ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETO SIN REFUERZO A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) UTILIZANDO MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO

ANDRÉS ALFONSO AFANADOR MUÑOZ
MAURICIO ANDRÉS SANTACOLOMA HOYOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2013

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETO SIN REFUERZO A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) UTILIZANDO MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO

ANDRÉS ALFONSO AFANADOR MUÑOZ
MAURICIO ANDRÉS SANTACOLOMA HOYOS

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN REALIZADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTOR:
PHD. RICARDO CRUZ HERNÁNDEZ

CODIRECTORA:
MSC. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2013

AGRADECIMIENTOS

Ante todo a mi Dios por brindarme la sabiduría y oportunidad de culminar mis estudios profesionales, por guiarme con fortaleza y humildad.

A mi madre hermosa, que sin su apoyo, consejos y modelo a seguir nada de esto hubiera sido posible. Todo lo que soy, se lo debo a mi maravillosa madre. Atribuyo todos mis éxitos en esta vida a la enseñanza moral, intelectual y física que recibí de ella

A mi padre, hombre con grandes virtudes, sabio, puntual y cariñoso en sus consejos.

A mi hermosa novia Angélica Gómez quien siempre se mantuvo a mi lado con una voz de aliento, una frase de cariño y su maravillosa sencillez.

A mis hermanos Omar y Camilo Santacoloma por estar ahí frente al cañón a mi lado en múltiples ocasiones.

A mi compañero de proyecto por su constancia y por formar un gran trabajo en equipo.

A mis compañeros de Universidad quienes estuvieron en las buenas y en las malas muchas gracias!!

Mauricio A. Santacoloma Hoyos

AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias por enseñarme el camino de la sabiduría y la felicidad, por darme la vida y por permitirme compartir con mi familia y amigos este gran logro.

A mis padres, que con su apoyo han logrado que llegue a esta meta, porque con amor me han mostrado la belleza de la vida, con su ejemplo me han enseñado a vivir y a reír con el mundo, donde hemos compartido momentos felices, desvelos, ambiciones e inquietudes. Con paciencia han forjado en mí, sueños, ilusiones y esperanzas, me han hecho crecer como persona, ayudándome a salir adelante en momentos difíciles para hacer de mi lo que hoy soy. A su lado, la vida es un regalo divino, porque son y por siempre serán un ejemplo en mi vida. Gracias.

A mis hermanos Laura y Rafico por sus consejos y enseñanzas, por cada sonrisa y palabra de aliento que me brindaron para seguir adelante sin importar los obstáculos e inconvenientes que se presenten. A ellos dos gracias.

A mi novia Diana por todo su cariño, amor y comprensión, por estar siempre a mi lado para apoyarme y sacarme una sonrisa en los momentos en que mas lo necesitaba. Gracias.

A mis amigos y compañeros de universidad, en especial a mi compañero de proyecto por su apoyo y colaboración durante la realización del proyecto.

Andrés A. Afanador Muñoz

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 17
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18
1.2 OBJETIVOS 20
1.2.1 Objetivo general 20
1.2.2 Objetivos específicos 20
1.3 JUSTIFICACIÓN 20
2. FUNDAMENTO TEÓRICO 21
2.1 MÉTODO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) 21
2.1.1 Generalidades 21
2.1.2 Principio del método 22
2.1.3 Técnicas de medición 23
2.1.4 Influencia en las condiciones de ensayo 25
2.1.5 Estudios realizados sobre VPU directo e indirecto 26
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL 29
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 30
3.2 CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DE EQUIPOS 30
3.3 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS 31
3.3.1 Diseño de mezcla 31
3.3.2 Elaboración de moldes y probetas 32
3.3.3 Fraguado y curado 35
3.4 REALIZACIÓN DE ENSAYOS 36
3.4.1 Ensayo de inspección visual 36
3.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU) 36
3.4.5 Ensayo de compresión 40
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL 41
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS 42

4.1 ENSAYO DE INSPECCIÓN VISUAL 42
4.2 ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.....43
4.2.1 Velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión directa.....43
4.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión indirecta.....46
4.2.3 Relación entre los métodos de transmisión directa e indirecta 50
4.2.4 Relación entre la resistencia a la compresión y la VPU por transmisión directa 53
4.2.5 Relación entre la resistencia a la compresión y la VPU por transmisión indirecta 55
CONCLUSIONES 59
RECOMENDACIONES.....61
BIBLIOGRAFIA 65
ANEXOS.....68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ventajas del método de Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU). 22
Figura 2. Principio de medida de la velocidad ultrasónica por transmisión directa en el concreto. 23
Figura 3. Descripción de la técnica de transmisión semidirecta. 24
Figura 4. Técnica de medición indirecta. 25
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología experimental. 29
Figura 6 - Equipo de ultrasonido. 30
Figura 7. Dispositivo digital de ensayos de compresión. 31
Figura 8. Tipos de moldes para la realización de las probetas analizadas. 32
Figura 9. Moldes realizados en triplex. 33
Figura 10. Moldes de polipropileno. 34
Figura 11. Secado de cilindros en la empresa HOLCIM Floridablanca. 35
Figura 12. Esquema de la cuadricula para mayor precisión en las tomas de VPU en la probeta 1. 37
Figura 13. Disposición de los palpadores para la medición de VPU directo. 37
Figura 14. Disposición de los palpadores para la medición de VPU indirecto. 38
Figura 15. Esquema del bloque de concreto y la dirección en que se tomaron los datos de VPU. 39
Figura 16. Soporte utilizado para la toma de medidas de VPU. 39
Figura 17. Defectos superficiales hallados por medio de inspección visual. 43
Figura 18. Modelo obtenido para las medidas promedio de VPU vs tiempo, para la transmisión directa. 45
Figura 19. Modelo obtenido para las medidas de VPU vs tiempo, para la transmisión indirecta por la cara lateral. 47
Figura 20. Modelo obtenido para las medidas de VPU vs tiempo, para la transmisión indirecta por la cara frontal. 48

Figura 21. Modelo obtenido de VPU directo vs VPU indirecto, para la cara frontal. 51
Figura 22. Modelo obtenido de VPU directo vs VPU indirecto , para la cara lateral. 51
Figura 23. Modelo obtenido de la resistencia a la compresión F'c vs VPU directo. 54
Figura 24. Modelo obtenido de la resistencia a la compresión F'c vs VPU indirecto frontal. 56
Figura 25. Modelo obtenido de la resistencia a la compresión F'c vs VPU indirecto lateral. 57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de mezcla del concreto utilizado, suministrado por la empresa HOLCIM Floridablanca. 32
Tabla 2. Parámetros en el equipo de ultrasonido.....40
Tabla 3. Datos promedio de VPU directo por las caras lateral y frontal.....44
Tabla 4. Parámetros para el modelo obtenido de VPU directo vs tiempo.....45
Tabla 5. Datos promedio de VPU indirecto por la cara lateral. 46
Tabla 6. Parámetros para los modelos obtenidos de VPU indirecto vs tiempo, por las caras lateral y frontal. 48
Tabla 7. Datos promedio de VPU indirecto y VPU directo. 50
Tabla 8. Parámetros para el modelo obtenido de VPU directo vs VPU indirecto, para las caras lateral y frontal. 52
Tabla 9. Datos de resistencia a la compresión y de VPU directo para cada día de curado. 53
Tabla 10. Parámetros para el modelo obtenido de F'c vs VPU directo. 54
Tabla 11. Datos promedio de resistencia a la compresión y de VPU indirecto por las caras frontal y lateral. 56
Tabla 12. Parámetros para los modelos obtenidos de F'c vs VPU indirecto por las caras frontal y lateral. 57

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Promedio de VPU por el método de transmisión directa por la cara lateral para cada día de curado. 68

Anexo B. Promedio de VPU por el método de transmisión directa por la cara frontal para cada día de curado. 69

Anexo C. Promedio de VPU por el método de transmisión indirecta por la cara lateral para cada día de curado. 70

Anexo D. Promedio de VPU por el método de transmisión indirecta por la cara frontal para cada día de curado. 71

Anexo E. Promedio de VPU por el método de transmisión directa e indirecta por la cara frontal para cada día de curado. 72

Anexo F. Promedio de VPU por el método de transmisión directa e indirecta por la cara frontal para cada día de curado. 73

RESUMEN

TITULO:
ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETO SIN REFUERZO A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) UTILIZANDO MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO.*

AUTORES:
AFANADOR Muñoz Andrés Alfonso
SANTACOLOMA Hoyos Mauricio Andrés **

PALABRAS CLAVE:
Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU), segregación, VPU por transmisión indirecta, resistencia a la compresión.

DESCRIPCION:

Las técnicas tradicionales utilizadas en la evaluación de estructuras de concreto, basadas en ensayos de compresión y flexión, ofrecen información confiable de la resistencia de éstas, sin embargo las debilitan debido a la extracción de núcleos necesaria para su aplicación. Como consecuencia de esto, en la actualidad se desarrollan nuevas técnicas y se optimizan los ensayos no destructivos ya conocidos para hacerlos más confiables y precisos. Dentro de estos ensayos se encuentran los empleados para estimar la resistencia a la compresión del concreto como la técnica VPU, la cual ha sido aplicada en estudios de evaluación de la calidad y homogeneidad del concreto, usando el método directo el cual ha sido efectivo y altamente confiable. La aplicación de este método está limitada a tener acceso por dos caras opuestas, lo cual no siempre es posible, creándose así la necesidad de utilizar el método de manera indirecta (acceso por una sola cara) para estimar su resistencia a la compresión a través de expresiones matemáticas que permitan esta relación. Por lo anterior, en el presente trabajo se encontraron relaciones matemáticas entre la resistencia a la compresión y medidas de VPU por los métodos de transmisión directa e indirecta, dichas medidas fueron realizadas a especímenes de concreto sin refuerzo tipo columna (100cm x 25cm x 25cm) y cilíndricas (20cm x 10cmØ),en las cuales se demostró una fuerte correlación entre las variables establecidas y una sensibilidad del método de VPU indirecto a captar variaciones en la compactación, producto de la segregación de los componentes del concreto. Estas muestras se ensayaron durante los 7, 14, 21, 28 y 56 días de curado, en condiciones ambientales (25°C) bajo techo. Cabe destacar que las relaciones y conclusiones encontradas durante el desarrollo de este proyecto son aplicables únicamente a un concreto con las especificaciones usadas en la investigación.

* Proyecto de Grado
** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director CRUZ Ricardo. Codirector QUINTERO Ortiz. Luz Amparo

ABSTRACT

TITLE:
ASSESSING THE COMPRESSIVE STRENGTH OF UNREINFORCED CONCRETE THOUGH ULTRASONIC PULSE VELOCITY MEASURES USING DIRECT AND INDIRECT METHODS.*

AUTHORS:
AFANADOR Muñoz Andrés Alfonso
SANTACOLOMA Hoyos Mauricio Andrés **

KEYWORDS:
Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), segregation, UPV by indirect transmission, compressive strength.

DESCRIPTION:

Traditional techniques used in the evaluation of concrete structures based in compressive and tensile tests provide reliable information of the strength of these, however they debilitate them due to the extraction of nucleus necessary for their deployment. As a consequence of this, new technologies are developed and known non-destructive tests are optimized in order to make them more reliable and accurate. Among these tests are the ones used to estimate the compressive strength of the concrete like the UPV technique, which has been applied in tests to assess the quality and homogeneity of the concrete using the direct method being effective and highly reliable. The application of these method is limited to the fact of having access to two opposite faces, which is not always possible, making it necessary to use the indirect method (access to one face) to estimate its compressive strength through mathematical expressions that allow this relation. Due to above, in the present work are set the mathematical relations between the compressive strength and the UPV measures through the methods of direct and indirect transmission. These measures were realized to specimens of unreinforced concrete column type (100cm x 25cm x 25cm) and cylindrical (20cm x 10cmØ), in which a high correlation arose between the set variables and also a strong sensitiveness of the indirect UPV method to capture variations in the compaction due to the segregation of the components of the concrete. These samples were tested during the 7, 14, 21, 28 and 56 days of curing, under indoor environmental conditions (25°C). It is necessary to emphasize that the relations and conclusions found during the development of this project are applicable only to a concrete with the specifications used this research.

* Graduation Project
** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Manager CRUZ Ricardo. Co ORTIZ Quintero Luz Amparo

INTRODUCCIÓN

El interés de conocer propiedades tanto físicas como mecánicas del concreto “in situ” ha aumentado desde los últimos años y se han realizado grandes procesos con respecto a las técnicas, métodos y equipos de ensayos. Actualmente la incorporación a la ingeniería de los métodos de evaluación no destructivos han permitido determinar las propiedades del concreto sin dañar a la estructura en estudio.

Por medio de estos métodos no destructivos se puede estimar la resistencia mecánica tanto “in situ” como en el laboratorio. La técnica ultrasónica de mayor aplicación es la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) mediante el uso de sus tres métodos (directo, indirecto y semidirecto), según el rango de acceso que se obtenga de la estructura.

La VPU se basa en la medición del tiempo de vuelo del haz sonoro, pudiéndose relacionar con la resistencia a la compresión del concreto. Es así, que este trabajo pretende establecer, a través de la velocidad de pulso ultrasónico como ensayo no destructivo, la estimación de la resistencia de concreto suministrado por una empresa local mediante las relaciones entre las medidas de VPU tomados por los métodos directo e indirecto.

Para obtener esta correlación se presenta en este trabajo en primer lugar una fundamentación teórica del método en el capítulo 2. Enseguida, en el capítulo 3, se muestra la metodología llevada a cabo para lograr los objetivos. En el capítulo 4 se analizan los resultados y se propone la ecuación de correlación entre la resistencia a la compresión y las medidas de VPU obtenidas por el método indirecto. Finalmente se presenta en los capítulos 5 y 6 las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con el planteamiento del problema, objetivos planteados y justificación de la investigación.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las últimas décadas los estudios han mostrado que una gran parte de los gastos en infraestructura en la industria de la construcción se destinan a mantenimiento y reparación. [12] Con el fin de garantizar la estabilidad, seguridad y la intervención óptima de las estructuras de concreto es necesario llevar a cabo una evaluación y diagnóstico del material durante los procesos de fabricación, colocación, puesta en servicio y en general durante su vida útil.

Las técnicas tradicionales de evaluación, basadas en ensayos destructivos (compresión, flexión, entre otros), a muestras de concreto empleadas en la evaluación de estructuras, ofrecen información confiable de la resistencia del concreto, pero llegan a debilitar estas estructuras debido a la extracción de núcleos para su aplicación. Este inconveniente conlleva al uso de métodos de ensayos no destructivos los cuales permiten obtener información sobre la calidad del material, los defectos presentes, el estado de corrosión de las armaduras y en especial estimar la resistencia a la compresión del concreto. [17]

Como consecuencia de esto en la actualidad se desarrollan nuevas técnicas y se optimizan los ensayos no destructivos ya conocidos para hacerlos más confiables y precisos. Pese a lo anterior no se ha logrado establecer hasta el presente métodos que se puedan considerar incuestionables.

Dentro de los ensayos no destructivos empleados para estimar la resistencia a la compresión del concreto, se tiene el de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), que se ha aplicado en estudios de evaluación de la calidad y homogeneidad del concreto nuevo y en servicio. Su aplicación usando el método directo ha sido efectiva en pruebas de laboratorio y en campo, mostrándose altamente confiable en diversos estudios llevados a cabo. Sin embargo su aplicación está limitada a tener acceso por dos caras opuestas. [17]

Debido a la complejidad de algunas estructuras, por ejemplo las edificaciones con novedosa arquitectura donde se tiene un acceso limitado para realizar el ensayo directo, ha generado la necesidad de utilizar el método de manera indirecta (acceso por una sola cara) para estimar su resistencia a la compresión. Con esta medida se obtiene la resistencia a la compresión mediante una expresión matemática.

Estudios realizados aplicando esta técnica por el método de transmisión indirecta, muestran una serie de variables a tener en cuenta a la hora de aplicar dicho modo de transmisión, una de ellas es la segregación que presentan los componentes del concreto, la cual se ve reflejada en los valores de VPU. [15]

A pesar de las ventajas que ofrece el método indirecto para la evaluación de concreto y estimación de su resistencia a la compresión, existe poca información acerca de su uso y confiabilidad para su aplicación. Por lo anterior el presente trabajo busca estudiar la técnica de velocidad de pulso ultrasónico por el método indirecto y relacionarla con la resistencia a la compresión y realizar una comparación con resultados obtenidos mediante el método directo. Con los resultados obtenidos se espera evaluar la resistencia a la compresión del concreto mediante el VPU indirecto.

1.2 OBJETIVOS

Para lograr aportar en la solución del problema planteado se propone en este trabajo la realización de los siguientes objetivos.

1.2.1 Objetivo general

Estimar la resistencia a la compresión de concreto sin refuerzo a partir de medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) utilizando métodos directo e indirecto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del tiempo de curado de concreto sin refuerzo sobre medidas VPU utilizando los métodos directo e indirecto.
- Relacionar la resistencia a la compresión con las medidas de VPU para el concreto en estudio durante el tiempo de curado.
- Establecer las relaciones entre las medidas de VPU tomados por los métodos directo e indirecto.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Siendo la resistencia a la compresión la propiedad mecánica más importante del concreto a nivel estructural y puesto que su evaluación se realiza a través de ensayos destructivos que llevan a modificaciones posteriores de la misma sería necesario considerar otro tipo de ensayo que permita determinar esta propiedad sin llevar a cambios en la estructura. Siendo la técnica de VPU (Velocidad de Pulso Ultrasónico) un ensayo no destructivo, y teniendo en cuenta que en estructuras de concreto que se encuentran en funcionamiento se tiene acceso a una sola cara, se podría buscar una expresión que permita conocer valores aproximados de esta propiedad sin deteriorar la estructura, aplicando esta técnica por el método de transmisión indirecta.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 MÉTODO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)

A continuación se presentan las generalidades del método, principio físico, técnicas de medición, influencia de las condiciones de ensayo y antecedentes.

2.1.1 Generalidades

Esta técnica presenta sus bases en la teoría de propagación de ondas en un medio sólido, homogéneo, isotrópico y elástico. La velocidad de los pulsos de ultrasonido que transitan en un material sólido depende de propiedades como la densidad y las características elásticas del mismo. La calidad de algunos materiales se relaciona a veces con su tiesura elástica, por tanto la medida de la velocidad del pulso de ultrasonido en tales materiales a menudo indicará su calidad, así como determinará sus características elásticas. [18]

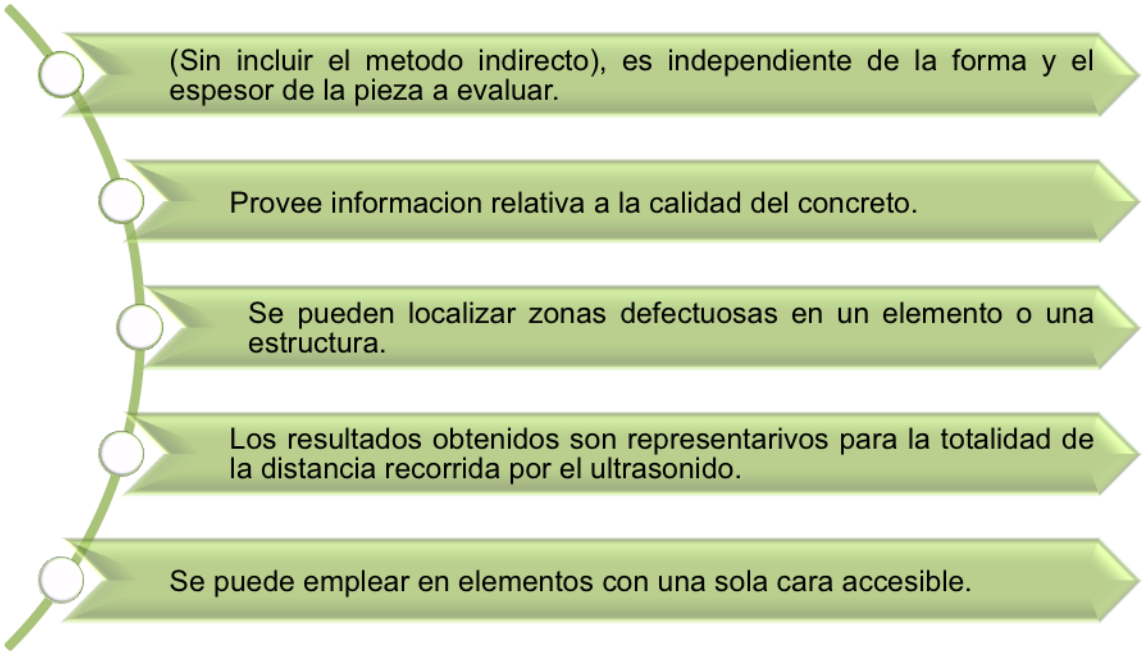
Un ejemplo claro es el concreto quien puede definirse como un material heterogéneo compuesto por cemento y agregados (arena y grava).Existen múltiples factores que influyen en el análisis de sus propiedades, uno de ellos son los agregados quienes desempeñan un papel fundamental en la relación existente entre la VPU y la medida de calidad del concreto, de esta forma es más probable tener una mayor velocidad de pulso ultrasónico, en concretos que cuenten con mayor contenido de agregados. Otro factor influyente en la medida de la velocidad de propagación del pulso en el concreto es el contenido de agua presente, el cual se ha comprobado que el pulso varia aproximadamente en la misma proporción que varía su contenido presente en la muestra. [18]

En general esta técnica consiste en determinar el tiempo mediante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una sección conocida de un elemento de

concreto. Por lo tanto, la longitud de la trayectoria dividida por el tiempo en que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la velocidad de pulso ultrasónico. [11]

Pese a las múltiples variables que afectan los resultados, en la validez del método se reconocen para las siguientes ventajas: [20]

Figura 1. Ventajas del método de Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU).



Fuente: Autores

2.1.2 Principio del método

La medición de velocidad de pulso ultrasónico VPU se realiza usando un par de transductores en contacto directo con la muestra, Se suele emplear vaselina o grasa en el acople, además de pulir bien la superficie para garantizar un buen contacto. Los transductores comúnmente empleados son los piezoeléctricos los cuales se utilizan para la generación de ondas ultrasónicas, estas ondas son generadas por el transductor mediante una señal de tensión eléctrica en forma

de ‘’espiga’’, que hace que vibre a una determinada frecuencia de resonancia. Estas vibraciones excitan el material con una amplia gama de frecuencias ultrasónicas a través del contacto y generan ondas que se transmiten a través del material hacia el transductor de recepción. El tiempo que tarda la onda ultrasónica en propagarse desde el palpador emisor al receptor se mide y se define como el tiempo de vuelo. En otras palabras la VPU se calcula a partir de la distancia entre los transductores y la medición del tiempo de vuelo. [6]

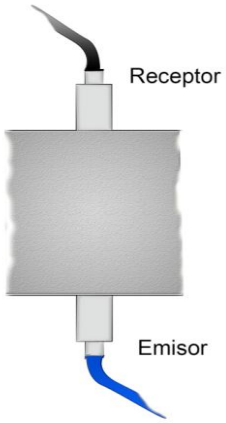
2.1.3 Técnicas de medición

La aplicación de esta técnica se puede realizar mediante 3 métodos, dependiendo de la posición de los transductores en la muestra a ensayar.

- ***Método de transmisión directa***

Los terminales del trasmisor y receptor son colocados y enfrentados en superficies opuestas de la muestra que se desee analizar cómo se observa en la figura 2. Este método es de gran utilidad puesto que presenta mayor sensibilidad y una ruta de desplazamiento más definida, por tal motivo es muy aplicada en la inspección de vigas y columnas de concreto.

Figura 2. Principio de medida de la velocidad ultrasónica por transmisión directa en el concreto.



Fuente: Autores

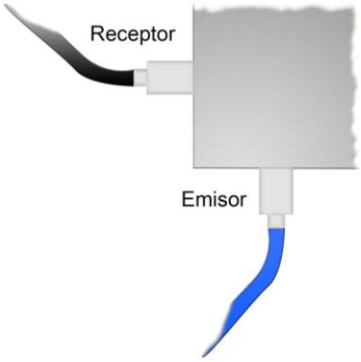
Es importante destacar que los métodos ultrasónicos existentes hoy en día, pueden basarse para la caracterización del material, tanto en el tiempo de propagación de la onda ultrasónica, como en la atenuación del pulso. [20]

- ***Método de transmisión Semidirecta.***

Para la aplicación de este método los palpadores deben ser colocados adyacentemente, formando por lo general un ángulo de 90 grados. En este sentido se tendrá que la distancia recorrida será la diagonal medida entre centro y centro de los transductores aplicando el teorema de Pitágoras. [11]

Una limitante de este método se encuentra en el análisis de la medida del tiempo en muestras de tamaño relativamente pequeñas, pues los resultados pueden ser alterados por las capas adyacentes de concreto de la superficie, también depende de la forma del elemento a ensayar. [20] La forma de colocar los palpadores se muestran en la figura 3.

Figura 3. Descripción de la técnica de transmisión semidirecta.



Fuente: Autores

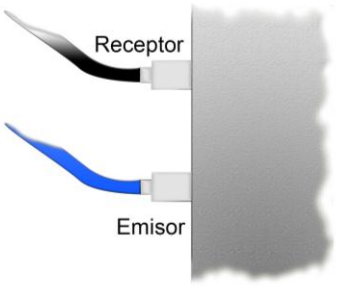
- ***Método de transmisión indirecta o superficial.***

En este método los transductores son colocados en la misma superficie de la probeta o muestra analizada. Para el desarrollo de la técnica es necesario fijar el

transductor emisor e ir desplazando el transductor receptor sobre la misma superficie en posiciones sucesivas a lo largo de una línea recta. [18]

La técnica realizada por este método es la menos utilizada ya que presenta poca sensibilidad puesto que no dispone de una trayectoria de transmisión de pulso definida. En la figura 4 se aprecia la posición de los palpadores.

Figura 4. Técnica de medición indirecta.



Fuente: Autores

2.1.4 Influencia en las condiciones de ensayo

La eficiencia de la técnica de VPU en el estudio de concreto puede ser afectada por una serie de factores entre estos se tienen:

- ***Relación agua/cemento.***

Este factor influye directamente en los valores de la velocidad de pulso puesto que se establece que a medida que disminuye esta relación, aumenta los valores de VPU, ya que la cantidad de agua es menor en la mezcla, lo cual disminuye el porcentaje de porosidad en la pieza, evitando de esta manera la dispersión de las ondas y un menor tiempo en el recorrido de la trayectoria. [18]

- ***Cantidad y tipo de agregados.***

Las reacciones de hidratación y la trayectoria de la onda se ven afectados por la cantidad y el tamaño del agregado de la mezcla, generando variaciones en la

medición de la velocidad de pulso ultrasónico para concretos con la misma relación A/C. [18]

- ***Tipo y tiempo de curado del concreto.***

La velocidad de onda se verá afectada aumentando su comportamiento, si el concreto es curado en condiciones de humedad cercanos al 100% debido a las condiciones de saturación. [20]

- ***Contenido de agua.***

El valor de la velocidad de pulso puede aumentar o disminuir significativamente según este parámetro, es decir, puede aumentar en condiciones de saturación, sin embargo la resistencia a la compresión no se ve afectada en mayores proporciones. [20]

- ***Edad del concreto.***

Un aumento en la edad del concreto genera una disminución en la porosidad y un incremento en la densidad del material, como consecuencia de la reacciones de hidratación al transcurrir el tiempo, lo que conlleva a que las ondas se propaguen con mayor facilidad por este medio. [18]

2.1.5 Estudios realizados sobre VPU directo e indirecto

Diversos estudios se han llevado a cabo para estimar la correlación existente entre medidas de pulso ultrasónico por el método directo, con las realizadas por el método indirecto analizando los factores que la afectan. Sin embargo la información acerca del método de transmisión por vía indirecta ha sido más limitada. En general estas técnicas consisten en determinar el tiempo mediante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una sección conocida de un elemento de concreto. Por lo tanto, la longitud de la trayectoria dividida por el tiempo en que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la velocidad de pulso ultrasónico. [11]

Normas británicas (BS 1881) afirman que las medidas tomadas por el método de velocidad de pulso ultrasónico por transmisión indirecta son de 5 a 20% menores que las obtenidas por el método directo, dependiendo sobre todo de la calidad del hormigón en estudio. De igual manera recomienda que para la realización del método por transmisión indirecta se tenga en cuenta la separación entre los transductores, para obtener de manera más precisa los tiempos de vuelo al aumentar dicha distancia. explica que la discrepancia entre la velocidad directa e indirecta, se debe a la dispersión de las ondas en el material. [6]

Una comparación realizada entre las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) por los métodos directos e indirectos se presentó por Qixian y Bungey (1996), donde las velocidades fueron determinadas en ensayos realizados a probetas de hormigón con unas dimensiones de 50 x 50 x 20 cm. Para el caso de las tomas por el método indirecto se manejó una variación en la distancia de separación entre los transductores de 5 a 30 cm. Estas pruebas fueron realizadas usando el mismo lote de hormigón. Con este estudio se pudo concluir que en general, las velocidades de las ondas directas fueron más altas que las velocidades de la**s** onda**s** indirectas.[6]

En Noviembre de 2001 ISMAIL OZGUR YAMAN, y colaboradores, realizaron un estudio que consistió en la medición y comparación de la VPU por los métodos de transmisión directa e indirecta en losas de hormigón con 150 cm de ancho, 100 cm de longitud y 25 cm de espesor, con lo cual se llegó a concluir que la VPU indirecta es estadísticamente similar a la VPU directa, siempre y cuando presente propiedades uniformes, incluyendo el perfil de humedad a en toda la probeta. [6]

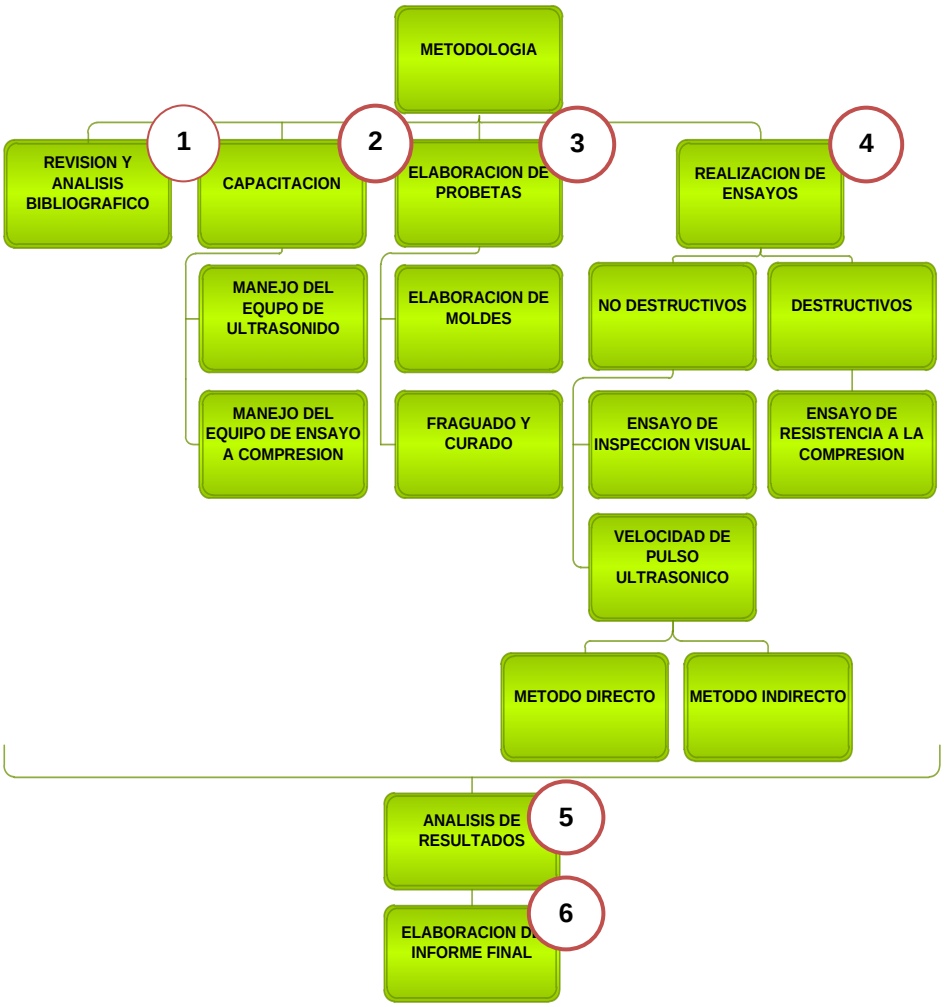
De igual manera un estudio realizado por P. TURGUTA y colaboradores en la universidad de “Harran”, realizaron la comparación de la velocidad de pulso ultrasónico por los métodos directo, indirecto y semidirecto realizando mediciones a los 28 días de edad, a un total de 30 bloques de hormigón, cuyas dimensiones

fueron 30x 30 x 25 cm^3. Afirman que la mezcla fue tomada de lotes diferentes, con grados de resistencia a la compresión de entre 18,8 y 79,9 MPa respectivamente. Las correlaciones entre las medidas de VPU directa e indirecta se realizaron tomando en cuenta la dirección de colada y la que ellos denominan dirección horizontal (cara perpendicular a la dirección de colada) de las muestras de hormigón. El análisis estadístico reveló que las medidas de VPU directa tuvieron un comportamiento entre el 4% y 9% mayor que la media de VPU indirecta en la dirección de colada. De igual manera concluyeron que las medidas de VPU por el método indirecto son un 5% mayor en la dirección horizontal que en la dirección de colada debido a la segregación en la interface entre el agregado y la pasta de cemento en el plano horizontal mostrando la importancia del comportamiento de las medidas de VPU frente a la dirección de colada. [15]

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología seguida para este proyecto consto de seis (6) etapas: Búsqueda, adquisición y análisis de material bibliográfico; Capacitación y familiarización de los equipos; Elaboración de probetas; Realización de los ensayos propuestos; Análisis de resultados; Por ultimo elaboración del informe final. El flujo de actividades se presenta en la figura 5.

Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología experimental.



Fuente: Autores

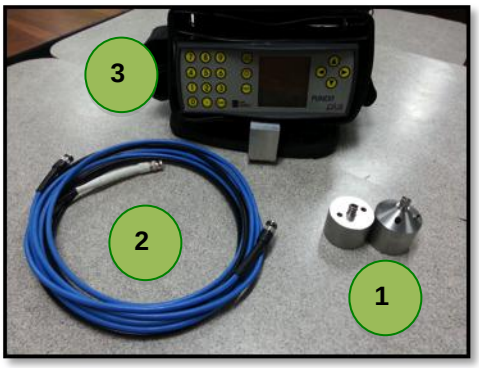
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa se llevó a cabo durante todo el desarrollo del proyecto. Se realizó y analizó información necesaria relacionada con el tema desarrollado, constituida por tesis, trabajos de grado, artículos, información de sitios web, libros y normas técnicas como la ASTM, NTC e ISO. De estos se obtuvo información la cual permitió adquirir y afianzar conocimientos sobre concretos y técnicas de inspección destructivas y no destructivas empleadas para la evaluación del material. Adicionalmente se estudió las variables que influyen en los resultados obtenidos.

3.2 CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DE EQUIPOS

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario realizar un entrenamiento en el manejo adecuado del equipo de ultrasonido de baja frecuencia marca CNS FARNELL tipo PUNDIT PLUS modelo PC 1006, con rango de trabajo de 24 KHz a 1 MHz, precisión en la medición de la velocidad de ± 1 m/s y de precisión en la medición del tiempo de ± 0.1 µs,el equipo corresponde al mostrado en la figura 6, el cual cuenta con los siguientes elemento:1. Cables con sus respectivas entradas y terminales para cada palpador; 2. Palpadores de 54 KHZ; 3. Pantalla de datos.

Figura 6 - Equipo de ultrasonido.



Fuente: Autores

Además se conoció y revisó el proceso de funcionamiento de la máquina digital de ensayos de compresión mostrado en figura 7 **AUTOMAX**, pertenecientes al laboratorio de caracterización de materiales de la empresa HOLCIM FLORIDABLANCA la cual fue manipulada por los técnicos de la empresa.

Figura 7.Dispositivo digital de ensayos de compresión

Fuente: Autores

3.3 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

En esta etapa se elaboraron dos tipos de probetas de concreto sin refuerzo, el diseño de mezcla fue suministrado por una empresa concretera de la región.

3.3.1 Diseño de mezcla

En la tabla 1 se presenta el diseño de mezcla suministrado por la empresa concretera y algunas de las condiciones del concreto al momento de realizar las probetas.

Tabla 1. Diseño de mezcla del concreto utilizado, suministrado por la empresa HOLCIM Floridablanca

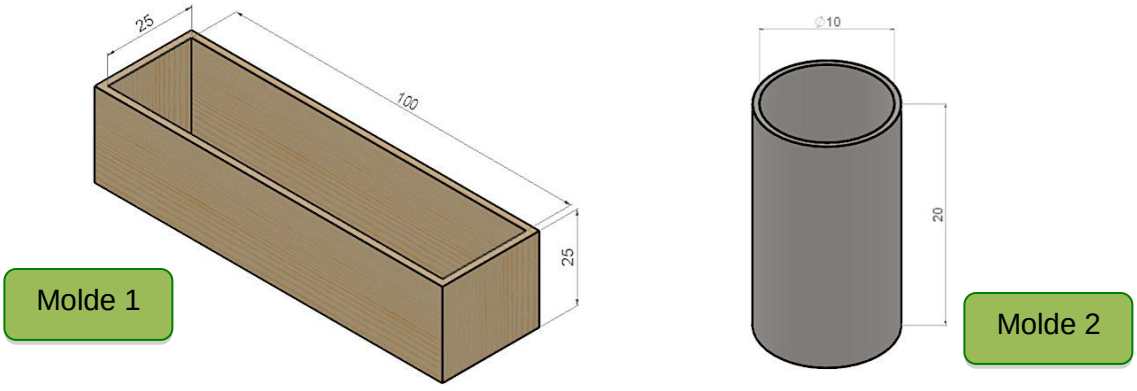
CONCRETO TIPO BOMBEABLE DE 3000 PSI (3/4”)	
RESISTENCIA	21 MPa (3000 psi)
TAMAÑO DE AGREGADO	Grava 3/4”
ARENA	43%
GRAVA	39%
CEMENTO	11%
AGUA	7%
ADITIVOS	0,084%
RELACION AGUA-CEMENTO	0,64
CONDICIONES DEL CONCRETO AL MOMENTO DE LA FUNDICION DE LAS PROBETAS	
SLUMP	14.5 cm
TEMPERATURA DEL CONCRETO	30,6 °C
MASA UNITARIA	2342 Kg/m^3
CONTENIDO DE AIRE	1,8%

Fuente: Autores.

3.3.2 Elaboración de moldes y probetas

En esta etapa del proyecto se utilizaron dos tipos de moldes para la fabricación de las probetas a analizar cómo se muestra en la figura 8.

Figura 8.Tipos de moldes para la realización de las probetas analizadas.

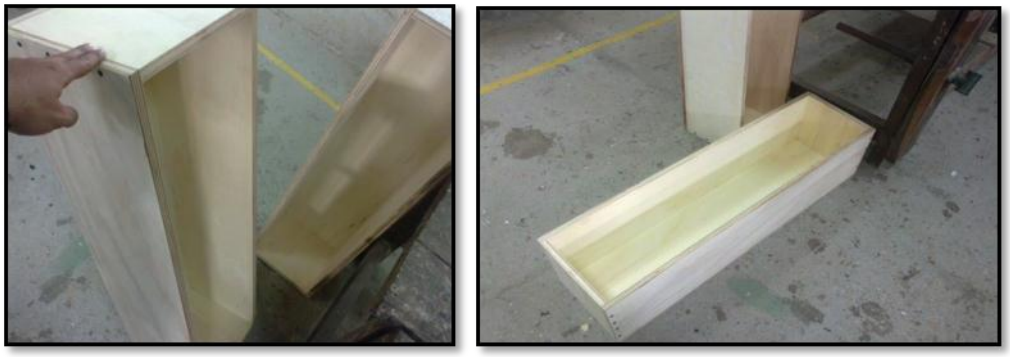


Fuente: Autores

Se elaboraron dos probetas con el molde 1. De estas dos se escogió la que presentó el mejor estado superficial para la toma de medidas de pulso ultrasónico.

El elemento fabricado con el molde 1 busca representar a escala, una columna de concreto. El molde se realizó con formaletas de madera tipo triplexde grosor 3cm con dimensiones internas de (100cm x25cm x 25cm) como se muestra en las figuras 8 y 9. Los moldes se limpian y adecuan, impregnándolos de ACPM (aceite combustible para motor), que cumple la función de lubricante, facilitando su desencofrado.

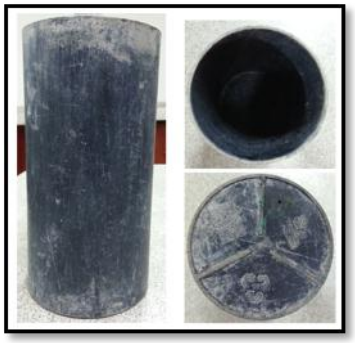
Figura 9. Moldes realizados en triplex.



Fuente: Autores

Para el caso de las probetas cilíndricas (Molde2)se realizaron20 muestras. Para cada día de curado (7, 14, 21, 28 y 56 días) se tomaron 4 muestras. Las dimensiones del molde de polipropileno para la muestra 2 son de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y un volumen aproximado de 1647 cm^3 y dispone de una entrada neumática para desencofrado en su base. Este tipo de molde se encuentra disponible en la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander. La figura 10 muestra algunas de sus características.

Figura 10. Moldes de polipropileno



Fuente: Autores

Todas las actividades correspondientes a la fundida de las muestras se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Caracterización de Materiales en la planta HOLCIM FLORIDABLANCA.

Una vez mezclado el concreto se procedió al llenado de los moldes con la mezcla homogénea de la siguiente manera:

- ***Molde 1(ver figura 8):*** La compactación se realizó cada 1/3 del volumen de la formaleta siguiendo los lineamientos de la norma técnica colombiana NTC 550, numerales 8.3 y 8.4 (segunda actualización); mediante apisonamiento manual utilizando una varilla de compactación de 16 mm según la norma anteriormente mencionada, golpeándose la parte exterior de la formaleta con un martillo de caucho, dando un golpe por cada 14 cm^2 del área de la cara superior de la viga en cada lado de la misma; lo anterior buscando eliminar el aire atrapado dentro de la probeta y ayudar a la homogenización de la mezcla.

- ***Molde 2 (ver figura 8):*** Inicialmente se colocó un tapón de plastilina sobre el orificio de desencofrado para luego recubrirlos internamente con una capa de lubricante, en este caso se utilizó ACPM, facilitando el desencofrado de las probetas. Una vez listos los materiales se procedió al llenado por medio de dos capas realizando compactación entre capa y capa, la cual se realizó por

apisonado siguiendo lo establecido en la norma técnicas colombiana anteriormente mencionada para el molde 1. Adicionalmente, para eliminar las posibles burbujas de aire, llenar los espacios vacíos entre los agregados y cerrar los huecos dejados por la varilla compactadora, se utilizó un martillo con cabeza de goma para golpear lateralmente el molde en cada capa.

3.3.3 Fraguado y curado

Por condiciones de la empresa donde se realizaron las probetas de concreto, se dejaron durante 24 horas en los moldes, pasado este tiempo se trasladaron al laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Industrial de Santander donde se procedió al desencofrado de los mismas. Para el caso de la muestra 1, debido a sus dimensiones, fue necesario dejarla secar un tiempo de 5 días dentro del molde ya que, mediante inspección visual, su superficie al día tercero, día en que se propuso el desencofrado de las muestras la superficie mostraba signos de humedad. Posteriormente en el día 5 se desencofró dejando curar en condiciones ambientales bajo techo (25°C).

Para el caso de los 20 cilindros no fue necesario dejar un secado prolongado. Los especímenes alcanzaron su contextura solida durante los dos días de secado en el laboratorio (ver figura 11). Después de su desencofrado, las muestras se dejaron curar en condiciones ambientales bajo techo (25°C).

Figura 11. Secado de cilindros en la empresa HOLCIM Floridablanca.

Fuente: Autores

3.4 REALIZACIÓN DE ENSAYOS

En esta etapa se realizaron dos tipos de ensayos con el fin de conocer el comportamiento físico y mecánico del concreto: Ensayos no destructivos tales como una inspección visual y Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) por los métodos de transmisión directa e indirecta, también se realizaron ensayos destructivos de resistencia a la compresión. Estas pruebas fueron realizadas en los días 7, 14, 21, 28 y 56, después de fabricados los cilindros y vigas de concreto.

3.4.1 Ensayo de inspección visual

Para verificar el estado superficial tanto de las probetas cilíndricas como de las probetas tipo columna y encontrar defectos que puedan afectar la toma de datos, se realizo una inspección visual la cual permitió elegir las probetas con mejor aspecto superficial y del mismo modo corregir algunas imperfecciones para minimizar errores en las lecturas siguientes. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

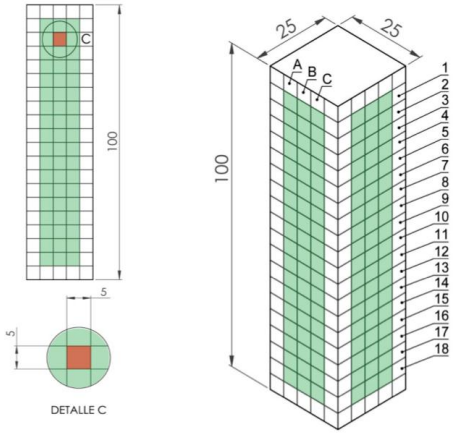
3.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Todas las probetas fueron previamente pulidas para garantizar mayor uniformidad en la superficie y lograr mejor acople de los transductores para obtener resultados más precisos. Los ensayos de VPU fueron realizados en las probetas cilindricas y en las probetas tipo columna.

- ***Probetas tipo columna.***

Al espécimen elaborado en el molde 1 (tipo columna) se le trazó una cuadricula de 5cm x 5cm para facilitar la ubicación de los transductores a lado y lado de la probeta en cada una de las caras como se muestra en la figura 12. Allí se trazaron 3 columnas y 18 filas (color verde), dejando un margen de 5cm para minimizar los efectos de borde.

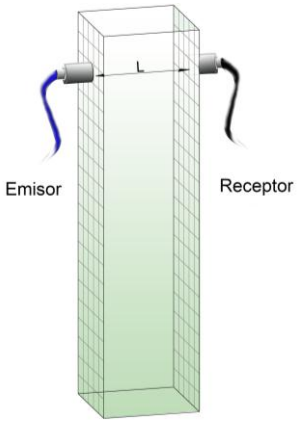
Figura 12. Esquema de la cuadricula para mayor precisión en las tomas de VPU en la probeta 1.



Fuente: Autores

En este tipo de probeta se realizaron ensayos de VPU por los métodos de transmisión directa e indirecta. Para ambos casos se tomaron dos datos por cada punto de medición para un total de 432 datos por día de curado. Las mediciones de VPU directo se realizaron colocando el palpador emisor en una cara de la probeta y el palpador receptor en la cara opuesta de la misma, teniendo en cuenta que se encuentren en la misma línea de referencia como se observa en la figura 13.

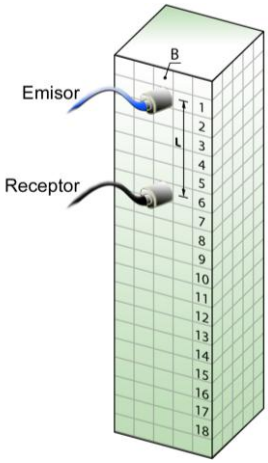
Figura 13. Disposición de los palpadores para la medición de VPU directo.



Fuente: Autores

Para el caso de las mediciones de VPU indirecto los palpadores emisor y receptor fueron colocados en la misma cara (figura 14), dejando siempre el emisor en la fila uno y el receptor alejándose de él por la misma columna, teniendo en cuenta una distancia mínima entre centros de L=15cm equivalente a aproximadamente dos longitudes de onda, lo cual es recomendado por un estudio realizado anteriormente [6], este procedimiento se realizó de la misma manera para las columnas A, B y C.

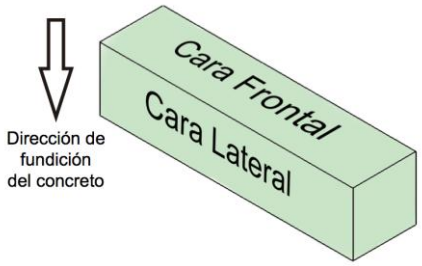
Figura 14. Disposición de los palpadores para la medición de VPU indirecto.



Fuente: Autores

Con base en la bibliografía revisada [15] se tuvo en cuenta que las medidas de VPU están influenciadas por la cara en que es realizada la medición, con respecto a la dirección en la cual fue fundida la pieza de concreto. Por lo anterior, fue conveniente realizar las mediciones de VPU por la cara frontal y lateral del espécimen como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Esquema del bloque de concreto y la dirección en que se tomaron los datos de VPU.



Fuente: Autores

- ***Probetas cilíndricas.***

Para la medición de VPU en las probetas cilíndricas fue necesario el uso de un dispositivo, el cual garantiza que el palpador emisor se encuentreen la misma línea de referencia del palpador receptor, logrando así minimizar errores en las lecturas (Ver figura 16). Para cada punto de medición se tomaron dos lecturas de tiempo de vuelo para un total de 6 datos por cilindro. Posteriormente se calcularon las Velocidades de Pulso Ultrasónico (VPU) con los datos de tiempo y de longitud promedio. Por cada día de curado se evaluaron 4 cilindros.

Debido a la forma y tamaño de las probetas cilíndricas que no permiten un buen acople de los palpadores para la aplicación del método indirecto, no se realizaron lecturas por este método en estas muestras.

Figura 16. Soporte utilizado para la toma de medidas de VPU.

Fuente: Autores

Para llevar a cabo las mediciones del tiempo de vuelo se procedió a la calibración del equipo de baja frecuencia para concretos **CNS FARNELL** Pundit plus, de la siguiente manera:

- Conectar los cables al equipo previamente cargado y después a los palpadores respectivamente (transmisor y receptor).
- Se encendió el equipo y se acoplaron los transductores los cuales tenían vaselina pura como acoplante para su calibración, dando como resultado un tiempo de vuelo de la onda de 0,1 microsegundos (µs).
- Una vez calibrado el equipo con los parámetros establecidos en la tabla 2 se colocaron los palpadores sobre la superficie de la probeta impregnada de vaselina para mejorar el acople, posteriormente se procedió a tomar los tiempos de vuelo para determinar la velocidad de pulso ultrasónico empleando los métodos de lectura indicados.

Tabla 2.Parámetros en el equipo de ultrasonido.

VOLTAJE	500 V
LIMITE SUPERIOR	9999
LIMITE INFERIOR	1
MODO ALMACENAMIENTO	APAGADO
PULSO DE REFERENCIA	
UNIDADES	MÉTRICAS
MODO DE PULSO	CONTINUO
CORRECCIÓN	100%

Fuente: Autores

3.4.5 Ensayo de compresión

Este ensayo de compresión se le realizó a cuatroprobetas cilíndricas durante los días7, 14, 21, 28 y 56 de curado utilizando la máquina marca AUTOMAX. El ensayo se realizó bajo la norma NTC 673,dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas. Este ensayo fue realizado en las instalaciones de la concretera HOLCIM FLORIDABLANCA. Los resultados obtenidos en esta actividad se presentan en el capítulo 4.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Se realizó el análisis de resultados obtenidos anteriormente y se procedió a la elaboración del informe final.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación teniendo en cuenta la anterior metodología.

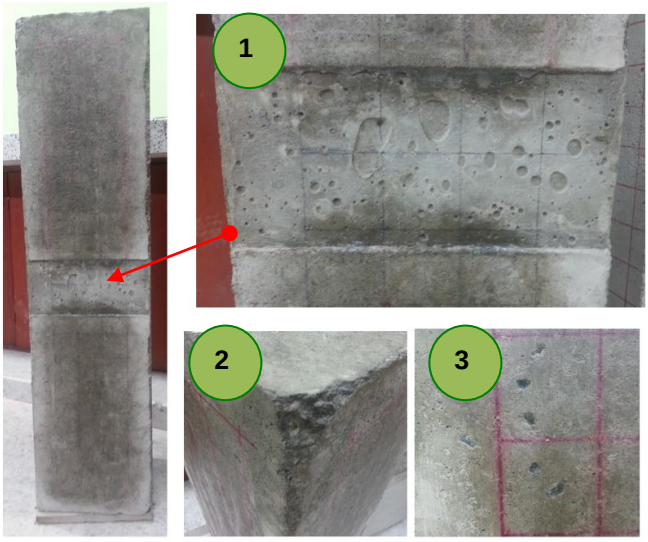
El análisis estadístico de resultados se realizó utilizando el paquete estadístico *Statgraphics Centurion XV.* [16] Se aplicó un modelo de regresión simple en todos los ensayos. Se obtuvo la correlación de las variables estudiadas con un nivel de confianza del 95%.

4.1 ENSAYO DE INSPECCIÓN VISUAL

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis por inspección visual.

En la figura 17 (imagen 1) se observan los defectos superficiales encontrados en la probeta tipo columna, la cual presenta el defecto más significativo en la cara frontal consistente en una reducción del espesor, además de poros de gran tamaño debido al refuerzo del molde de triplex con el cual se realizó esta probeta. Por lo anterior no fue posible tomar datos sobre esta zona ya que los palpadores no se acoplaban de manera adecuada. Por otro lado en la misma figura imagen 2, se observa un despuntado en las esquinas de la columna que fue ocasionado en el momento del desencofrado, sin embargo este defecto no afectó las mediciones. En la imagen 3 se observa unos pequeños poros y grava suelta que fueron eliminados con el pulido superficial de toda la columna.

Figura 17. Defectos superficiales hallados por medio de inspección visual



Fuente: Autores

Las probetas cilíndricas presentaron un buen acabado superficial con diminutos poros que no afectaron el acople entre los palpadores y su superficie.

4.2 ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

A continuación se presentan los resultados y el respectivo análisis de los datos obtenidos de VPU vs tiempo para el concreto en los diferentes días de curado, usando los métodos de transmisión directa e indirecta. Las mediciones se llevaron a cabo de acuerdo con lo expresado en la metodología.

4.2.1 Velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión directa

Teniendo en cuenta la dirección de fundición del concreto mostrada en el numeral 3.4.2 del presente trabajo, se muestra a continuación la relación existente entre la velocidad de pulso ultrasónico y los días de curado para el concreto en estudio, analizadas en las caras lateral y frontal.

En la tabla 3 se observan los datos promedios de VPU directo por las caras lateral y frontal con respecto a los días de curado, que se utilizaron para la elaboración de la figura 18. Los datos promedio de las caras lateral y frontal provienen del promedio de los 54 y 48 datos para cada día de curado, sumando un total de 270 y 240 respectivamente, los cuales se muestran en los anexos A y B.

Es importante aclarar que las velocidades fueron obtenidas a partir de los 540 y 480 datos del tiempo de vuelo tomados en la muestra por este método para las caras de medición (cara lateral y cara frontal).

Tabla 3. Datos promedio de VPU directo por las caras lateral y frontal

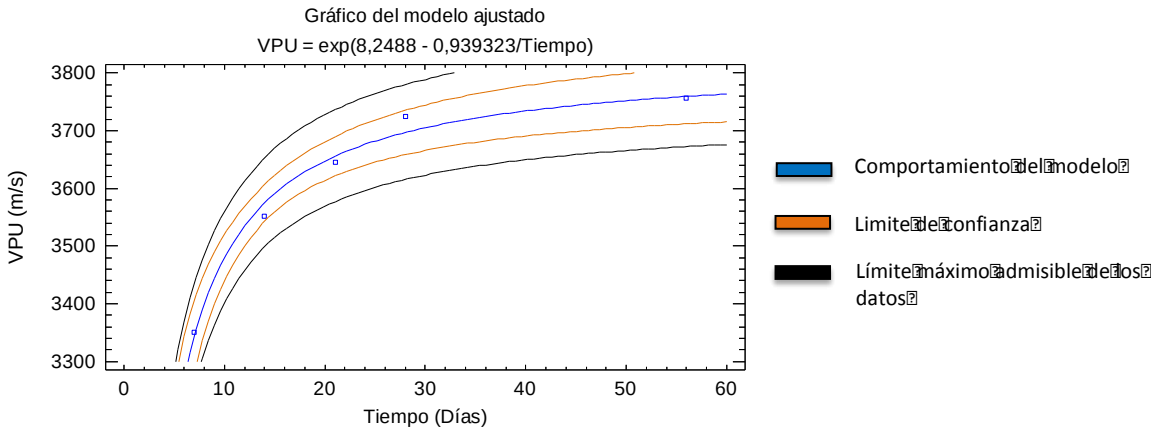
Tiempo [Días]	VPU directo cara lateral [m/s]	VPU directo cara frontal [m/s]	VPU directo promedio [m/s]	Diferencia [%]
7	3321,94	3380,15	3351,04	1,72
14	3500,96	3601,34	3551,15	2,79
21	3630,33	3661,77	3646,05	0,86
28	3715,45	3734,34	3724,90	0,51
56	3742,91	3771,32	3757,11	0,75

Fuente: Autores

De la tabla 3 se observa que las medidas de VPU aumentan con el transcurso de los días de curado, por otra parte se pueden apreciar diferencias entre los promedios de las velocidades tomadas por las caras lateral y frontal que van desde 0,51% hasta 2,79%, manteniéndose dentro del rango de aceptación del 5% para este tipo de medidas según la NTC 4325. [11] Por lo anterior este promedio será tomado como un valor representativo de los valores de VPU directo por las caras lateral y frontal.

En la figura 18 se muestra el comportamiento de los datos promedio de VPU directo vs Tiempo de curado. En la tabla 4 se presentan los parámetros del modelo obtenido.

Figura 18. Modelo obtenido para las medidas promedio de VPU vs tiempo, para la transmisión directa.



Fuente: Autores

En la figura 18 se observa un comportamiento en la curva de VPU directo vs tiempo de curado de forma exponencial, lo cual corrobora el comportamiento indicado por algunos autores para estas variables. [1], [4], [6] y [15]

Tabla 4. Parámetros para el modelo obtenido de VPU directo vs tiempo.

ECUACIÓN	$VPU_{directo}$ $exp(8.25$ $\frac{0.94}{Tiempo})$
PARÁMETRO	VPU
TIPO DE REGRESIÓN	Exponencial: Y = exp(a+b*X)
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	-0,99
R-CUADRADO	98,64
COEFICIENTES	RESULTADO
INTERCEPTO	8,25
PENDIENTE	-0,94
ANOVA	
PARÁMETROS	RESULTADO
VALOR-P	0,0007
DURBIN-WATSON (VALOR-P)	0,42

Fuente: Autores

Al analizar la figura 18, suministrada por el modelo estadístico se observan regiones enmarcadas por líneas de tres colores, la línea azul es la tendencia del comportamiento del sistema, la zona delimitada por las líneas de color naranja

indica el límite de confianza obtenido, es decir los valores dentro de esta zona se consideran altamente confiables, y dentro de la zona demarcada por las líneas de color negro indica el límite máximo admisible de los datos.

En la tabla 4 se aprecian los parámetros estadísticos obtenidos de la figura 18, indicando la expresión de la VPU directo en función del tiempo de curado, mostrando un comportamiento de tipo exponencial. También se aprecia un coeficiente de correlación de 0,99 y un valor de R-cuadrado de 98,64, indicando que el modelo es altamente confiable.

4.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión indirecta

A continuación se presenta el análisis del comportamiento seguido por los datos de VPU por transmisión indirecta con respecto al tiempo de curado para las caras lateral y frontal de la probeta tipo columna.

En la tabla 5 se observan los datos promedios de VPU indirecto por las caras lateral y frontal con respecto a los días de curado, que se utilizaron para la elaboración de las figuras19 y 20. Los datos promedio de las velocidades para cada cara provienen del promedio de los 45 datos para cada día de curado, sumando un total de 225, los cuales se muestran en los anexos C y D.

Es importante aclarar que las velocidades fueron obtenidas a partir de los 450 datos del tiempo de vuelo tomados en la muestra por este método para cada una de las caras.

Tabla 5. Datos promedio de VPU indirecto por la cara lateral.

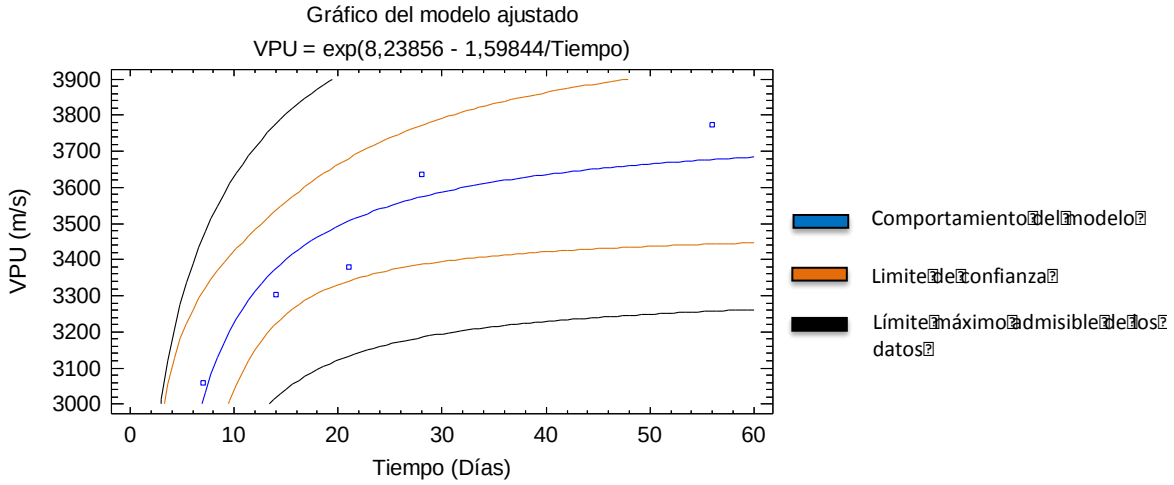
Tiempo [Días]	VPU indirecto cara lateral [m/s]	VPU indirecto cara frontal [m/s]	Diferencia [%]
7	3059,25	2610,98	17,17
14	3303,53	3008,20	9,82
21	3378,26	3274,07	3,18
28	3635,79	3511,08	3,55
56	3774,98	3650,30	3,42

Fuente: Autores

En la tabla 5 se aprecian diferencias entre los valores promedio de VPU indirecto para las caras lateral y frontal que van desde el 3,18% hasta el 17,17%, esto muestra la sensibilidad que tiene el método de captar los cambios de compactación y homogeneidad del concreto según la cara de medición. Por otro lado estos cambios encontrados confirman lo expresado por otros investigadores. [6] y [15]

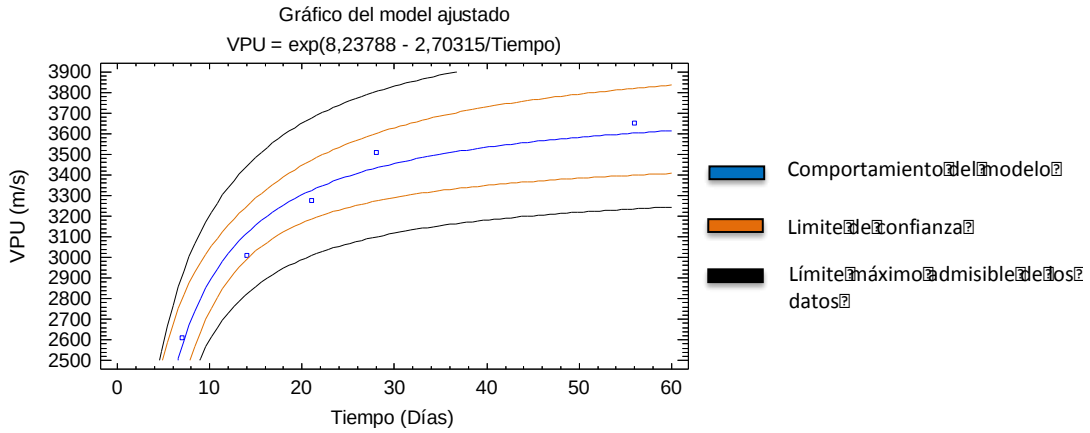
En las figuras 19 Y 20 se muestra el comportamiento delos modelos para medidas de VPU vs Tiempo por transmisión indirecta por las caras lateral y frontal respectivamente.

Figura 19. Modelo obtenido para las medidas de VPU vs tiempo, para la transmisión indirecta por la cara lateral.



Fuente: Autores

Figura 20. Modelo obtenido para las medidas de VPU vs tiempo, para la transmisión indirecta por la cara frontal.



Fuente: Autores

Para las figuras 19 y 20 se observa el mismo comportamiento exponencial. Se aprecia que para el día 14 la VPU obtiene un cambio de pendiente significativo y una disminución paulatina de la velocidad a partir de este. Lo anterior probablemente se debió a que en los primeros 14 días hay una mayor reacción y compactación de los componentes de la mezcla, confirmando el comportamiento seguido por la VPU vs el tiempo encontrado por otros investigadores. [1], [4], [6] y [15]

Tabla 6. Parámetros para los modelos obtenidos de VPU indirecto vs tiempo, por las caras lateral y frontal.

ECUACIONES	$VPU_{indirecto\ lateral} = \exp(8.24 - \frac{1.60}{Tiempo})$	$VPU_{indirecto\ frontal} = \exp(8.24 - \frac{2.70}{Tiempo})$
PARÁMETRO	VPU indirecto lateral	VPU indirecto frontal
TIPO DE REGRESIÓN	Exponencial: Y = exp(a+b*X)	Exponencial: Y = exp(a+b*X)
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	-0,941759	-0,982913
R-CUADRADO	88,6911	96,6117
COEFICIENTES	RESULTADO	
INTERCEPTO	8,23856	8,23788
PENDIENTE	-1,59844	-2,70315
ANOVA		
PARÁMETROS	RESULTADO	
VALOR-P	0,0167	0,0027
DURBIN-WATSON (VALOR-P)	0,0729	0,0729

Fuente: Autores

En la tabla 6 se presentan dos relaciones matemáticas para predecir el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión indirecta en función del tiempo, así como los respectivos parámetros estadísticos, mostrando que en la VPU indirecta por la cara frontal obtiene un mayor coeficiente de correlación, la cual indica que por esta cara se generó una menor dispersión de las medidas de VPU, mostrando mayor homogeneidad en el material.

Para el análisis del modelo planteado se estiman parámetros esenciales como el caso del “valor-P” el cual determina o garantiza que el modelo estadístico ajustado es aceptable, siempre y cuando se cumpla la condición de que $P \leq 0{,}05$; en los resultados obtenidos se observa que este parámetro se cumple para ambos métodos de transmisión en sus respectivas caras analizadas, generando modelos confiables.

Otro parámetro tomado en cuenta es el Durbin-Watson (valor-P), el cual indica la correlación entre los residuos arrojados por el modelo, este tipo de residuos consiste en la diferencia entre un valor predicho proveniente de las expresiones suministradas por el modelo y un valor real tomado durante la práctica en el concreto analizado. Este parámetro debe ser mayor al valor-P y se observa que para ambos métodos de transmisión se cumple como se observa en las tablas 4 y 6.

Los coeficientes de correlación para las tablas 4 y 6 son muy cercanos a 1, lo cual indica una fuerte relación entre las variables mencionadas, demostrando que las relaciones matemáticas propuestas en estas tablas son adecuadas para describir la relación entre el tiempo de curado y la velocidad de pulso ultrasónico.

Bajo estos parámetros, en las figuras 18, 19 y 20 se aprecia que todos los datos se encuentran dentro del rango delimitado por las líneas de color naranja, lo cual indica que el modelo propuesto es altamente confiable.

El comportamiento asintótico de las figuras 18, 19 y 20 confirma la información obtenida por la empresa que suministró el concreto, en la cual se establecía que el concreto en estudio alcanzaba su máxima resistencia a los 28 días de curado, de este modo como se observa en las gráficas que la variación de la VPU a medida que se acerca al día 28 es muy poca, manteniéndose casi constante, lo cual también concuerda con resultados aportados por diversos autores. [4], [15]

4.2.3 Relación entre los métodos de transmisión directa e indirecta

En la tabla 7 se observan los datos promedios de VPU indirecto por las caras lateral y frontal con respecto a las medidas de VPU directo promedio, que se utilizaron para la elaboración de las figuras 21 y 22. Los datos promedio de las velocidades para cada cara provienen del promedio de los 45 datos para cada día de curado, sumando un total de 225, los cuales se muestran en los anexos E y F.

Es importante aclarar que las velocidades fueron obtenidas a partir de los 450 datos del tiempo de vuelo tomados en la muestra por este método (VPU indirecto) para cada una de las caras.

Tabla 7. Datos promedio de VPU indirecto y VPU directo.

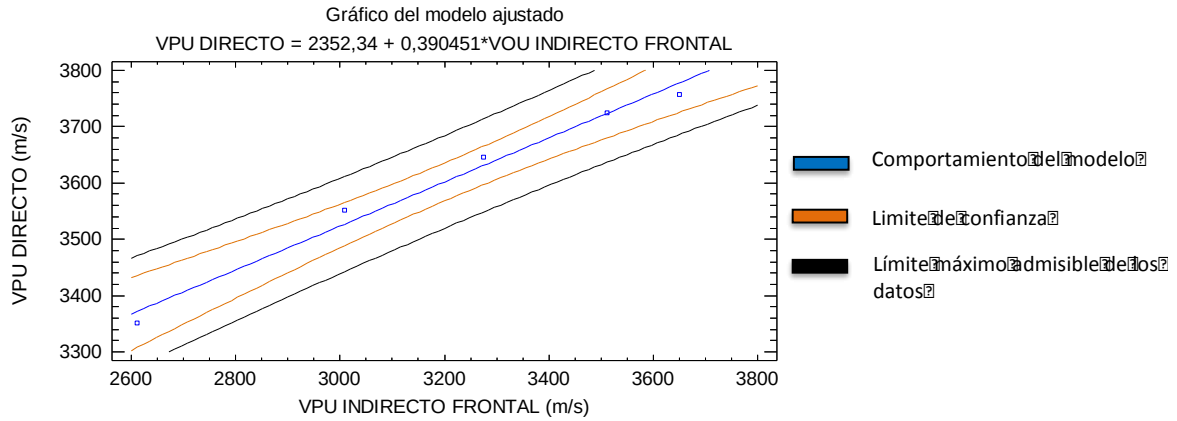
VPU indirecto cara lateral [m/s]	VPU indirecto cara frontal [m/s]	VPU directo promedio [m/s]
3059,25	2610,98	3380,15
3303,53	3008,20	3601,34
3378,26	3274,07	3661,77
3635,79	3511,08	3734,34
3774,98	3650,30	3771,32

Fuente: Autores

En la tabla 7 se aprecia que las velocidades obtenidas por el método de transmisión directa son mayores que las velocidades obtenidas por el método de transmisión indirecta debido a la trayectoria que describe la onda entre el palpador emisor y receptor, comprobando lo indicado por algunos investigadores. [20]

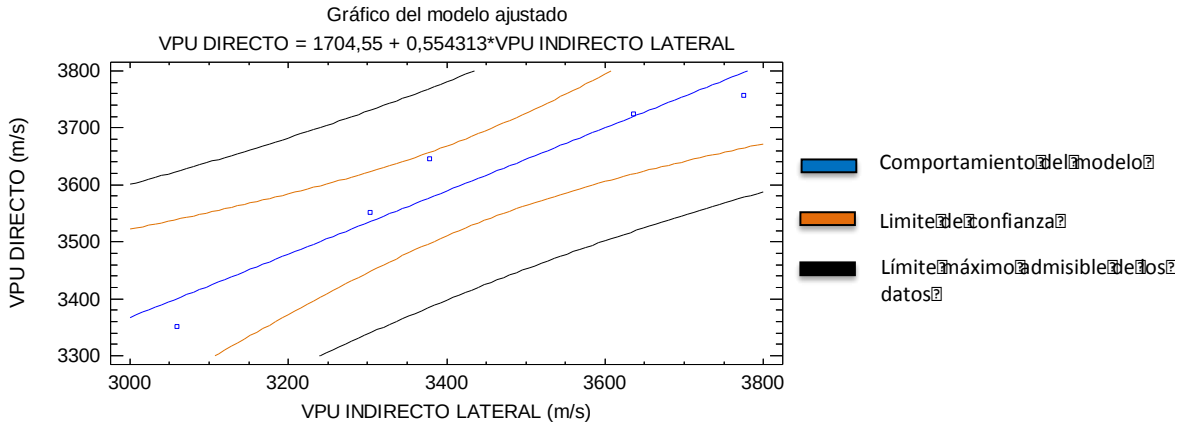
En las figuras 21 y 22 se presenta el comportamiento de las mediciones promedio entre VPU directo promedio y VPU indirecto para las caras lateral y frontal.

Figura 21. Modelo obtenido de VPU directo vs VPU indirecto, para la cara frontal.



Fuente: Autores

Figura 22. Modelo obtenido de VPU directo vs VPU indirecto , para la cara lateral.



Fuente: Autores

Las figuras 21 y 22 presentan un comportamiento lineal, el está basado en los parámetros del modelo estadístico encontrado para relacionar la VPU directa y la VPU indirecta por las caras frontal y lateral, mostrado en la tabla 8.

En la gráfica de la figura 21 se observa una menor dispersión de los datos que en la gráfica de la figura 22, debido probablemente al fenómeno de segregación nombrado anteriormente que afecta las mediciones dependiendo de la cara por la cual es medida. Sin embargo se aprecia que los datos de ambas gráficas se encuentran dentro del rango delimitado por las líneas de color naranja, lo cual indica una alta confiabilidad en el modelo obtenido. Por otro lado en la tabla 8 se aprecia la fuerte relación entre las variables de cada modelo, dado por el gran valor de R-cuadrado y de coeficiente de correlación, los cuales están cercanos al 100% y 1 respectivamente. Por último el valor-P y el parámetro de Durbin-Watson, muestra que no existe correlación entre los residuos.

Tabla 8. Parámetros para el modelo obtenido de VPU directo vs VPU indirecto, para las caras lateral y frontal.

ECUACIONES	$VPU_{directo} = 2352,34 + 0,390451 * VPU_{indirecto\ frontal}$	$VPU_{directo} = 1704,55 + 0,554313 * VPU_{indirecto\ lateral}$
PARÁMETRO	VPU directo	VPU directo
TIPO DE REGRESIÓN	Lineal: Y = a+b*X	Lineal: Y = a+b*X
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0,99	0,96
R-CUADRADO (%)	98,43	91,52
COEFICIENTES	RESULTADO	
INTERCEPTO	2352,34	1704,55
PENDIENTE	0,39	0,55
ANOVA		
PARÁMETROS	RESULTADO	
VALOR-P	0,00	0,01
DURBIN-WATSON (VALOR-P)	0,08	0,25

Fuente: Autores

En la tabla 8 se presentan dos relaciones matemáticas que permiten estimar medidas de VPU directo a partir de medidas de VPU indirecto por las caras lateral y frontal según corresponda.

4.2.4 Relación entre la resistencia a la compresión y la VPU por transmisión directa

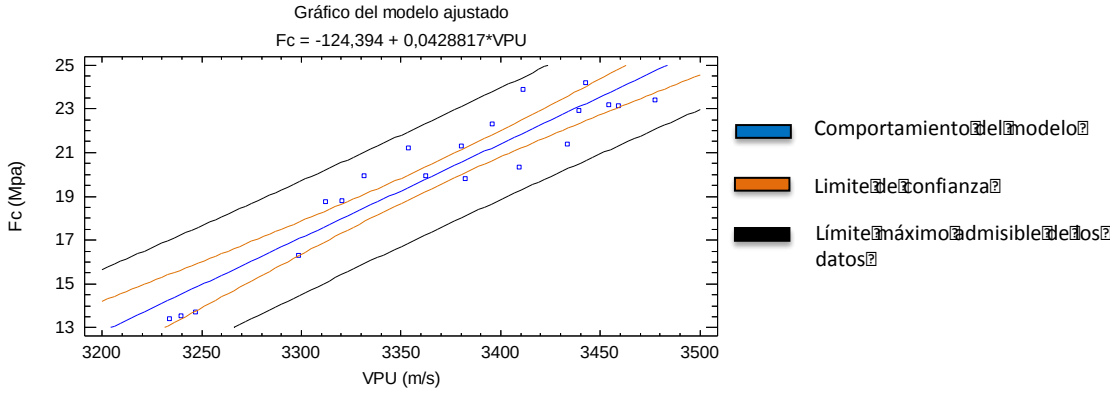
En la tabla 9 se observan los datos de VPU directo y resistencia a la compresión para cada día de curado, los cuales fueron tomados a partir de las probetas cilíndricas elaboradas para tal fin.

Tabla 9. Datos de resistencia a la compresión y de VPU directo para cada día de curado.

Tiempo [Días]	f'c [MPa]	VPU directo [m/s]
7	13,43	3233,63
	13,56	3239,74
	13,74	3246,75
	16,29	3298,52
14	18,76	3312,17
	18,82	3320,42
	19,96	3331,48
	21,22	3353,83
21	19,93	3362,29
	21,29	3380,28
	23,89	3411,03
	24,17	3442,34
28	19,79	3382,19
	20,35	3409,09
	21,4	3433,48
	23,15	3459,21
56	22,3	3395,58
	22,94	3439,38
	23,2	3454,23
	23,42	3477,25

Fuente: Autores

Figura 23. Modelo obtenido de la resistencia a la compresión f'c vs VPU directo.



Fuente: Autores

En la figura 23 se observa la directa relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, donde a medida que aumenta la VPU, del mismo modo lo hace la resistencia a la compresión.

En la tabla 10 se muestran los parámetros del modelo que relaciona la resistencia a la compresión y la VPU por el método de transmisión directa, así como la relación matemática que permite obtener valores de resistencia a la compresión a partir de valores de VPU por el método de transmisión directa.

Tabla 10. Parámetros para el modelo obtenido de f'c vs VPU directo.

ECUACIÓN	$f'c \quad 124.394 + 0.0428817 * VPU_{directo}$
PARÁMETRO	RESISTENCIA (f'c)
TIPO DE REGRESIÓN	Lineal: Y = a+b*X
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0,942518
R-CUADRADO	88,8341
COEFICIENTES	RESULTADO
INTERCEPTO	-124,394
PENDIENTE	0,0428817
ANOVA	
PARÁMETROS	RESULTADO
VALOR-P	0,0000
DURBIN-WATSON (VALOR-P)	P=0,0004

Fuente: Autores

Estos resultados son validados gracias al análisis que se obtuvo del ANOVA, ya que en general, el valor de R-cuadrado es alto y en algunos casos llegando cerca del 100%. Sumado a lo anterior está el valor-P, el cual es menor en todos los casos que la significancia (0.05). Este modelo permite establecer que a partir de medidas de VPU para un concreto dentro del rango de estudio, se puede obtener o estimar la resistencia a la compresión (f'c) por métodos no destructivos; por estas razones se establece que todos los modelos mostrados anteriormente por el software son aprobados.

Para obtener valores de resistencia a la compresión a partir de velocidades de pulso ultrasónico por el método de transmisión indirecto, es necesario convertir dichas medidas de VPU indirecto a medidas de VPU directo mediante las ecuaciones mostradas en la tabla 8, según la cara de medición y posteriormente convertir estas medidas de VPU directo a valores de resistencia a la compresión aplicando la ecuación mostrada en la tabla 10. Sin embargo es posible realizar esta conversión hallando una ecuación que relaciona directamente VPU indirecto con resistencia a la compresión, esta relación se muestra a continuación.

Cabe resaltar que los valores de resistencia a la compresión (f'c) de la relación que se muestra a continuación corresponden a los datos tomados en los cilindros, y los valores de VPU indirecto fueron tomados de la probeta tipo columna. Se realizó esta relación asumiendo que el concreto utilizado para ambos tipos de probeta fue el mismo, por consiguiente deberían presentar las mismas propiedades mecánicas.

4.2.5 Relación entre la resistencia a la compresión y la VPU por transmisión indirecta

A continuación se muestra la relación existente entre la resistencia a la compresión y la VPU por el método de transmisión indirecta, presentando los promedios de VPU tomados por las caras frontal y lateral. En la tabla 11 se

exponen estos resultados junto a los valores de resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas.

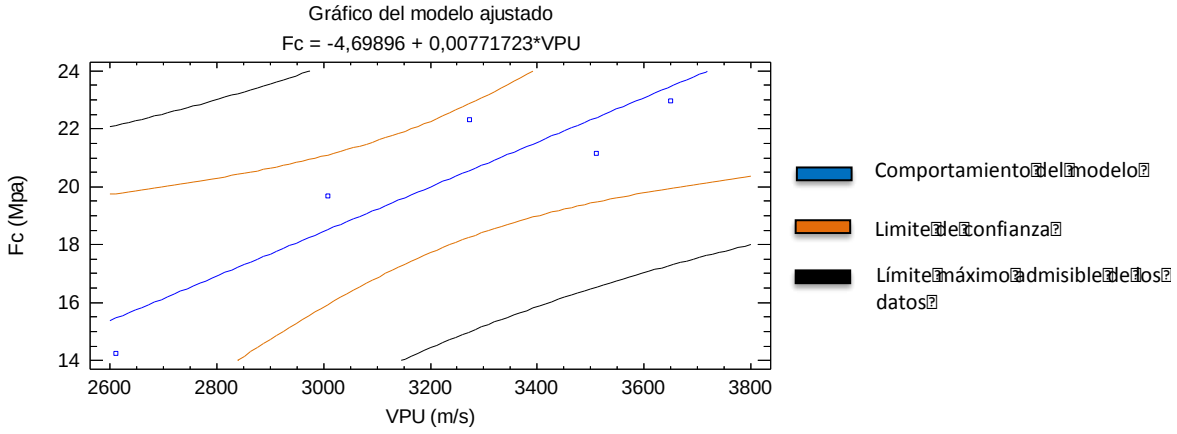
Tabla 11. Datos promedio de resistencia a la compresión y de VPU indirecto por las caras frontal y lateral.

f'c [MPa]	VPU indirecto frontal [m/s]	VPU indirecto lateral [m/s]
14,26	2610,98	3059,25
19,69	3008,20	3303,53
22,32	3274,07	3378,26
21,17	3511,08	3635,79
22,97	3650,30	3774,98

Fuente: Autores

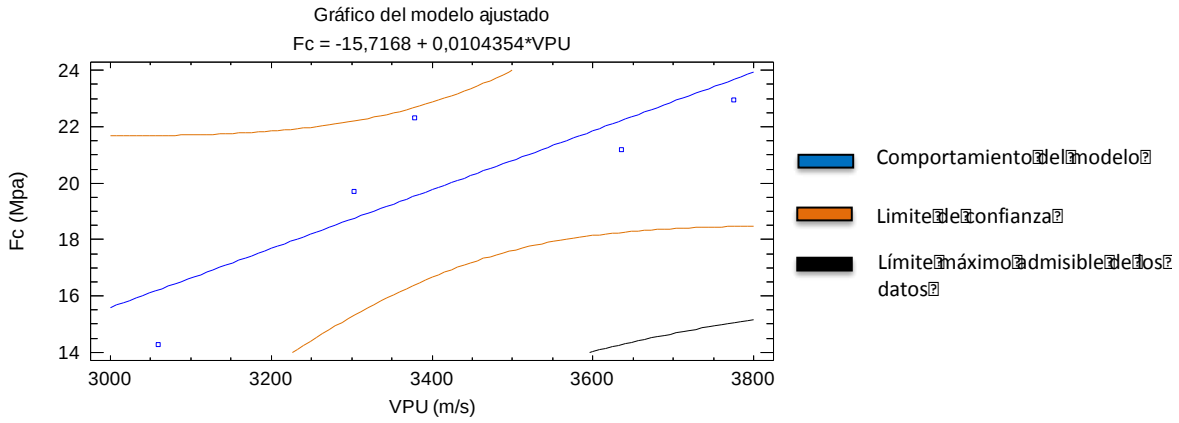
En la tabla 11 se observan los datos promedio de VPU indirecto y de resistencia a la compresión para cada día de curado, estos datos fueron utilizados para la elaboración del modelo de las figuras 24 y 25.

Figura 24. Modelo obtenido de la resistencia a la compresión f'c vs VPU indirecto frontal.



Fuente: Autores

Figura 25. Modelo obtenido de la resistencia a la compresión f'c vs VPU indirecto lateral.



Fuente: Autores

En la tabla 12 se analizan los parámetros estadísticos obtenidos en la elaboración de las figuras 24 y 25, indicando la relación para estimar la resistencia a la compresión en función de la VPU por las caras frontal y lateral.

Tabla 12. Parámetros para los modelos obtenidos de f'c vs VPU indirecto por las caras frontal y lateral.

	VPU indirecto frontal	VPU indirecto lateral
ECUACIONES	$f'c = -4,69896 + 0,00771723 * VPU_{indirecto\ frontal}$	$f'c = -15,7168 + 0,0104351 * VPU_{indirecto\ lateral}$
PARÁMETRO	RESISTENCIA (f'c)	RESISTENCIA (f'c)
TIPO DE REGRESIÓN	Lineal: Y = a+b*X	Lineal: Y = a+b*X
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	0,918149	0,843297
R-CUADRADO	84,2997	71,1151
COEFICIENTES	RESULTADO	RESULTADO
INTERCEPTO	-4,69896	-15,7168
PENDIENTE	0,00771723	0,0104354
ANOVA		
PARÁMETROS	RESULTADO	RESULTADO
VALOR-P	0,0278	0,0727
DURBIN-WATSON (VALOR-P)	P=0,1982	P=0,1476

Fuente: Autores

Analizando las figuras 24 y 25 se observa una mayor dispersión en los datos obtenidos por la cara lateral, sin embargo los dos comportamientos están dentro de los rangos estadísticamente confiables, con valores en los coeficientes de correlación del rango de 91% y 84% respectivamente.

Los resultados de los parámetros de la tabla 12 muestran que el modelo de regresión lineal para estas dos variables es aceptado, dado que el valor P es menor que la significancia del 0.05%. Los parámetros de R-cuadrado y coeficiente de correlación muestran que la variabilidad de la resistencia está muy relacionada con la Velocidad de Pulso Ultrasónico VPU, mientras que el coeficiente de Durbin-Watson es mayor que el valor-P, con lo cual se demuestra que no existe ninguna influencia en la manera como se organizaron los datos sobre el modelo planteado.

En la tabla 12 se expone las correlaciones matemáticas para cada una de las caras, mediante estas expresiones es posible estimar directamente valores de resistencia a partir de medidas de VPU por el método indirecto.

CONCLUSIONES

Con base en la investigación realizada y en los resultados obtenidos para relacionar la resistencia a la compresión durante los días de curado con la velocidad de pulso ultrasónico por los métodos de transmisión directa e indirecta, se pudo concluir lo siguiente:

La influencia del tiempo de curado de las muestras de concreto sobre las medidas de VPU tanto indirectas como directas, presentan un incremento de manera exponencial a medida que transcurren los días de curado en el concreto, así mismo se aprecia que para el día 14 la velocidad de pulso ultrasónico obtiene un cambio de pendiente significativo y un comportamiento asintótico a partir de él.

La velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión directa y la resistencia a la compresión se relacionan mediante un modelo de tipo lineal, para este caso con un coeficiente de correlación de 0,94, el cual indica que este modelo puede predecir la resistencia a la compresión a partir de datos de VPU directo con gran precisión, para un concreto dentro del rango de estudio.

Se comprobó la sensibilidad del método indirecto a la dirección de fundición del concreto, presentando diferencias entre los valores promedio para las caras lateral y frontal que van desde el 3,18% hasta el 17,17%.

Se obtuvo una ecuación de tipo lineal que relaciona la velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión directa con la velocidad de pulso ultrasónico por el método de transmisión indirecta, para mediciones realizadas por la cara frontal y la cara lateral. Los coeficientes de correlación obtenidos son de 0,99 y 0,96 respectivamente, lo cual indica que existe una baja dispersión en los

datos hallados, permitiendo de este modo hallar VPU directo a partir de medidas de VPU indirecto.

Se obtuvo una expresión matemática mediante un modelo de tipo lineal, con la cual es posible obtener directamente valores de resistencia a la compresión (f'c) a partir de medidas de VPU por el método de transmisión indirecta.

RECOMENDACIONES

Desarrollar un proyecto en cual se relacione medidas de VPU directo e indirecto para estimar la resistencia a la compresión en concreto con refuerzo.

Aplicar los conocimientos adquiridos en el presente proyecto y los realizados anteriormente relacionados con ensayos no destructivos en concretos, para llevarlos a la práctica en estructuras de concreto que se encuentren en funcionamiento.

Se recomienda para un próximo estudio, realizar extracciones de núcleos o cortes a las muestras de concreto analizadas por VPU indirecto para posteriormente poder realizar un ensayo a compresión y de esta manera obtener una relación más próxima entre el VPU indirecto y la resistencia a la compresión.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍCAS

[1] ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado, Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2010, pp 33-34.

[2] CASTRO NIETO, José Ángel, ‘’Evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia mecánica de concretos aligerados con MEPS’’, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Veracruzana, Mexico,2012.

[3] HANDBOOK ON NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. The Ultrasonic Pulse Velocity Method, Second Edition, Chapter 8, 2006.

[4] HERRERA ORTIZ, 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 maestría, Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales -2011.

[5] HISTORIA DEL CONCRETO < Disponible en: http://elconcreto.blogspot.com/2009/01/historia-del-concreto-hidraulico.html. Visitado en Diciembre de 2012.

[6] ISMAIL OZGUR YAMAN, GOKHAN INEI, NAZLI YESILLER, AND HALUK M. AKTAN, Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission, *ACI Materials Journal*, November-December 2001.

[7] MALHOTRA V.M. (1985). “Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources”, Ottawa, Canadá. Septiembre, 2002. p. 110.

[8] MÉTODO DE ENSAYOS ULTRASÓNICOS< Disponible en: http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6154/8/07.pdf. Visitado en Enero de 2013.

[9] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA “NTC 550: Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra’’. Normas Técnicas Colombianas para el sector de la construcción, ICONTEC, Bogotá D.C.- Colombia , Junio, 2000.

[10] _____ ‘’NTC 673: Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto’’, Normas Técnicas Colombianas para el sector de la construcción, ICONTEC, Bogotá D.C.- Colombia, Febrero, 2010.

[11] _____ “NTC 4325: Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto. Normas Técnicas Colombianas para el sector de la construcción, ICONTEC, Bogotá D.C.- Colombia, Diciembre 1997.

[12] NEVILLE A. Maintenance and Durability of Concrete Structures. Concrete International. November, 2001

[13] NORMA TÉCNICA ASTM C39 / C39M - 12 Standard Test “Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens’’.

[14] Properties of Concrete Workability, Setting, Bleeding, Segregation, Hydration, Air entrainment < Disponible en: http://www.aboutcivil.org/Properties-of-concrete-factors-affecting-them.html. Visitado en febrero de 2013.

[15] P. TURGUT*A* AND O. F. KUCUK*B,* Comparative Relationships of Direct, Indirect and Semi-Direct Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in Concrete, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Harran University, January 20, 2006.

[16] Software estadístico STARGRAPHICS Centurión XVI.

[17] Técnica para estimar la calidad del concreto endurecido < Disponible en : http://www.imcyc.com/revistacyt/nov11/arttecnologia.html. Visitado en febrero de 2013.

[18] TORRES Juan, PEREZ Edilson, Efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la presencia de daño en concreto sin refuerzo, Trabajo de grado, Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales -2011.

[19] VÁSQUEZ CORASPE, Luis Alberto, Estudio y Caracterización mediante ensayos no destructivos con ultrasonido de materiales compuestos concreto - raspadura de caucho (RIPIO), Universidad Central de Venezuela, Caracas, Diciembre de 2003.

BIBLIOGRAFIA

ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado, Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2010, pp 33-34.

CASTRO NIETO, José Ángel, ‘’Evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia mecánica de concretos aligerados con MEPS’’, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Veracruzana, Mexico,2012.

HANDBOOK ON NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. The Ultrasonic Pulse Velocity Method, Second Edition, Chapter 8, 2006.

HERRERA ORTIZ, 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 maestría, Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales -2011.

HISTORIA DEL CONCRETO < Disponible en: http://elconcreto.blogspot.com /2009/01/historia-del-concreto-hidraulico.html. Visitado en Diciembre de 2012.

ISMAIL OZGUR YAMAN, GOKHAN INEI, NAZLI YESILLER, AND HALUK M. AKTAN, Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission, *ACI Materials Journal*, November-December 2001.

MALHOTRA V.M. (1985). “Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources”, Ottawa, Canadá. Septiembre, 2002. p. 110.

MÉTODO DE ENSAYOS ULTRASÓNICOS< Disponible en: http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6154/8/07.pdf. Visitado en Enero de 2013.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA “NTC 550: Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra’’. Normas Técnicas Colombianas para el sector de la construcción, ICONTEC, Bogotá D.C.- Colombia , Junio, 2000.

_____ ‘’NTC 673: Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto’’, Normas Técnicas Colombianas para el sector de la construcción, ICONTEC, Bogotá D.C.- Colombia, Febrero, 2010.

_____ “NTC 4325: Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto. Normas Técnicas Colombianas para el sector de la construcción, ICONTEC, Bogotá D.C.- Colombia, Diciembre 1997.

NEVILLE A. Maintenance and Durability of Concrete Structures. Concrete International. November, 2001

NORMA TÉCNICA ASTM C39 / C39M - 12 Standard Test “Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens’’.

Properties of Concrete Workability, Setting, Bleeding, Segregation, Hydration, Air entrainment < Disponible en: http://www.aboutcivil.org/Properties-of-concrete-factors-affecting-them.html. Visitado en febrero de 2013.

P. TURGUT*A* AND O. F. KUCUK*B,* Comparative Relationships of Direct, Indirect and Semi-Direct Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in Concrete, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Harran University, January 20, 2006.

Software estadístico STARGRAPHICS Centurión XVI.

Técnica para estimar la calidad del concreto endurecido < Disponible en : http://www.imcyc.com/revistacyt/nov11/arttecnologia.html. Visitado en febrero de 2013.

TORRES Juan, PEREZ Edilson, Efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la presencia de daño en concreto sin refuerzo, Trabajo de grado, Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales -2011.

VÁSQUEZ CORASPE, Luis Alberto, Estudio y Caracterización mediante ensayos no destructivos con ultrasonido de materiales compuestos concreto - raspadura de caucho (RIPIO), Universidad Central de Venezuela, Caracas, Diciembre de 2003.

ANEXOS

Anexo A. Promedio de VPU por el método de transmisión directa por la cara lateral para cada día de curado.

VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO POR EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN DIRECTA POR LA CARA LATERAL [m/s]														
DÍA 7			DÍA 14			DÍA 21			DÍA 28			DÍA 56		
Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C
3342,246	3333,333	3396,739	3501,401	3503,854	3607,504	3631,082	3620,565	3714,710	3723,008	3731,343	3782,148	3831,418	3765,060	3782,148
3315,650	3331,113	3340,013	3491,620	3506,311	3602,305	3631,082	3649,635	3657,644	3736,921	3736,921	3796,507	3802,281	3779,289	3849,115
3302,510	3335,557	3311,258	3503,854	3521,127	3566,334	3631,082	3646,973	3671,072	3734,130	3714,710	3753,754	3787,879	3745,318	3676,471
3313,453	3331,113	3306,878	3494,060	3511,236	3508,772	3644,315	3628,447	3641,661	3599,712	3700,962	3739,716	3805,175	3770,739	3690,037
3306,878	3424,658	3320,053	3561,254	3617,945	3548,616	3660,322	3711,952	3687,316	3720,238	3802,281	3725,782	3779,289	3858,025	3723,008
3394,433	3362,475	3320,053	3551,136	3531,073	3563,792	3681,885	3639,010	3679,176	3762,227	3717,472	3773,585	3808,073	3785,011	3770,739
3340,013	3322,259	3295,979	3479,471	3477,051	3553,660	3628,447	3589,375	3646,973	3706,449	3709,199	3728,561	3770,739	3762,227	3736,921
3304,693	3309,067	3376,097	3460,208	3484,321	3563,792	3597,122	3644,315	3700,962	3711,952	3728,561	3742,515	3840,246	3753,754	3703,704
3270,111	3333,333	3378,378	3445,899	3496,503	3533,569	3586,801	3623,188	3684,598	3720,238	3728,561	3762,227	3819,710	3773,585	3671,072
3267,974	3380,663	3389,831	3533,569	3494,060	3571,429	3641,661	3660,322	3723,008	3711,952	3756,574	3802,281	3843,198	3787,879	3676,471
3267,974	3315,650	3322,259	3474,635	3516,174	3553,660	3607,504	3623,188	3679,176	3644,315	3725,782	3810,976	3790,751	3745,318	3641,661
3293,808	3295,979	3326,680	3469,813	3496,503	3498,950	3602,305	3591,954	3639,010	3649,635	3665,689	3739,716	3759,964	3698,225	3681,885
3289,474	3257,329	3298,153	3462,604	3427,005	3412,969	3591,954	3581,662	3612,717	3711,952	3649,635	3679,176	3711,952	3684,598	3723,008
3311,258	3293,808	3270,111	3469,813	3399,048	3496,503	3581,662	3579,098	3612,717	3684,598	3660,322	3700,962	3736,921	3679,176	3709,199
3282,994	3298,153	3274,394	3392,130	3472,222	3477,051	3594,536	3610,108	3584,229	3671,072	3679,176	3739,716	3706,449	3723,008	3679,176
3270,111	3315,650	3309,067	3472,222	3455,425	3506,311	3617,945	3602,305	3607,504	3690,037	3684,598	3698,225	3706,449	3731,343	3663,004
3531,073	3322,259	3315,650	3403,676	3486,750	3506,311	3586,801	3581,662	3612,717	3652,301	3692,762	3728,561	3756,574	3717,472	3660,322
3272,251	3295,979	3331,113	3450,656	3484,321	3511,236	3586,801	3597,122	3615,329	3625,816	3709,199	3700,962	3711,952	3714,710	3665,689

Fuente: Autores

Anexo B. Promedio de VPU por el método de transmisión directa por la cara frontal para cada día de curado.

VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO POR EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN DIRECTA POR LA CARA FRONTAL [m/s]														
DÍA 7			DÍA 14			DÍA 21			DÍA 28			DÍA 56		
Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C
3491,620	3484,321	3438,790	3639,010	3684,598	3631,082	3700,962	3717,472	3684,598	3765,060	3813,883	3753,754	3813,883	3852,080	3767,898
3401,361	3436,426	3403,676	3657,644	3617,945	3639,010	3698,225	3690,037	3723,008	3805,175	3808,073	3782,148	3816,794	3793,627	3852,080
3371,544	3357,958	3434,066	3586,801	3615,329	3684,598	3676,471	3717,472	3698,225	3731,343	3779,289	3825,555	3785,011	3790,751	3849,115
3373,819	3382,950	3392,130	3636,364	3646,973	3620,565	3652,301	3731,343	3723,008	3739,716	3785,011	3753,754	3799,392	3805,175	3808,073
3394,433	3389,831	3399,048	3599,712	3591,954	3641,661	3657,644	3703,704	3703,704	3739,716	3785,011	3765,060	3779,289	3767,898	3770,739
3342,246	3392,130	3385,240	3584,229	3563,792	3623,188	3641,661	3692,762	3660,322	3280,840	3773,585	3739,716	3787,879	3753,754	3750,938
3295,979	3335,557	3322,259	3573,981	3518,649	3561,254	3652,301	3679,176	3623,188	3728,561	3731,343	3700,962	3770,739	3734,130	3723,008
3408,316	3353,454	3448,276	3571,429	3594,536	3663,004	3649,635	3676,471	3687,316	3734,130	3731,343	3787,879	3773,585	3782,148	3734,130
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3380,663	3360,215	3353,454	3607,504	3536,068	3597,122	3633,721	3631,082	3641,661	3714,710	3720,238	3728,561	3759,398	3756,574	3750,938
3434,066	3371,544	3346,720	3581,662	3599,712	3566,334	3703,704	3668,379	3612,717	3756,574	3731,343	3728,561	3813,883	3787,879	3736,921
3438,790	3364,738	3306,878	3631,082	3589,375	3584,229	3681,885	3681,885	3657,644	3773,585	3753,754	3711,952	3799,392	3825,555	3739,716
3369,272	3371,544	3317,850	3516,174	3673,769	3573,981	3623,188	3663,004	3646,973	3695,492	3779,289	3745,318	3736,921	3816,794	3750,938
3355,705	3450,656	3340,013	3589,375	3676,471	3568,879	3644,315	3646,973	3602,305	3684,598	3785,011	3734,130	3709,199	3813,883	3734,130
3369,272	3394,433	3335,557	3589,375	3610,108	3591,954	3599,712	3681,885	3620,565	3720,238	3725,782	3745,318	3731,343	3805,175	3725,782
3360,215	3367,003	3367,003	3594,536	3599,712	3553,660	3657,644	3617,945	3573,981	3720,238	3723,008	3668,379	3711,952	3753,754	3700,962
3360,215	3351,206	3369,272	3553,660	3568,879	3584,229	3613,761	3639,010	3597,122	3711,952	3748,126	3673,769	3750,938	3759,398	3706,449

Fuente: Autores

Los datos faltantes en la tabla del anexo B se debe al defecto que se presento en la superficie de la cara frontal que se muestra en la figura 12 del presente trabajo.

Anexo C. Promedio de VPU por el método de transmisión indirecta por la cara lateral para cada día de curado.

VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO POR EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN INDIRECTA POR LA CARA LATERAL [m/s]														
DÍA 7			DÍA 14			DÍA 21			DÍA 28			DÍA 56		
Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C
3325,942	3121,748	3191,489	3257,329	3525,264	3191,489	3397,508	3476,246	3344,482	3875,969	3891,051	4120,879	3916,449	4081,633	4354,136
3162,055	3174,603	3236,246	3475,239	3445,306	3281,378	3590,664	3445,306	3350,084	3724,395	3937,008	3864,734	3952,569	4012,036	4123,711
3126,954	3073,141	3270,111	3438,790	3357,958	3436,426	3431,709	3467,406	3474,635	3494,060	3765,060	3799,392	3668,379	3968,254	3888,025
3089,598	3121,748	3234,501	3393,665	3393,665	3314,917	3488,372	3468,208	3521,127	3607,937	3705,991	3726,708	3669,725	3875,969	3896,104
3044,802	3112,494	3231,764	3306,566	3403,014	3346,080	3394,762	3453,379	3487,793	3526,448	3608,247	3678,403	3611,971	3765,465	3789,930
3120,125	3104,385	3138,486	3392,706	3351,487	3280,033	3375,527	3436,426	3417,343	3467,707	3590,664	3642,987	3581,021	3703,704	3757,633
3136,982	3095,975	3250,271	3360,717	3338,279	3317,361	3428,571	3345,725	3500,583	3493,789	3629,032	3690,037	3607,214	3723,624	3742,204
3077,870	2575,328	2281,542	3279,764	3400,204	3123,048	3336,670	3462,604	3552,398	3546,099	3598,417	3632,401	3668,379	3657,644	3692,762
3115,265	3128,555	3232,442	3247,712	3352,636	3243,881	3373,198	3471,127	3588,907	3490,955	3659,348	3740,224	3594,771	3694,995	3773,585
3133,978	3129,074	2822,201	3391,747	3324,100	3000,750	3415,884	3394,625	2740,352	3560,831	3525,264	3614,458	3644,094	3638,569	3686,636
3078,380	3138,580	2876,106	3326,510	3357,438	3127,255	3335,899	3442,797	3107,817	3516,365	3525,902	3651,685	3615,128	3665,069	3705,815
3098,031	3125,698	2892,562	3326,206	3371,057	3042,156	3409,644	3433,055	2930,710	3551,497	3527,337	3626,943	3596,198	3642,987	5103,901
3155,238	2646,903	3128,911	3280,122	3370,029	2945,219	3348,962	3441,946	2977,372	3507,951	3499,767	3604,903	3592,814	3648,747	3660,322
3156,441	2687,269	3047,619	3275,333	3362,757	3069,839	3376,952	3469,211	3029,156	3504,929	3539,823	3642,987	3593,890	3637,190	3686,636
2999,294	2771,438	3004,064	3325,509	3400,680	3107,293	3372,347	3554,255	3159,851	3505,878	3572,930	3623,188	3566,184	3665,373	3752,759

Fuente: Autores

Anexo D. Promedio de VPU por el método de transmisión indirecta por la cara frontal para cada día de curado.

VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO POR EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN INDIRECTA POR LA CARA FRONTAL [m/s]														
DÍA 7			DÍA 14			DÍA 21			DÍA 28			DÍA 56		
Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C	Columna A	Columna B	Columna C
2429,150	3546,099	3344,482	3690,037	3558,719	2559,727	4032,258	3773,585	4189,944	4243,281	3978,780	4524,887	4398,827	4160,888	4709,576
2562,460	3445,306	3252,033	3679,853	3623,188	2941,176	4004,004	3831,418	3913,894	4210,526	3992,016	4115,226	4333,694	4184,100	4228,330
2717,391	3401,361	2581,311	3518,649	3453,039	3396,739	3927,730	3965,107	3961,965	4032,258	4000,000	4035,513	4091,653	4128,819	4187,605
2177,068	2749,771	2637,363	3508,772	3519,062	3452,244	3797,468	3986,711	3828,973	3968,254	3989,362	3963,012	4084,411	4008,016	4034,970
2378,525	2738,654	2741,872	3657,262	3533,569	3547,897	3737,320	3910,615	3743,316	3818,876	3993,155	3781,740	3910,615	4081,633	3886,730
2375,297	2461,538	2802,102	2526,050	3006,389	3539,823	2620,373	3201,281	3857,281	3759,398	3197,442	3921,569	3915,810	3795,066	3950,617
2420,005	2131,186	2553,916	2576,582	3033,367	3578,529	2597,403	3249,097	3746,878	3729,797	3789,474	3928,416	3957,784	3854,390	3991,131
2218,279	2242,655	2592,017	2688,895	2723,312	2380,952	2878,526	3317,850	2650,411	2926,544	3821,169	3853,565	3886,514	3862,495	3966,680
2343,417	2321,165	2328,042	2682,927	2828,491	2493,766	2698,724	3322,259	2728,851	2974,581	3816,794	2768,689	3074,343	3927,169	3852,890
2459,520	2409,155	2501,563	2795,248	2881,152	2576,213	2799,160	3034,134	2646,670	2812,940	3381,234	2808,331	2824,859	3476,246	2879,770
2511,592	2474,305	2520,357	2592,223	2959,927	2610,966	2809,596	3054,511	2759,499	2876,743	3352,243	2849,003	2910,882	3458,367	2918,070
2583,979	2533,478	2605,621	2700,617	2777,778	2700,617	2860,646	2859,477	2883,625	2956,705	3394,762	2936,858	2992,732	3434,740	2997,859
2626,970	2584,425	2640,380	2770,595	2767,528	2758,367	2931,405	2787,068	2934,846	3013,864	3457,815	3020,540	3037,667	3502,218	3055,612
2666,222	2653,840	2653,840	2840,909	2757,670	2746,310	2945,508	2828,354	2941,176	2999,625	2967,359	3038,359	3034,901	3088,803	3059,273
2396,391	2457,713	2722,178	2920,460	2803,892	2709,595	2972,028	2881,844	2930,529	3029,763	2894,602	3073,585	3095,975	2938,127	3092,596

Fuente: Autores

Anexo E. Promedio de VPU por el método de transmisión directa e indirecta por la cara frontal para cada día de curado.

VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO POR EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN DIRECTA E INDIRECTA POR LA CARA FRONTAL [m/s]									
DÍA 7		DÍA 14		DÍA 21		DÍA 28		DÍA 56	
VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto
2429,150	3546,099	3690,037	3558,719	4032,258	3773,585	4243,281	3978,780	4398,827	4160,888
2562,460	3445,306	3679,853	3623,188	4004,004	3831,418	4210,526	3992,016	4333,694	4184,100
2717,391	3401,361	3518,649	3453,039	3927,730	3965,107	4032,258	4000,000	4091,653	4128,819
2177,068	2749,771	3508,772	3519,062	3797,468	3986,711	3968,254	3989,362	4084,411	4008,016
2378,525	2738,654	3657,262	3533,569	3737,320	3910,615	3818,876	3993,155	3910,615	4081,633
2375,297	2461,538	2526,050	3006,389	2620,373	3201,281	3759,398	3197,442	3915,810	3795,066
2420,005	2131,186	2576,582	3033,367	2597,403	3249,097	3729,797	3789,474	3957,784	3854,390
2218,279	2242,655	2688,895	2723,312	2878,526	3317,850	2926,544	3821,169	3886,514	3862,495
2343,417	2321,165	2682,927	2828,491	2698,724	3322,259	2974,581	3816,794	3074,343	3927,169
2459,520	2409,155	2795,248	2881,152	2799,160	3034,134	2812,940	3381,234	2824,859	3476,246
2511,592	2474,305	2592,223	2959,927	2809,596	3054,511	2876,743	3352,243	2910,882	3458,367
2583,979	2533,478	2700,617	2777,778	2860,646	2859,477	2956,705	3394,762	2992,732	3434,740
2626,970	2584,425	2770,595	2767,528	2931,405	2787,068	3013,864	3457,815	3037,667	3502,218
2666,222	2653,840	2840,909	2757,670	2945,508	2828,354	2999,625	2967,359	3034,901	3088,803
2396,391	2457,713	2920,460	2803,892	2972,028	2881,844	3029,763	2894,602	3095,975	2938,127

Fuente: Autores

Anexo F. Promedio de VPU por el método de transmisión directa e indirecta por la cara frontal para cada día de curado.

VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO POR EL MÉTODO DE TRANSMISIÓN DIRECTA E INDIRECTA POR LA CARA LATERAL [m/s]									
DÍA 7		DÍA 14		DÍA 21		DÍA 28		DÍA 56	
VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto	VPU directo	VPU indirecto
3328,925	3213,060	3533,412	3324,694	3646,121	3406,079	3756,783	3962,633	3810,229	4117,406
3316,442	3190,968	3530,438	3400,641	3649,709	3462,018	3734,198	3842,046	3736,556	4029,439
3317,148	3156,735	3504,689	3411,058	3638,141	3457,917	3680,130	3686,171	3755,317	3841,552
3350,530	3148,616	3575,938	3367,416	3686,530	3492,569	3749,434	3680,212	3786,774	3813,933
3358,987	3129,687	3548,667	3351,887	3666,690	3445,311	3751,095	3604,366	3787,941	3722,455
3319,417	3120,998	3503,394	3341,409	3621,598	3409,766	3714,736	3567,120	3756,629	3680,786
3329,952	3161,076	3502,773	3338,786	3647,466	3424,960	3727,676	3604,286	3765,901	3691,014
3327,274	2644,914	3491,991	3267,672	3631,529	3450,557	3737,009	3592,306	3754,789	3672,928
3346,156	3158,754	3533,019	3281,410	3674,997	3477,744	3756,936	3630,176	3769,182	3687,784
3301,961	3028,418	3514,823	3238,866	3636,623	3183,620	3727,024	3566,851	3725,910	3656,433
3305,489	3031,022	3488,422	3270,401	3611,090	3295,504	3685,013	3564,651	3713,358	3662,004
3281,652	3038,763	3434,193	3246,473	3595,444	3257,803	3680,254	3568,592	3706,520	4114,362
3291,726	2977,017	3455,121	3198,457	3591,159	3256,093	3681,961	3537,540	3708,432	3633,961
3285,180	2963,776	3447,135	3235,976	3596,291	3291,773	3696,655	3562,580	3702,878	3639,239
3298,276	2924,932	3477,986	3277,827	3609,251	3362,151	3690,953	3567,332	3700,265	3661,439

Fuente: Autores