nuevamente valores de la VPU por los métodos directo y semidirecto en 3 especímenes de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, para posteriormente extraer 2 núcleos de 75 mm x 150 mm de cada muestra y realizar el ensayo de resistencia a la compresión necesario para establecer relación entre las variables mencionadas. A continuación en la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos.

Al observar los valores de Fc se pudo comprobar que en la probeta de 30x30x25 cm<sup>3</sup> se favorecieron más las reacciones de hidratación al obtenerse valores mayores de Fc que los obtenidos en los cilindros.

**Tabla 12.** Resultados de Fc y VPU semidirecto en especímenes de 30x30x25 cm<sup>3</sup>.

Espécimen	Fc (MPa)	Vd (m/s)	Vsc (m/s)	Vsv (m/s)
1	22,77	3764,96	3951,5	3958,12
	23,40	3800,89	3963,59	3966,36
2	26,28	3868,6	3975,08	3971,67
	28,29	3891,82	4012,45	4003,84
3	28,54	<b>3905,67</b>	4038,94	4012,70
	29,92	3919,6	4041,01	4050,04

**Fuente:** Los autores.

Para corroborar la precisión del modelo propuesto anteriormente se reemplazaron los valores de VPU directo en la ecuación 9 para comparar valores teóricos de Fc con los obtenidos experimentalmente de la tabla 14. A continuación se presenta un cálculo a partir de datos de VPU.

$$F_c = \exp(0,00186677 \cdot V_d - 3,956)$$

$$F_c \text{ teórico} = \exp(0,00186677 \cdot 3905,67 - 3,956) = 28,08 \text{ MPa}$$

$$F_c \text{ experimental} = 28,54 \text{ MPa}$$

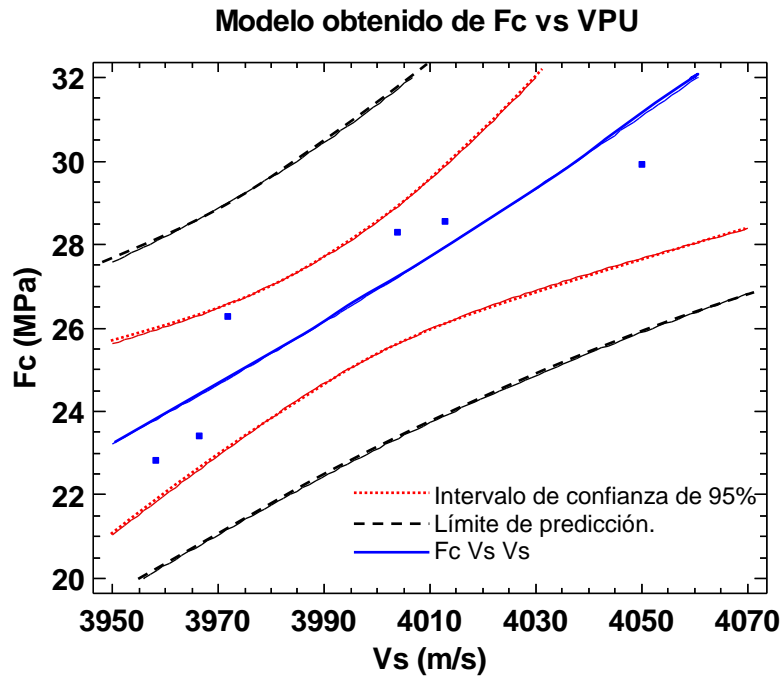
Con lo expuesto anteriormente, se pueden utilizar los datos registrados en la tabla 14 para establecer un modelo experimental que relacione la VPU semidirecta y la resistencia a la compresión del elemento estudiado.

Para la obtención de este modelo se graficó la resistencia a la compresión como variable dependiente y la VPU semidirecta como variable independiente, ver figura 17. A partir de un análisis estadístico se encontró que las variables mencionadas describen un comportamiento de tipo exponencial, ver ecuación 10. Aunque en este estudio se lograron otros modelos que describen con mayor precisión matemática este suceso, el modelo propuesto tiene sentido desde el punto de

vista físico, describiendo adecuadamente el fenómeno estudiado. A continuación se presenta el modelo estadístico de mayor precisión matemática.

$$F_c = \exp(14,926 - 46533,5/V_s) \quad (10)$$

**Figura 17.** Modelos obtenidos de  $F_c$  vs VPU semidirecta.



**Fuente:** Los autores.

A partir del modelo propuesto se obtiene un coeficiente de correlación cercano a -1 (-0,91335) confirmando la fuerte relación entre las variables estudiadas y un R cuadrado de **83,42%**. De acuerdo a esto, se puede decir que la ecuación 10 es útil para estimar la resistencia a la compresión de concretos mediante el uso de la técnica de VPU por el método semidirecto, cuando se tiene acceso a las caras adyacentes del elemento estructural.

## 5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos experimentalmente en especímenes de concreto sin refuerzo con relación agua/cemento igual a 0.5 y curadas a condiciones ambientales se derivan a continuación las siguientes conclusiones:

- A medida que aumenta el tiempo de curado se observa que la velocidad obtenida por los métodos directo y semidirecto presentan un comportamiento creciente de tipo exponencial, al mostrar cambios apreciables durante los primeros 14 días de curado, y valores más estables a partir de este tiempo. Esto se debe principalmente a que las reacciones de hidratación promueven el desarrollo de las propiedades mecánicas, permitiendo que la onda ultrasónica emplee menos tiempo en atravesar el material.
- La forma de toma de datos de VPU permitió demostrar que se presenta segregación en el elemento estructural, ya que los valores obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico fueron mayores en el fondo que en la parte superior del material.
- A partir de los datos obtenidos de VPU semidirecto se pudo comprobar que la forma de aplicación del método no afecta de forma significativa los valores de VPU, al obtenerse una pequeña diferencia de aproximadamente el 3% entre los valores obtenidos de velocidad leídos a distancia constante y distancia variable.

- En la presente investigación se encontró que existe una relación de tipo lineal entre los valores de VPU leídos por los métodos directo y semidirecto con altos coeficientes de correlación. Al comparar estas dos variables se puede decir que los valores de VPU semidirecto fueron aproximadamente 5% mayores que los obtenidos por el método directo.
  
- La resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico tienen un comportamiento similar a medida que transcurre el tiempo de curado, mostrando cambios significativos durante los primeros 14 días, esto al parecer por la generación de mayores cantidades de las fases de hidratación, provocando un incremento de las variables mencionadas.
  
- La resistencia a la compresión y la VPU directo se relacionan mediante un modelo exponencial, dado por la expresión  $F_c = \exp(0,00186677 * V_d - 3,956)$ , con un coeficiente de correlación de 0,950957, el cual indica que este modelo propuesto es confiable para estimar la resistencia a la compresión a partir de datos de VPU directo.
  
- A partir de los datos experimentales se determinó un modelo estadístico de tipo exponencial dado por la siguiente expresión:  $F_c = \exp(14,926 - 46533,5/V_s)$ , el cual permite estimar la resistencia a la compresión del concreto con datos de VPU semidirecto, cuando se tenga posibilidad de acceso a dos caras adyacentes del elemento estructural.

## 6. RECOMENDACIONES

Concluida la presente investigación se recomienda:

- Continuar la investigación para comprobar si los valores de VPU semidirecto son mayores que los obtenidos por el método directo con la finalidad de predecir modelos que correlacionen las variables mencionadas.
- Para seguir con esta investigación se recomienda sumergir las muestras de 30x30x25 cm<sup>3</sup> en agua cubriendo la totalidad de su volumen, con el fin de favorecer de forma homogénea las reacciones de hidratación en la totalidad de las muestras de concreto, y realizar un posterior secado para evitar la influencia del agua en los valores de VPU.
- Determinar una expresión matemática que correlacione valores de la resistencia a la compresión de muestras de concreto de 30x30x25 cm<sup>3</sup> en función del tiempo de curado estudiado en esta investigación, mediante la extracción de núcleos cilíndricos del elemento evaluado.
- Realizar investigaciones estudiando el comportamiento de la VPU semidirecto al variar la relación agua/cemento, el tamaño máximo del agregado grueso, el tipo de cemento y la porosidad de las muestras.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). “Proporcionamiento de mezclas, concreto normal, pesado y masivo”. México. ACI. 2001.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). “ASTM C 39/C 39M-04a: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”. ASTM 2004.
- [3] \_\_\_\_\_. “ASTM C597-02: Standard test method for Pulse Velocity Through Concrete”. ASTM 2009.
- [4] ARIZA, Diana y ATUESTA, Javier. “Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concretos sin refuerzo”. Trabajo de grado Ingeniero (a) Metalúrgico (a). UIS. 2010.
- [5] Calidad fisicoquímica y microbiológica promedio mensual del agua tratada. [En línea]. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. 2012. [Citado el 15 de febrero de 2013]. Disponible en: <<http://www.amb.com.co>>
- [6] CHIANG, Chih-Hung y CHEN, Po-Chih. “Semi-direct measurements of ultrasonic pulse velocity in proposed concrete reference specimens”. [En línea]. [Citado el 10 septiembre de 2012]. Disponible en: <<http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1207/1207.htm>>
- [7] CNS FARNELL. “OPERATING INSTRUCTIONS PUNDIT PLUS MODEL PC 1006”. CNS Farnell Limited. Marzo de 2006.
- [8] DURAN, Edwin y PEÑA, Deicy. “Correlación entre el contenido de agua del concreto, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico”. Trabajo de grado Ingeniero (a) Metalúrgico (a). Bucaramanga. UIS. 2010.

**[9]** HERRERA, Julián Orlando. “Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas por medio de medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de un concreto convencional como aporte al estudio de la durabilidad”. Tesis de Magister en Ingeniería de Materiales. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander (UIS). 2011.

**[10]** INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). “NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 2007.

**[11]** \_\_\_\_\_. “NTC 78: Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75  $\mu\text{m}$  (No 200) en agregados minerales”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1995.

**[12]** \_\_\_\_\_. “NTC 92: Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1995.

**[13]** \_\_\_\_\_. “NTC 121: Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1982.

**[14]** \_\_\_\_\_. “NTC 127: Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”. Tercera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 2000.

**[15]** \_\_\_\_\_. “NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso”. Primera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1995.

**[16]** \_\_\_\_\_. “NTC 221: Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1999.

**[17]** \_\_\_\_\_. “NTC 237: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino”. Primera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1995.

**[18]** \_\_\_\_\_. “NTC 321: Cemento Portland. Especificaciones químicas”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1982.

**[19]** \_\_\_\_\_. “NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto”. Segunda edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 2000.

**[20]** \_\_\_\_\_. “NTC 1377: Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio”. Primera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1994.

**[21]** \_\_\_\_\_. “NTC 1486: Documentación. Presentaciones de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigaciones”. Sexta edición. Bogotá D.C. Colombia. ICONTEC. 2008.

**[22]** \_\_\_\_\_. “NTC 3459: Agua para la elaboración de concretos”. Primera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 2001.

**[23]** \_\_\_\_\_. “NTC 4325: “Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto”. Primera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1997.

**[24]** \_\_\_\_\_. “NTC 4490: Referencias documentales para fuentes de información electrónica”. Primera edición. Bogotá D.C Colombia. ICONTEC. 1998.

**[25]** \_\_\_\_\_. “NTC 5613: Referencias bibliográficas. Contenido forma y estructura”. Primera edición. Bogotá D.C. Colombia. ICONTEC. 2008.

**[26]** INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). “Guidebook on non-destructive testing of concrete structures”. Vienna, Austria. IAEA. 2002. p. 44-55, 100-110.

**[27]** LORENZI, Alexandre; TESTON, Francisco y PINTO DA SILVA, Luis. “Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Concrete Specimens”. [En línea]. [Citado el 18 Enero de 2013]. Disponible en: [www.ndt.net/article/panndt2007/papers/83.pdf](http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/83.pdf)

**[28]** MAHURE, N.V., *et.al.* “Correlation between Pulse Velocity and Compressive Strength of Concrete”. En: International Journal of Earth Sciences and Engineering. Octubre 2011, Vol. 04, no 06 SPL, p 871-874.

**[29]** NAIK, T.R; MALHOTRA, V.M. y POPOVICS, J.S. “The Ultrasonic Pulse Velocity Method”. En: MALHOTRA, V.M. y CARINO, N.J. “Handbook on nondestructive testing of concrete”. Segunda edición. USA: ASTM, CRC press LLC, 2004. p. 1-12.

**[30]** PANZERA, T.H., *et.al.* “Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials”. [En línea]. [Citado el 20 Enero de 2013]. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-analysis-of-natural-and-man-made-materials/ultrasonic-pulse-velocity-evaluation-of-cementitious-materials>

**[31]** PARADA, Walter Orlando. “Evaluación del efecto del friso sobre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en concretos sin refuerzo”. Trabajo de grado. Ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander (UIS). 2011.

**[32]** QUIROZ, Gilberto Andrés y SANTAMARIA, Ruth Myriam. “Evaluación del efecto del ataque de sulfatos sobre concretos, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU)”. Trabajo de grado. Ingeniero(a) Metalúrgico (a). Universidad Industrial de Santander (UIS). 2010.

**[33]** SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. “Tecnología del concreto y del mortero”. Bhandar editores Ltda. Pontificia Universidad Javeriana. 1996.

**[34]** SOLÍS, Rómel; MORENO, Erik y CASTILLO, William. “Predicción de la resistencia del concreto con base en la VPU y un índice de calidad de los agregados”. En: Ingeniería, Universidad autónoma de Yucatán. Mayo-Agosto 2004, Vol. 8, no 2, p 41-52.

**[35]** TAGHADDOS, H; SOLEYMANI, H.R. y ROBSON, J.D. “Precisión de las pruebas de resistencia a compresión del concreto con especímenes cilíndricos de diferentes tamaños”. En: ACI Centro y Sur México. Enero-Febrero-Marzo 2011. p. 32-42.

**[36]** TURGUT, P. y KUCUK, O.F. “Comparative Relationships of Direct, Indirect, and Semi-Direct Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in Concrete”. En: Russian Journal of Nondestructive Testing, 2006, Vol. 42, No. 11, p. 745–751.

## ANEXOS

### ANEXO A. Cálculos y diseño de mezcla siguiendo el método ACI.

#### CALCULOS DISEÑO DE MEZCLA METODO ACI

	$d=m/v$	$v=m/d$	$m=dv$		<b>PARA 1 m<sup>3</sup> = 1000 L</b>																								
ASENTAMIENTO (mm):	50-100				<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #ff0000; color: white;"> <th>CONSTITUYENTE</th> <th>MASA (Kg)</th> <th>DENSIDAD (Kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>VOLUMEN (m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AGUA</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">202,000</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">1000,0</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">0,2020</td> </tr> <tr> <td>CEMENTO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">404,000</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">3030,0</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">0,1333</td> </tr> <tr> <td>AGREG. GRUESO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">929,055</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">2659,0</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">0,3494</td> </tr> <tr> <td>AGREG. FINO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">823,564</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">2612,0</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">0,3153</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="background-color: #008000; color: white;">Vol Total (m<sup>3</sup>)= 1,0000</td> </tr> </tbody> </table>	CONSTITUYENTE	MASA (Kg)	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	AGUA	202,000	1000,0	0,2020	CEMENTO	404,000	3030,0	0,1333	AGREG. GRUESO	929,055	2659,0	0,3494	AGREG. FINO	823,564	2612,0	0,3153				Vol Total (m <sup>3</sup> )= 1,0000
CONSTITUYENTE	MASA (Kg)	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )																										
AGUA	202,000	1000,0	0,2020																										
CEMENTO	404,000	3030,0	0,1333																										
AGREG. GRUESO	929,055	2659,0	0,3494																										
AGREG. FINO	823,564	2612,0	0,3153																										
			Vol Total (m <sup>3</sup> )= 1,0000																										
TMN (mm,in):	19, 3/4																												
% AIRE:	2,0																												
AGUA (Kg):	202																												
<b>a/c</b>	<b>0,5</b>																												
F'cr (Kg/cm <sup>2</sup> ):	259																												
CEMENTO (Kg):	AGUA (Kg)/a/c	404																											
MUC grueso (Kg):	1523,153																												
AGREG. GRUESO (m <sup>3</sup> ):	Módulo de finura:	2,82	(b/bo)	0,61																									
	bo=MUC/densidad aparente de la grava sss	0,572829																											
AGREG. FINO (m <sup>3</sup> ):	0,3153																												
					Vol (H <sub>2</sub> O)+Vol (cemento) + Vol (AG) + Vol (AF)=1																								
					b= (b/bo)*bo <span style="background-color: #ffff00;">0,3494</span>																								
VOL. MOLDE (m <sup>3</sup> ):	V=pi.r <sup>2</sup> .h	0,001647			<b>28</b>																								
	r (m)=	0,0508			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #ff0000; color: white;"> <th>CONSTITUYENTE</th> <th>MASA (Kg) 1 m<sup>3</sup></th> <th>MASA (Kg) 1 probeta</th> <th>MASA (Kg) total probetas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AGUA</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">202,000</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">0,3175</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">8,89</td> </tr> <tr> <td>CEMENTO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">404,000</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">0,6346</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">17,77</td> </tr> <tr> <td>AGREG. GRUESO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">929,055</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">1,4600</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">40,88</td> </tr> <tr> <td>AGREG. FINO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">823,564</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">1,2942</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">36,24</td> </tr> </tbody> </table>	CONSTITUYENTE	MASA (Kg) 1 m <sup>3</sup>	MASA (Kg) 1 probeta	MASA (Kg) total probetas	AGUA	202,000	0,3175	8,89	CEMENTO	404,000	0,6346	17,77	AGREG. GRUESO	929,055	1,4600	40,88	AGREG. FINO	823,564	1,2942	36,24				
CONSTITUYENTE	MASA (Kg) 1 m <sup>3</sup>	MASA (Kg) 1 probeta	MASA (Kg) total probetas																										
AGUA	202,000	0,3175	8,89																										
CEMENTO	404,000	0,6346	17,77																										
AGREG. GRUESO	929,055	1,4600	40,88																										
AGREG. FINO	823,564	1,2942	36,24																										
	h (m)=	0,2032																											
VOL. MOLDE (m <sup>3</sup> ):	V=0,3x0,3x0,25	0,0225			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>CONSTITUYENTE</th> <th>MASA (Kg) 4 probetas 30x30x25 cm<sup>3</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AGUA</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">18.18</td> </tr> <tr> <td>CEMENTO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">36.35</td> </tr> <tr> <td>AGREG. GRUESO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">83.61</td> </tr> <tr> <td>AGREG. FINO</td> <td style="background-color: #008000; color: white;">74.12</td> </tr> </tbody> </table>	CONSTITUYENTE	MASA (Kg) 4 probetas 30x30x25 cm <sup>3</sup>	AGUA	18.18	CEMENTO	36.35	AGREG. GRUESO	83.61	AGREG. FINO	74.12														
CONSTITUYENTE	MASA (Kg) 4 probetas 30x30x25 cm <sup>3</sup>																												
AGUA	18.18																												
CEMENTO	36.35																												
AGREG. GRUESO	83.61																												
AGREG. FINO	74.12																												

El diseño de mezcla utilizado en esta investigación, se realizó bajo especificaciones del método ACI 211, el cual se basa en tablas empíricas experimentales mediante las cuales se definen algunos parámetros y se determinan cada uno de los componentes de la mezcla. A continuación se describen cada uno de los pasos a seguir.

## **I. Selección de un asentamiento**

Este valor es escogido dependiendo de la aplicación del hormigón, en este caso basándose en una consistencia media y una aplicación en vigas de construcción, muros reforzados y columnas para edificios, se determina como asentamiento adecuado el comprendido entre 50 mm a 100 mm, según las especificaciones de la respectiva norma técnica.

## **II. Determinación de la dosis de agua**

La cantidad de agua por unidad de volumen que se requiere para la elaboración de la mezcla se calcula en función del asentamiento y el tamaño máximo nominal del agregado grueso, teniendo en cuenta que el asentamiento para nuestro diseño de mezcla esta entre 50-100 mm y el tamaño máximo del agregado grueso es de  $\frac{3}{4}$ " (19 mm) se encontró que la cantidad de agua es de 202 Kg/m<sup>3</sup>. Adicionalmente se determinó un porcentaje de aire del 2%, de acuerdo a las tablas especificadas por la norma ACI.

## **III. Determinación del contenido de cemento**

La cantidad de cemento se obtiene al relacionar la masa de agua determinada y la razón Agua/Cemento definida. Teniendo en cuenta que para esta investigación se definió una relación agua/cemento = 0.5, el contenido de cemento comprendido fue de 404 Kg.

## **IV. Determinación de volumen del agregado grueso**

El contenido del agregado grueso se calcula a partir de la siguiente expresión:

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

b = Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

$b/b_o$  = Volumen seco y compactado del agregado grueso por volumen unitario de concreto.

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

La relación  $b/b_o$  se determina en función del módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo del agregado grueso, mediante una tabla presentada en la respectiva normatividad, obteniéndose como resultado de esta relación 0,61.

Para este diseño la masa unitaria compactada del agregado grueso es de 1523,153 Kg/cm<sup>3</sup> y la densidad aparente seca del agregado grueso es de 2659 Kg/cm<sup>3</sup>, por lo tanto  $b_o$  es igual a 0,5728 y el volumen del agregado grueso ( $b$ ) igual a 0,3494 m<sup>3</sup>.

## **V. Contenido de agregado fino**

El volumen del agregado fino a utilizar en la mezcla se determina al restar de un metro cúbico de concreto la suma de los volúmenes de cada uno de los componentes de la mezcla, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_{af} = 1 - (V_{H2O} + V_c + V_{ag})$$

Donde:

$V_{af}$  es volumen de agregado fino (m<sup>3</sup>)

$V_{H2O}$  es volumen de agua (m<sup>3</sup>)

$V_c$  es volumen de cemento (m<sup>3</sup>)

$V_{ag}$  es volumen de agregado grueso (m<sup>3</sup>)

Reemplazando cada uno de los volúmenes obtenidos en la ecuación anterior se obtiene que el volumen del agregado fino es de 0,3153 m<sup>3</sup>, finalmente este resultado es multiplicado por su densidad aparente con el fin de calcular su cantidad en kilogramos.

**ANEXO B.** Tabla de datos de la VPU leída por el método directo en especímenes cilíndricos de concreto.

Tiempo (Días)	Longitud (mm)	Tiempo de tránsito (µs)			VPU (m/s)			promedio
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3	
3	209,04	62,10	63,70	60,60	3366,18	3281,63	3449,50	3247,30
		62,10	63,60	61,10	3366,18	3286,79	3421,28	
	209,10	62,10	66,20	71,20	3367,15	3158,61	2936,80	
		61,80	65,40	70,90	3383,50	3197,25	2949,22	
5	209,60	63,50	64,80	69,20	3300,79	3234,57	3028,90	3413,24
		63,50	64,80	69,90	3249,61	3234,57	2998,57	
	208,00	64,80	61,40	63,20	3200,00	3387,62	3291,14	
		65,00	62,10	63,30	3209,88	3349,44	3285,94	
7	209,05	60,40	60,90	61,40	3461,09	3432,68	3404,72	3494,79
		60,70	60,20	61,40	3443,99	3472,59	3404,72	
	209,25	62,10	61,30	61,60	3369,57	3413,54	3396,92	
		62,00	61,50	62,40	3375,00	3402,44	3353,37	
14	208,86	60,70	61,20	61,00	3426,69	3398,69	3409,84	3604,49
		61,10	61,50	61,30	3404,26	3382,11	3393,15	
	208,39	60,00	60,80	60,40	3447,67	3402,30	3424,83	
		60,10	60,80	59,90	3441,93	3402,30	3453,42	
28	207,62	58,40	59,50	58,70	3568,32	3502,35	3550,09	3628,10
		58,50	59,50	58,80	3562,22	3502,35	3544,05	
	208,23	59,80	59,70	59,70	3471,91	3477,72	3477,72	
		59,80	60,20	59,90	3471,91	3448,84	3466,11	
56	209,87	58,20	58,50	59,10	3577,84	3559,49	3523,35	3651,22
		58,30	58,90	59,20	3571,70	3535,31	3517,40	
	207,56	60,10	61,10	60,20	3453,58	3397,05	3447,84	
		60,30	61,50	60,50	3442,12	3374,96	3430,74	
3	208,82	57,80	59,10	57,40	3630,97	3551,10	3656,27	3628,10
		57,90	58,90	57,80	3624,70	3563,16	3630,97	
	208,61	57,00	57,50	57,20	3663,51	3631,65	3650,70	
		56,90	57,70	57,80	3669,95	3619,06	3612,80	
5	208,59	57,40	58,50	56,70	3634,32	3565,98	3679,19	3651,22
		57,40	58,80	56,60	3634,32	3547,79	3685,69	
	208,65	59,10	58,10	59,30	3529,44	3590,19	3517,54	
		59,10	58,60	59,10	3529,44	3559,56	3529,44	
7	207,61	57,40	57,20	57,80	3635,02	3647,73	3609,86	3651,22
		57,00	57,40	58,40	3660,53	3635,02	3572,77	
	208,12	56,90	56,70	56,70	3648,68	3661,55	3661,55	
		56,40	56,20	56,80	3681,03	3694,13	3655,11	
14	208,12	56,90	57,60	57,40	3657,64	3613,19	3625,78	3651,22
		57,00	57,70	57,10	3651,23	3606,93	3644,83	
	206,69	57,60	57,80	57,70	3588,37	3575,95	3582,15	
		57,80	57,30	57,70	3575,95	3607,16	3582,15	
28	208,76	56,30	56,20	56,40	3707,99	3714,59	3701,42	3651,22
		56,30	56,20	56,20	3707,99	3714,59	3714,59	
	208,81	57,50	57,70	57,70	3631,48	3618,89	3618,89	
		57,40	57,90	57,60	3637,80	3606,39	3625,17	
56	209,30	58,30	59,10	58,50	3590,05	3541,46	3577,78	3651,22
		58,70	59,00	58,60	3565,59	3547,46	3571,67	
3	208,32	56,80	55,50	56,20	3667,61	3753,51	3706,76	3651,22
		56,30	55,80	56,70	3700,18	3733,33	3674,07	

**ANEXO C.** Tabla de datos de la VPU leído por el Método directo en espécimen de 30x30x25 cm<sup>3</sup>, evaluando superficies A-C

Tiempo (días)	Filas	VPU (m/s)						promedio
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
3	1	3264,42	3243,24	3232,76	3260,87	3278,69	3325,94	3342,72
		3278,69	3246,75	3222,34	3260,87	3267,97	3374,58	
	2	3282,28	3267,97	3229,28	3282,28	3232,76	3191,49	
		3289,47	3285,87	3271,54	3239,74	3250,27	3215,43	
	3	3428,57	3370,79	3303,96	3303,96	3307,61	3329,63	
3397,51		3401,36	3325,94	3314,92	3314,92	3344,48		
4	3420,75	3405,22	3367,00	3322,26	3363,23	3382,19		
	3440,37	3432,49	3382,19	3307,61	3386,00	3374,58		
5	3480,28	3512,88	3456,22	3500,58	3452,24	3386,00		
	3436,43	3500,58	3480,28	3488,37	3460,21	3386,00		
5	1	3456,22	3424,66	3401,36	3420,75	3452,24	3533,57	3485,3
		3452,24	3444,32	3397,51	3409,09	3472,22	3554,50	
	2	3468,21	3412,97	3401,36	3424,66	3386,00	3412,97	
		3448,28	3393,67	3401,36	3416,86	3386,00	3440,37	
	3	3521,13	3460,21	3460,21	3460,21	3428,57	3468,21	
3546,10		3492,43	3464,20	3424,66	3448,28	3464,20		
4	3554,50	3550,30	3480,28	3416,86	3492,43	3508,77		
	3584,23	3546,10	3504,67	3436,43	3512,88	3508,77		
5	3567,18	3614,46	3584,23	3554,50	3614,46	3525,26		
	3584,23	3618,82	3588,52	3571,43	3627,57	3521,13		
7	1	3631,96	3579,95	3567,18	3550,30	3605,77	3654,08	3648,84
		3631,96	3605,77	3575,69	3588,52	3623,19	3676,47	
	2	3597,12	3575,69	3584,23	3597,12	3537,74	3605,77	
		3597,12	3592,81	3592,81	3605,77	3554,50	3605,77	
	3	3685,50	3636,36	3618,82	3601,44	3558,72	3610,11	
3694,58		3658,54	3640,78	3610,11	3562,95	3623,19		
4	3717,47	3699,14	3658,54	3605,77	3663,00	3658,54		
	3717,47	3690,04	3649,64	3610,11	3658,54	3680,98		
5	3754,69	3778,34	3754,69	3764,12	3754,69	3690,04		
	3759,40	3787,88	3783,10	3787,88	3764,12	3703,70		
14	1	3712,87	3699,14	3663,00	3649,64	3731,34	3783,10	3757,96
		3731,34	3667,48	3667,48	3671,97	3731,34	3768,84	
	2	3740,65	3699,14	3712,87	3717,47	3645,20	3708,28	
		3722,08	3708,28	3690,04	3676,47	3649,64	3680,98	
	3	3807,11	3735,99	3754,69	3745,32	3676,47	3722,08	
3807,11		3764,12	3759,40	3731,34	3717,47	3764,12		
4	3826,53	3783,10	3787,88	3722,08	3768,84	3787,88		
	3807,11	3797,47	3773,58	3712,87	3745,32	3783,10		
5	3891,05	3880,98	3880,98	3851,09	3870,97	3831,42		
	3861,00	3856,04	3870,97	3851,09	3875,97	3846,15		
28	1	3841,23	3792,67	3792,67	3764,12	3841,23	3875,97	3873,62
		3831,42	3811,94	3792,67	3778,34	3836,32	3880,98	
	2	3831,42	3792,67	3811,94	3836,32	3811,94	3856,04	
		3821,66	3816,79	3807,11	3826,53	3836,32	3836,32	
	3	3901,17	3880,98	3816,79	3831,42	3802,28	3861,00	
3906,25		3846,15	3836,32	3846,15	3816,79	3861,00		
4	3973,51	3916,45	3886,01	3831,42	3841,23	3921,57		
	3963,01	3911,34	3891,05	3831,42	3851,09	3937,01		
5	3952,57	3968,25	3978,78	3994,67	3978,78	3937,01		
	4005,34	4000,00	3984,06	3994,67	3994,67	3942,18		
56	1	3942,18	3916,45	3865,98	3865,98	3947,37	3978,78	3960,13
		3937,01	3886,01	3851,09	3856,04	3921,57	3978,78	
	2	3963,01	3937,01	3891,05	3926,70	3891,05	3891,05	
		3957,78	3937,01	3901,17	3916,45	3865,98	3880,98	
	3	4005,34	3942,18	3963,01	3947,37	3926,70	3947,37	
4005,34		3947,37	3952,57	3937,01	3916,45	3957,78		
4	4037,69	3984,06	3926,70	3886,01	3947,37	4010,70		
	4032,26	4010,70	3937,01	3911,34	3947,37	3994,67		
5	4048,58	4054,05	4037,69	4048,58	4081,63	4037,69		
	4043,13	4048,58	4065,04	4048,58	4070,56	4043,13		

**Anexo C. Tabla de datos de la VPU leído por el método directo en espécimen de 30x30x25 cm<sup>3</sup> evaluando superficies B-D.**

Tiempo (días)	Filas	VPU (m/s)						promedio
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
3	1	3329,63	3307,61	3293,08	3293,08	3289,47	3300,33	3347,6198
		3355,70	3337,04	3289,47	3303,96	3296,70	3289,47	
	2	3359,46	3250,27	3246,75	3285,87	3311,26	3300,33	
		3370,79	3267,97	3289,47	3285,87	3307,61	3296,70	
	3	3340,76	3322,26	3300,33	3271,54	3282,28	3329,63	
3325,94		3340,76	3300,33	3264,42	3275,11	3340,76		
4	3393,67	3370,79	3363,23	3307,61	3351,96	3382,19		
	3428,57	3378,38	3389,83	3303,96	3348,21	3367,00		
5	3508,77	3452,24	3444,32	3424,66	3472,22	3424,66		
	3558,72	3456,22	3456,22	3420,75	3480,28	3420,75		
5	1	3448,28	3444,32	3416,86	3472,22	3393,67	3378,38	3479,02393
		3464,20	3480,28	3432,49	3480,28	3397,51	3401,36	
	2	3529,41	3397,51	3432,49	3409,09	3386,00	3405,22	
		3525,26	3401,36	3401,36	3412,97	3432,49	3424,66	
	3	3480,28	3468,21	3440,37	3405,22	3420,75	3484,32	
3480,28		3472,22	3456,22	3424,66	3432,49	3500,58		
4	3571,43	3508,77	3464,20	3452,24	3460,21	3492,43		
	3567,18	3492,43	3468,21	3480,28	3484,32	3521,13		
5	3627,57	3546,10	3546,10	3533,57	3592,81	3588,52		
	3610,11	3567,18	3571,43	3541,91	3614,46	3605,77		
7	1	3649,64	3618,82	3562,95	3605,77	3575,69	3588,52	3673,15568
		3654,08	3631,96	3584,23	3627,57	3592,81	3592,81	
	2	3726,71	3601,44	3592,81	3631,96	3649,64	3627,57	
		3717,47	3592,81	3623,19	3631,96	3658,54	3645,20	
	3	3658,54	3685,50	3649,64	3601,44	3627,57	3690,04	
3671,97		3690,04	3654,08	3627,57	3631,96	3694,58		
4	3726,71	3699,14	3640,78	3623,19	3658,54	3676,47		
	3735,99	3685,50	3676,47	3649,64	3640,78	3676,47		
5	3807,11	3750,00	3802,28	3754,69	3759,40	3802,28		
	3836,32	3768,84	3807,11	3759,40	3792,67	3792,67		
14	1	3759,40	3740,65	3726,71	3731,34	3717,47	3722,08	3780,93324
		3792,67	3745,32	3722,08	3735,99	3717,47	3708,28	
	2	3851,09	3690,04	3703,70	3708,28	3731,34	3745,32	
		3826,53	3676,47	3708,28	3712,87	3745,32	3731,34	
	3	3768,84	3768,84	3703,70	3708,28	3726,71	3783,10	
3764,12		3787,88	3740,65	3712,87	3722,08	3787,88		
4	3836,32	3783,10	3778,34	3764,12	3783,10	3802,28		
	3826,53	3807,11	3778,34	3740,65	3773,58	3797,47		
5	3947,37	3886,01	3901,17	3851,09	3901,17	3911,34		
	3937,01	3891,05	3880,98	3870,97	3896,10	3886,01		
28	1	3886,01	3901,17	3841,23	3851,09	3811,94	3787,88	3873,74808
		3886,01	3906,25	3807,11	3841,23	3816,79	3778,34	
	2	3916,45	3792,67	3797,47	3807,11	3807,11	3821,66	
		3911,34	3792,67	3807,11	3816,79	3802,28	3811,94	
	3	3891,05	3906,25	3836,32	3816,79	3870,97	3901,17	
3851,09		3886,01	3851,09	3802,28	3846,15	3906,25		
4	3886,01	3901,17	3861,00	3875,97	3880,98	3921,57		
	3911,34	3891,05	3870,97	3861,00	3886,01	3891,05		
5	3989,36	3952,57	3931,85	3942,18	3952,57	3973,51		
	3989,36	3931,85	3921,57	3931,85	3942,18	3963,01		
56	1	3989,36	3942,18	3870,97	3916,45	3906,25	3886,01	3963,64007
		3984,06	3963,01	3875,97	3906,25	3870,97	3901,17	
	2	4021,45	3856,04	3896,10	3901,17	3926,70	3916,45	
		4000,00	3865,98	3901,17	3901,17	3942,18	3931,85	
	3	3942,18	3957,78	3937,01	3891,05	3906,25	3968,25	
3973,51		3968,25	3942,18	3880,98	3916,45	3963,01		
4	4016,06	3968,25	3926,70	3926,70	3947,37	3984,06		
	4032,26	3968,25	3952,57	3906,25	3942,18	3957,78		
5	4132,23	4065,04	4087,19	4070,56	4087,19	4076,09		
	4115,23	4065,04	4081,63	4059,54	4059,54	4070,56		

**ANEXO D.** Tabla de datos de la VPU leído por el método semidirecto, a distancia constante entre palpadores.

Días	Fila	Superficies A-B			Superficies C-D		
		Tiempo (µs)	VPU (m/s)	VPU promedio	Tiempo (µs)	VPU (m/s)	VPU promedio
3	1	59,50	3126,05	3373,61	55,30	3363,47	3401,50
		59,70	3115,58		55,40	3357,40	
	2	55,10	3375,68		54,60	3406,59	
		55,60	3345,32		55,40	3357,40	
	3	54,60	3406,59		55,00	3381,82	
55,40		3357,40	54,80		3394,16		
4	54,90	3387,98	54,80		3394,16		
	54,40	3419,12	54,60		3406,59		
5	51,70	3597,68	53,80		3457,25		
	51,60	3604,65	53,20		3496,24		
5	1	54,50	3412,84	3588,37	50,80	3661,42	3662,05
		54,20	3431,73		51,10	3639,92	
	2	53,00	3509,43		50,00	3720,00	
		53,20	3496,24		50,60	3675,89	
	3	51,60	3604,65		52,20	3563,22	
51,20		3632,81	52,10		3570,06		
4	51,50	3611,65	51,40		3618,68		
	50,80	3661,42	51,30		3625,73		
5	49,70	3742,45	49,30		3772,82		
	49,20	3780,49	49,30		3772,82		
7	1	51,90	3583,82	3766,25	48,80	3811,48	3892,33
		52,50	3542,86		48,60	3827,16	
	2	50,10	3712,57		47,70	3899,37	
		50,20	3705,18		47,50	3915,79	
	3	49,80	3734,94		48,50	3835,05	
49,90		3727,45	48,80		3811,48		
4	48,90	3803,68	47,40		3924,05		
	48,40	3842,98	47,50		3915,79		
5	46,80	3974,36	46,90		3965,88		
	46,10	4034,71	46,30		4017,28		
14	1	49,10	3788,19	3992,24	46,50	4000,00	4079,93
		49,60	3750,00		46,60	3991,42	
	2	46,40	4008,62		45,70	4070,02	
		46,50	4000,00		45,80	4061,14	
	3	47,10	3949,04		45,90	4052,29	
46,90		3965,88	46,00		4043,48		
4	45,20	4115,04	45,00		4133,33		
	45,60	4078,95	45,50		4087,91		
5	45,10	4124,17	44,70		4161,07		
	44,90	4142,54	44,30		4198,65		
28	1	47,00	3957,45	4072,58	45,20	4115,04	4089,80
		47,20	3940,68		45,00	4133,33	
	2	47,20	3940,68		45,80	4061,14	
		47,00	3957,45		45,70	4070,02	
	3	44,90	4142,54		46,20	4025,97	
45,00		4133,33	46,30		4017,28		
4	44,70	4161,07	46,40		4008,62		
	44,70	4161,07	46,70		3982,87		
5	44,50	4179,78	43,60		4266,06		
	44,80	4151,79	44,10		4217,69		
56	1	47,60	3907,56	4125,56	44,70	4161,07	4258,60
		47,70	3899,37		44,60	4170,40	
	2	44,70	4161,07		43,90	4236,90	
		44,80	4151,79		44,10	4217,69	
	3	44,50	4179,78		44,40	4189,19	
44,80		4151,79	44,00		4227,27		
4	44,40	4189,19	42,90		4335,66		
	44,20	4208,14	43,00		4325,58		
5	44,10	4217,69	42,50		4376,47		
	44,40	4189,19	42,80		4345,79		

**ANEXO E.** Tabla de datos de la VPU leído por el método semidirecto variando la distancia entre los palpadores. Evaluación en las superficies A-B.

Tiempo (Días)	VPU SEMIDIRECTO (m/s)							promedio
	Fila	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
3	1	3413,28	3446,72	3476,14	3493,68	3476,68	3408,49	3472,61
		3371,60	3455,08	3409,44	3486,20	3453,03	3414,48	
	3	3531,13	3536,52	3464,18	3409,62	3453,03	3387,71	
		3553,85	3540,92	3504,36	3409,62	3459,75	3417,48	
		5	3504,24	3545,32	3480,14	3497,43	3511,04	
3486,54	3527,77		3480,14	3504,95	3546,08	3484,85		
5	1	3576,87	3585,46	3562,22	3550,76	3625,68	3516,35	3650,39
		3619,06	3558,60	3579,10	3520,09	3599,97	3522,72	
	3	3691,63	3668,52	3617,68	3662,47	3618,30	3548,44	
		3652,57	3692,28	3622,02	3670,72	3607,28	3551,68	
	5	3798,27	3790,48	3715,57	3716,76	3744,12	3732,33	
		3756,93	3755,52	3724,74	3750,98	3771,94	3735,91	
7	1	3638,13	3721,20	3790,16	3742,37	3755,99	3672,41	3765,96
		3657,40	3692,28	3738,57	3738,07	3720,59	3675,89	
	3	3767,18	3785,44	3790,16	3763,97	3720,59	3668,95	
		3762,04	3750,58	3780,68	3772,69	3689,69	3672,41	
	5	3862,01	3872,88	3833,45	3834,82	3816,51	3820,32	
14	1	3777,48	3815,85	3828,60	3917,79	3896,02	3858,22	3941,61
		3803,50	3836,39	3907,84	3922,50	3891,75	3858,22	
	3	3933,53	3953,45	3959,06	3941,48	3887,49	3862,05	
		3950,42	3910,07	3912,90	3931,97	3879,00	3846,77	
	5	4048,89	4066,25	4049,28	4034,16	4046,89	4009,37	
28	1	3967,44	3942,52	4038,45	4004,42	3996,81	3964,41	4053,50
		3933,53	3937,07	4001,01	3984,84	3965,59	3948,31	
	3	4054,83	4054,68	4033,06	4064,34	4056,13	3976,57	
		4042,96	4060,45	4054,71	4059,28	4033,11	3964,41	
	5	4177,52	4131,07	4149,40	4152,36	4136,40	4155,01	
		4139,94	4167,31	4149,40	4141,81	4136,40	4150,57	
56	1	4025,28	4066,25	4087,63	4054,23	4051,50	4034,32	4125,85
		4037,05	4072,06	4071,11	4049,19	4070,07	4038,51	
	3	4164,92	4131,07	4143,71	4136,55	4079,41	4076,61	
		4146,16	4143,08	4138,03	4120,86	4088,80	4063,83	
	5	4209,36	4254,39	4201,34	4157,65	4175,29	4213,53	
		4190,20	4235,42	4218,94	4200,52	4165,50	4218,10	

**ANEXO E.** Tabla de datos de la VPU leído por el método semidirecto variando la distancia entre los palpadores. Evaluación en las superficies C-D.

Tiempo (días)	Fila	VPU SEMIDIRECTO (m/s)						Promedio
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
3	1	3477,76 3486,54	3467,69 3471,91	3464,18 3444,43	3516,29 3523,89	3483,50 3459,75	3364,26 3378,88	3518,32
	3	3486,54 3464,67	3585,46 3563,05	3553,84 3516,60	3497,43 3501,18	3436,33 3453,03	3426,51 3438,63	
	5	3553,85 3590,82	3545,32 3567,51	3234,22 3657,10	3658,36 3654,26	3697,36 3693,52	3672,41 3672,41	
5	1	3628,57 3672,00	3663,80 3677,99	3604,73 3626,36	3716,76 3683,17	3567,44 3607,28	3554,92 3545,20	3661,25
	3	3604,88 3628,57	3673,25 3706,68	3657,10 3652,67	3633,89 3629,85	3542,54 3504,11	3516,35 3554,92	
	5	3736,59 3731,54	3760,47 3750,58	3761,84 3738,57	3674,86 3716,76	3767,94 3771,94	3753,95 3786,84	
7	1	3803,50 3782,66	3775,42 3770,42	3738,57 3711,01	3812,40 3807,95	3763,95 3800,18	3648,30 3651,73	3790,31
	3	3767,18 3767,18	3831,23 3826,09	3794,93 3757,17	3803,50 3825,82	3693,52 3678,23	3732,33 3686,34	
	5	3803,50 3819,28	3878,15 3867,62	3897,76 3853,01	3852,96 3848,41	3820,61 3832,97	3873,59 3873,59	
14	1	3967,44 3950,42	3931,64 3931,64	3907,84 3938,41	3960,63 3970,28	3943,58 3930,50	3862,05 3858,22	3970,23
	3	3950,42 3939,14	4020,36 3992,21	3953,88 3948,71	3989,72 3951,03	3887,49 3883,24	3889,09 3896,88	
	5	4025,28 4054,83	4009,06 4037,45	4043,86 4082,11	4059,28 4100,13	4001,31 4033,11	4009,37 4017,65	
28	1	3984,62 3978,88	3981,06 3992,21	3969,46 3985,17	3951,03 3994,61	3974,46 3983,37	3924,41 3900,79	4043,04
	3	4042,96 4031,15	4131,07 4095,46	4160,83 4054,71	4157,65 4115,66	4005,83 4001,31	3960,37 3976,57	
	5	4054,83 4042,96	4054,68 4060,45	4093,17 4098,73	4157,65 4168,29	4098,23 4126,79	4098,09 4141,73	
56	1	4115,26 4127,56	4119,13 4101,35	4098,73 4071,11	4049,19 4089,84	4033,11 4051,50	4009,37 4005,24	4150,77
	3	4158,64 4139,94	4191,82 4179,53	4132,37 4138,03	4131,31 4136,55	4102,96 4065,41	4093,78 4076,61	
	5	4241,69 4241,69	4254,39 4235,42	4272,65 4290,85	4283,31 4288,95	4219,91 4235,00	4218,10 4227,27	

**ANEXO F.** Tabla de datos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

Tiempo	Diámetro	Carga máxima	Área	Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión	Resistencia promedio
(Días)	(mm)	(Kg.f)	(Cm <sup>2</sup> )	(Kg/Cm <sup>2</sup> )	Mpa	Mpa
3	103,76	6700	84,56	79,24	7,77	8,59
	103,56	7000	84,23	83,10	8,15	
	104,48	8000	85,73	93,31	9,15	
	103,64	8000	84,36	94,83	9,30	
5	103,16	9800	83,58	117,25	11,50	11,32
	104,43	9500	85,65	110,91	10,88	
	104,52	10000	85,80	116,55	11,43	
	104,39	10000	85,59	116,84	11,46	
7	103,33	11000	83,86	131,17	12,86	11,71
	104,81	9500	86,28	110,11	10,80	
	104,62	9700	85,96	112,84	11,07	
	103,12	10300	83,52	123,33	12,09	
14	103,56	12500	84,23	148,40	14,55	14,13
	104,73	12900	86,15	149,75	14,69	
	103,84	10700	84,69	126,35	12,39	
	103,58	12800	84,26	151,90	14,90	
28	103,93	16100	84,83	189,78	18,61	18,26
	103,75	15300	84,54	180,98	17,75	
	103,18	15200	83,61	181,79	17,83	
	103,24	16100	83,71	192,33	18,86	
56	103,41	16200	83,99	192,89	18,92	19,08
	104,21	16600	85,29	194,63	19,09	
	104,35	16300	85,52	190,60	18,69	
	104,30	17100	85,44	200,14	19,63	

**ANEXO G.** Tabla de datos de VPU semidirecto a distancia variable, en especímenes de 30x30x25 cm<sup>3</sup> después de 56 días de curado.

Especímen	Fila	VPU Semidirecto (m/s)						Promedio
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
1	1	3731,54	3836,39	3900,27	3896,71	3812,41	3873,59	3958,12
	3	3782,65	3942,51	4011,63	3984,84	4005,82	4017,65	
	5	3927,93	4037,44	4093,17	4115,65	4056,12	4063,83	
	1	3751,82	3862,38	3857,93	3830,31	3837,11	3877,45	
	3	3782,65	3942,51	4011,63	3984,84	4005,82	4017,65	
2	5	3927,93	4037,44	4093,17	4115,65	4056,12	4063,83	3971,67
	1	3762,04	3899,36	3843,20	3807,94	3857,94	3900,78	
	3	3777,48	3953,45	4011,63	3989,71	4028,53	4005,23	
	5	3956,07	4031,73	4071,10	4084,71	4028,53	4059,59	
	1	3825,75	3931,74	3951,55	3917,79	3958,96	3962,39	
3	3	3904,88	3954,45	3999,46	4021,82	4038,40	4044,91	4003,84
	5	3959,57	4049,92	4107,09	4163,96	4156,75	4119,80	
	1	3774,90	3923,52	3935,85	3922,50	3990,08	3938,32	
	3	3905,71	3967,21	3946,13	3994,61	4012,61	3997,01	
	5	3947,59	4026,04	4057,44	4066,88	4035,40	4053,24	
3	1	3989,75	3974,74	3984,55	3987,79	3989,96	3987,49	4050,04
	3	4019,88	4023,45	3998,46	4050,82	4039,00	4044,91	
	5	4110,57	4099,92	4115,09	4178,86	4157,75	4147,80	
	5	4110,57	4099,92	4115,09	4178,86	4157,75	4147,80	

**ANEXO H.** Tabla de datos de VPU semidirecto a distancia constante en especímenes de 30x30x25 cm<sup>3</sup> después de 56 días.

Fila	VPU semidirecto (m/s)					
	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
1	3831,04	3808,59	3831,04	3892,22	3915,66	3947,37
	3853,75	3779,07	3823,53	3907,82	3907,82	3907,82
2	3939,39	3907,82	3947,37	3947,37	3987,73	4004,11
	3955,38	3915,66	3979,59	3923,54	4004,11	4028,93
3	3987,73	3947,37	3995,90	4131,36	3987,73	4028,93
	3915,66	3939,39	3955,38	4079,50	4020,62	4054,05
4	3971,49	4012,35	4012,35	4140,13	4054,05	4070,98
	4004,11	4045,64	4004,11	4096,64	4079,50	4088,05
5	4054,05	4122,62	4088,05	4131,36	4096,64	4157,78
	4004,11	4157,78	4113,92	4140,13	4070,98	4122,62
promedio	<b>3951,63</b>	<b>3963,62</b>	<b>3975,11</b>	<b>4038,98</b>	<b>4012,47</b>	<b>4041,05</b>

**ANEXO I.** Tabla de datos de VPU directo en especímenes de 30x30x25 cm<sup>3</sup> después de 56 días.

Especímen	fila	VPU directo (m/s)						promedio
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
1	1	3625,67	3713,98	3629,99	3715,99	3680,70	3687,77	3764,97
	2	3689,65	3746,94	3723,10	3726,53	3750,11	3701,47	
	3	3721,66	3746,32	3736,70	3800,57	3775,34	3711,94	
	4	3746,04	3815,98	3850,01	3846,26	3841,51	3821,00	
	5	3765,34	3886,70	3886,13	3851,04	3879,26	3875,25	
	1	3680,98	3715,17	3764,12	3752,35	3731,34	3683,24	3800,89
	2	3740,65	3811,94	3783,10	3826,53	3807,11	3717,47	
	3	3715,17	3821,66	3821,66	3833,87	3809,52	3712,87	
	4	3729,02	3841,23	3883,50	3911,34	3868,47	3764,12	
	5	3764,12	3921,57	3937,01	3952,57	3937,01	3787,88	
2	1	3642,99	3742,98	3735,99	3735,99	3703,70	3687,77	3868,60
	2	3740,65	3811,94	3783,10	3826,53	3807,11	3717,47	
	3	3821,66	3836,32	3926,70	3952,57	3911,34	3811,94	
	4	3856,04	3865,98	3963,01	4032,26	3973,51	3861,00	
	5	3911,34	3926,70	4043,13	4065,04	4032,26	3906,25	
	1	3742,99	3743,56	3749,56	3774,35	3709,22	3699,34	3891,83
	2	3789,65	3821,94	3834,74	3899,34	3835,53	3798,23	
	3	3846,66	3878,32	3951,87	3966,33	3953,23	3889,24	
	4	3866,04	3900,98	3980,32	4032,26	3978,52	3889,23	
	5	3971,34	3966,70	4021,32	4086,93	4077,22	4099,83	
3	1	3821,42	3767,12	3801,42	3876,33	3859,63	3679,86	3905,67
	2	3794,12	3834,99	3822,44	3854,64	3877,17	3810,26	
	3	3856,12	3889,42	3978,95	3986,89	3959,31	3819,26	
	4	3909,23	3901,33	3995,29	4011,54	3943,99	3929,75	
	5	3985,75	4012,52	4031,32	4032,55	4093,69	4033,88	
	1	3798,29	3822,66	3832,41	3815,48	3887,39	3789,64	3919,67
	2	3866,59	3836,28	3843,24	3846,28	3841,42	3810,26	
	3	3952,93	3900,19	3964,36	3999,36	3963,27	3845,25	
	4	3933,66	3956,77	3964,88	4056,23	3983,13	3984,25	
	5	3989,71	4035,84	3994,78	4003,52	4084,68	3987,32	

