

**EVALUACIÓN DE EL EFECTO DE LAS BARRAS DE REFUERZO DEL
CONCRETO SOBRE LAS MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO**

**FRANCISCO JAVIER PARDO RIAÑO
EDUAR RAMIRO PEREZ GERENA**

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

2010

**EVALUACIÓN DE EL EFECTO DE LAS BARRAS DE REFUERZO DEL
CONCRETO SOBRE LAS MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO**

**FRANCISCO JAVIER PARDO RIAÑO
EDUAR RAMIRO PEREZ GERENA**

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

Director:

PhD. RICARDO A. CRUZ HERNÁNDEZ

Codirector:

Ing. JULIAN ORLANDO HERRERA ORTIZ

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

2010

*A Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en todo momento.
A mis padres, José León Pardo e Hilda Rosa Riaño por darme la vida, sus
consejos, esfuerzos, valores inculcados y por su apoyo total e incondicional.
A mis hermanos, Lucas, Aíde, Esteban, Chejo, Alfredo, Marcela quienes con su
colaboración y apoyo ayudaron a la culminación de ésta meta. A Leo que en paz
descanse, quien fue el que me mostro el camino, me guió en los primeros pasos y me
dio su apoyo incondicional para no desfallecer en el intento.
A Mari por permitirme ser parte de su vida y darme el mejor motivo para luchar
ante cualquier obstáculo y salir siempre adelante.
A mis amigos de siempre Jhon Fredy y Jhonnathan Javier por estar en las buenas
y en las malas. A mis amigos y compañeros de vida universitaria Zarate, Pacheco,
Chapu, Pérez, Oscar, López, Laura C, Laura D, Jenny, Néstor, Peña, Diego, Tita,
Caro y Zulay, por hacer de esta una experiencia inolvidable.*

Francisco Javier Pardo Riaño

A Dios, por darme esa fortaleza de cada día de mi vida, para seguir luchando y seguir adelante cumpliendo con mis metas.

A mis padres, Ramiro Perez y Ada Gerena por su amor, comprensión y paciencia, que a pesar de la distancia siempre me apoyaron.

A mi hermanita, Leidy Yenifer por sus ánimos y apoyo incondicional logré salir adelante y también eres parte de este sueño.

A Alexandra, gracias por estar conmigo en estos momentos tan importante de mi vida y a pesar de la lejanía siempre estuviste ahí.

A mis nonas, por ser tan lindas y siempre deseándome lo mejor.

A La familia PEREZ GERENA, por su ayuda que de alguna y de otra manera la tuve.

A mi compañero, pachó por tenerme paciencia y ofrecerme su amistad.

A mis amigos de toda la vida, Juan Carlos Rincón por sus consejos y Diana Hoyos por su cariño, nunca cambien.

A mis compañeros de vida universitaria, Andrés Castro, Héctor Torres, Hugo Acosta, Nathaly Ariza, Hugo Rodríguez, Wilson Rivera, Yurany Camacho y los hermanos Hermes y Luis Sotomonte, por su lealtad y compañía en este camino de ser unos profesionales.

A mis compañeros de carrera, Alejo Duran, Laura Corzo, Cesar Sarmiento, Laura Duran, Jenny Forero, Adriana Catalina, Néstor Sanabria, Margarita Hernández, Gerson Barrera y Ivonne Adriana Sánchez, por su amistad, compañerismo y colaboración, que agradable conocer personas como ustedes. EXITOS.

Eduar Ramiro Perez Gerena.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por permitirnos ser parte de su familia universitaria y ofrecernos la posibilidad de superarnos personal e intelectualmente. A nuestro director, Ph.D Ricardo Cruz, codirector, ing. Julián Herrera y directora del grupo de investigación GIMAT, M. Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz, por compartirnos sus conocimientos para el desarrollo de esta investigación y para nuestro futuro.

Al técnico, Jairo Hernández por la gran colaboración y conocimiento proporcionado en el desarrollo de este proyecto.

Al grupo de nuevos materiales GIMAT, por recibirnos y darnos la oportunidad de formar parte en la contribución de sus investigaciones.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica por ser guía y ayuda en el desarrollo de nuestra carrera.

A nuestros profesores Custodio Vásquez, Luis Emilio Forero, Arnaldo Alonso, Afranio Cardona, Orlando Gómez, Elcy Córdoba, Luis Aguirre, Iván Uribe, Julio Elías Pedraza, Walter Pardavé, Jaime Gonzáles, a todos ellos por proporcionarnos amistad y conocimiento valioso para nuestro desarrollo profesional.

De igual forma agradecemos al los técnicos de nuestra escuela, Ambrosio Carrillo, Mario Navarrete, Daniel Garavito, Javier Quintana por su disposición y colaboración durante toda esta etapa.

Por último, agradecemos a nuestras familias por su paciencia y apoyo económico necesario para la culminación de nuestra vida universitaria.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS.	3
1.3.1 Objetivo General.	3
1.3.2 Objetivos Específicos.	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 MATERIALES	4
2.1.1 Concreto	4
2.1.2 Acero de refuerzo.	7
2.1.3 Concreto reforzado.	8
2.2 PROCESO DE FABRICACION DEL CONCRETO	9
2.2.1 Diseño de mezcla.	9
2.3 ENSAYO NO DESTRUCTIVOS	14
2.3.1 El Método de la Velocidad de Pulso ultrasónico (VPU).	15
2.3.2 Factores que Afectan a la Velocidad de Pulso.	19
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	26
3.2 MANEJO DE LOS EQUIPOS DE ULTRASONIDO	26
3.3.1 Identificación, caracterización de los materiales y diseño de mezcla.	28
3.3.2 Diseño geométrico de las probetas.	30
3.3.3 Diseño geométrico de los moldes	32
3.3.4 Elaboración de las probetas diseñadas	32
3.4 MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LAS PROBETAS.	35
3.4.1 Pruebas preliminares	36
3.4.2 Adecuación de las probetas para la realización del ensayo.	36
3.4.3 Toma de datos.	38

3.5 EFECTO DE LAS BARRAS DE REFUERZO DEL CONCRETO EN LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	40
3.6 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	40
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	41
4.1 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO CON BARRAS DE REFUERZO.	41
4.1.1 Caracterización de los materiales.	41
4.1.2 Diseño geométrico de las probetas y los moldes.	45
4.2 MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LAS PROBETAS	49
4.2.1 Pruebas preliminares.	49
4.2.2 Toma de datos.	49
4.2.3 Medición de la VPU sobre el concreto reforzado.	55
4.2.4. Comprobación estadística y verificación de los resultados.	67
5. CONCLUSIONES	71
6. RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ilustración esquemática de la exudación de agua en un hormigón recién vertido.	6
Figura 2. Esquema del instrumento de velocidad de pulso	18
Figura 3. Método de transmisión directa	18
Figura 4. Método de transmisión semi-directa.	19
Figura 5. Método de transmisión indirecta	19
Figura 6. Refuerzo paralelo a la dirección de propagación de la VPU	23
Figura 7. Refuerzo perpendicular a la dirección de propagación de la VPU	23
Figura 8. Diagrama representativo de la metodología realizada en la investigación	25
Figura 9. División de las probetas en todas las superficies	37
Figura 10. Probetas con diferente número de refuerzos	39
Figura 11. Probetas con una y dos varillas de refuerzo	46
Figura 12. Probetas con tres y cuatro varillas de refuerzo	47
Figura 13. Planos de los moldes	48

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1 CNS FARNELL Modelo Pundit Plus	16
Fotografía 2. Equipo de ultrasonido de baja frecuencia CNS FARNELL Modelo Pundit Plus	27
Fotografía 3. Equipo de ultrasonido de alta frecuencia KRAUT KRAMER USM 35XS	27
Fotografía 4. Moldes de triplex	33
Fotografía 5. Elaboración de la mezcla	33
Fotografía 6. Mezcla homogénea	34
Fotografías 7 y 8. Fraguado y desencofrado de las probetas	35
Fotografía 9. Curado de las probetas al ambiente	35
Fotografía 10. Preparación de las superficies de las probetas	37
Fotografía 11. División de las probetas en todas sus superficies	38
Fotografía 12. Calibración del equipo de ultrasonido.	38
Fotografía 13. Método directo, ubicación de los palpadores.	39
Fotografía 14. Moldes de madera	48
Fotografía 15. Fallas encontradas en la probeta con dos barras de refuerzo	59

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Grafica 1. Distancia Vs VPU vista frontal	51
Grafica 2. Distancia Vs VPU vista lateral.	53
Grafica 3. Distancia Vs VPU vista superior.	53
Grafica 4. Comportamiento de la Vpu para la probeta con una barra de refuerzo	56
Grafica 5. Comportamiento de la vpu para la probeta con dos barras de refuerzo	60
Grafica 6. Comportamiento de la VPU para la probeta con tres barras de refuerzo	63
Grafica 7. Comportamiento de la VPU para la probeta con cuatro barras de refuerzo	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Asentamientos recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad.	10
Tabla 2. Clasificación del concreto según su VPU	15
Tabla 3. Efecto de las dimensiones del espécimen en la transmisión del pulso	21
Tabla 4. Propiedades físicas del agregado fino (arena)	41
Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado fino (arena).	42
Tabla 6. Propiedades físicas del agregado grueso (grava)	43
Tabla 7. Análisis granulométrico del agregado grueso (grava).	43
Tabla 8. Resultados de los análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	44
Tabla 9. Composición química de la barra de refuerzo	44
Tabla 10. Cantidades en peso y volumen para un metro cubico de concreto.	45
Tabla 11. Peso de los materiales para la mezcla realizada.	45
Tabla 12. Parámetros de operación.	49
Tabla 13. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto para una distancia de 0.15 m.	50
Tabla 14. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto para una distancia de 0.30 m.	52
Tabla 15. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto para una distancia de 0.50 m.	54
Tabla 16. VPU y tiempo de vuelo promedio para la probeta blanca	54
Tabla 17. Determinación de la velocidad en el acero de refuerzo.	55
Tabla 18. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca y con un refuerzo	58
Tabla 19. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca, con uno y dos refuerzos	61
Tabla 20. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca, con uno, dos y tres refuerzos	64

Tabla 21. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca, con uno, dos, tres y cuatro refuerzos	67
Tabla 22. Comprobacion estadistica para la justificacion de los resultados	70
Tabla 23. Comparación del tiempo de vuelo real y teórico para la probeta con una barra de refuerzo	70
Tabla 24. VPU para distancias de 0.15 y 0.50 m, frecuencia de 54 KHz, variando el voltaje de operación.	81
Tabla 25. VPU para distancias de 0.15 y 0.50 m, frecuencia de 24 KHz, variando el voltaje de operación.	81
Tabla 26. VPU para distancias de 0.15 y 0.50 m, frecuencia de 150 KHz, variando el voltaje de operación.	81
Tabla 27. VPU con probetas de dimensiones 0.07x0.15 m con un voltaje de operación de 250 V	82
Tabla 28. VPU con probetas de dimensiones 0.07x0.15 m con un voltaje de operación de 500 V	82
Tabla 29. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m.	90
Tabla 30. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.	91
Tabla 31. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m	92
Tabla 32. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto	93
Tabla 33. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.	94
Tabla 34. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m	95
Tabla 35. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m	96
Tabla 36. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.	97
Tabla 37. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m	98

Tabla 38. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m	99
Tabla 39. Determinación de la VPU (m/s) y el tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.	100
Tabla 40. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m	101

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Calculos del diseño de mezcla realizada para una relacion de agua-cemento (a/c) de 0.5.	79
Anexo B. Pruebas Preliminares Para La Escogencia De Los Parámetros De Trabajo.	81
Anexo C. Correlación de tiempos de transito para pulsos longitudinales o paralelos al refuerzo para la probeta de un refuerzo (vista superior).	83
Anexo D. Resultados de las mediciones sobre concreto reforzado	90

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE EL EFECTO DE LAS BARRAS DE REFUERZO DEL CONCRETO SOBRE LAS MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO*.

AUTORES: PARDO RIAÑO FRANCISCO JAVIER, PEREZ GERENA EDUAR RAMIRO.**

PALABRAS CLAVES: Concreto, Concreto Reforzado, Velocidad de Pulso Ultrasónico.

RESUMEN: El presente trabajo pretende estudiar el efecto de las barras de refuerzo del concreto sobre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU)., para lo cual se establecieron como variables la cantidad de barras de refuerzo, la cercanía de los palpadores a estas y la orientación de las barras con respecto al viaje del haz sonoro. Se fabricaron probetas cuyas dimensiones fueron (0.50 x 0.30 x 0.15 m) con relación agua/cemento (a/c) de 0.5 y barras de refuerzo de 1/2" de diámetro y 0.50 m de longitud, variando la cantidad de refuerzos presentes en cada una de ellas. Las probetas se curaron durante un tiempo mayor a 28 días, es decir se ensayaron cuando el concreto reforzado ya había alcanzado su resistencia máxima, y su evaluación se hizo por medio del método no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico por transmisión directa, el cual se basa en medir el tiempo que tarda el haz sonoro en atravesar un tramo del material de estudio. Los resultados mostraron influencia del número de refuerzos, así como de la orientación del haz sonoro cuando este viaja longitudinalmente con el refuerzo, además la cercanía de las barras al palpador, sobre la VPU. La presente investigación se hace con el fin de observar el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en el concreto reforzado y de esta forma en futuras investigaciones hacer la evaluación de las diferentes propiedades que este material en la amplia gama de aplicaciones estructurales que este posee.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Orlando Plata Hernández

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE CONCRETE REINFORCEMENT BARS EFFECT UPON THE ULTRASONIC PULSE VELOCITY MEASURES*.

AUTHORS: PARDO RIAÑO FRANCISCO JAVIER, PEREZ GERENA EDUAR RAMIRO.**

KEY WORDS: Concrete, reinforced concrete, ultrasonic pulse velocity.

ABSTRACT: this document pretends to study the concrete reinforcement bars effect upon the ultrasonic pulse velocity (UVP) for which reinforcement bars quantity were variable as well as the stylus and the bars orientation in relation with the sonorous ray. Test tubes were manufactured with dimensions (0.50 x 0.30 x 0.15 m) water/cement relation (w/c) 0.5 and reinforcement bars with ½" in diameter and 0.5 m in length, varying the quantity of present reinforcements in each one of them. Test tubes were cured more than 28 days and were proven when the reinforced concrete had reached its maximum resistance and its evaluation was made by non-destructive method of (UPV) for direct transmission, which measures the time in which the sonorous ray pass through the material. The results showed influence in the number of reinforcements and the orientation of the sonorous ray when it goes length wise with the reinforcement. This behavior of the (UVP) into reinforced concrete and in that way, in future researches, make the evaluation of different properties and applications this material has.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Orlando Plata Hernández

GLOSARIO

Aglomerante: Son aquellos materiales que, en un estado pastoso, es decir, son generalmente pétreos blandos que mezclados con agua se hacen plásticos, y con una consistencia variable, poseen la propiedad de moldearse, adherirse fácilmente a otros materiales, unirlos entre sí, endurecerse y alcanzar consistencias mecánicas considerables.

Clinker: Producto resultante de la cocción, hasta sinterización, de una mezcla de caliza y arcilla, es el principal componente del cemento.

Conglomerante: Al material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas.

Curado del concreto: También es llamado fraguado final, es el endurecimiento normal de la mezcla de concreto, este depende a su vez del endurecimiento de la lechada o pasta formada por el cemento y el agua.

Dosificación: Es el diseño racional de mezclas de concreto. Es un proceso por el cual se obtiene la correcta combinación de cemento, agregados, agua y aditivos, cuando sean necesarios, con el fin de producir un concreto conforme a determinadas especificaciones.

Exudación: Se conoce también como sangrado y consiste en que parte del agua de mezclado tiende a subirse a la superficie del concreto recién colocado o durante el proceso de fraguado.

Fraguado del concreto: Es el proceso que ocurre cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla.

Hidratación: Es la reacción química entre el cemento y el agua para ligar la pasta de cemento.

Hormigonera: Es un aparato o máquina empleada para la elaboración del hormigón o concreto. Su principal función es la de suplantar el amasado manual de los diferentes elementos que componen el hormigón: cemento, áridos y agua.

Trabajabilidad: Facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado.

INTRODUCCIÓN

El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero débil en tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural. Para resistir tensiones, se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio. El acero restringe el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto.

El uso del refuerzo no está limitado a la finalidad anterior, también se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir las deformaciones debidas a cargas de larga duración y para proporcionar confinamiento lateral al concreto, lo que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión. Con lo anterior se puede ver el gran aporte de las barras de refuerzo en el concreto al aumento de su aplicabilidad en la solución de los diversos problemas estructurales de la vida cotidiana.

Por este gran aporte en el desarrollo de la industria de la construcción se ha adelantado una búsqueda de métodos más efectivos y económicos de inspección, en los cuales no se cause ningún tipo de daño a las estructuras objeto de estudio Ensayos No Destructivos (END). Siendo la técnica no destructiva de ultrasonido la más aplicada, esta nos ayuda a evaluar y caracterizar este material usando mediciones de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

La velocidad de pulso ultrasónico nos sirve para evaluar el concreto en los siguientes aspectos: la presencia de fisuras, poros y huecos, los cambios en hormigón debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, presencia o no de barras de refuerzos, así como también la calidad del hormigón.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es un material heterogéneo, durable y resistente, compuesto por varios materiales con diferentes granulometrías y propiedades; dado que se trabaja en forma líquida prácticamente puede adquirir cualquier forma, esta combinación de características lo convierte en el material más usado en construcción y también dificulta su estudio y caracterización.

Un método no destructivo empleado en la evaluación y caracterización del concreto es la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), este se ve influenciado por varios factores, entre ellos se encuentran: el diseño de la mezcla, la temperatura del concreto, longitud de la probeta y el efecto de las barras de refuerzo. Esta influencia se ve reflejada en un aumento o en una disminución de la VPU dependiendo del factor que esté afectando la medición.

La presencia de las barras de refuerzo en el concreto da una imprecisión en la medida de la velocidad de pulso ultrasónico dependiendo de la cercanía de las barras a la trayectoria del haz sonoro, su orientación con respecto a este, el diámetro y el número de refuerzo existentes.

Por lo anterior, con el desarrollo de esta investigación se pretende mostrar la importancia de estudiar el efecto de las barras de refuerzo en el concreto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y de esta forma conocer de forma más precisa las propiedades del concreto reforzado medidas a partir de la técnica de ultrasonido.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo General.

- Evaluar el efecto de las barras de refuerzo del concreto sobre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Evaluar el efecto de la orientación de las barras de refuerzo, sobre las medidas V.P.U.
- Evaluar el efecto de la cantidad de las barras de refuerzo sobre la V.P.U.
- Analizar la influencia de la cercanía del palpador a las barras de refuerzo sobre la velocidad de pulso ultrasónico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIALES

2.1.1 Concreto. El concreto es una mezcla de cemento, agregados inertes (por lo general grava y arena) y agua, la cual se endurece después de cierto tiempo de mezclado.

Los elementos que componen el concreto se dividen en dos grupos: activos e inertes. Son activos, el agua y el cemento por los cuales ocurre la reacción química por medio de la cual esa mezcla, llamada “pasta o lechada”, se endurece (fragua) hasta alcanzar un estado de gran solidez.

La principal característica estructural del concreto es su gran resistencia a los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos como los de tensión. Otra característica importante es la de poder adoptar formas distintas, esto es debido a que al ser puesto en obra es una masa plástica que permite rellenar un molde, previamente construido con una forma establecida.

2.1.1.1 Componentes de la pasta. En la mayoría de hormigones convencionales, esta fase está formada por agua y cemento portland. Este conglomerante hidráulico, y sus derivados, son los más empleados en la construcción debido a estar formados esencialmente por materiales muy abundantes en la naturaleza y ser su precio relativamente bajo en comparación con otros cementos.

2.1.1.2 Cemento portland. En lo que a materias primas respecta, el cemento portland está formado, básicamente, por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción, hasta sinterización, de una mezcla de caliza y arcilla que

recibe el nombre de 'clinker' y de un material empleado como regulador de fraguado que, generalmente, es yeso dihidratado.

Los componentes minerales principales (o activos) del clinker portland son los silicatos tricálcico y bicálcico, el aluminato tricálcico y el ferrito aluminato tetracálcico, siendo sus contenidos respectivos más usuales entre un 45 y 60, 15 y 30, 6 y 12, y 6 y 8 por ciento. Los silicatos, que representan del 60 al 80% de estos componentes, son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento.

La calidad del Cemento Portland se determina de acuerdo a la norma ASTM C 150¹ (NTC 121 y 321), la cual establece cinco diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción.

2.1.1.3 Agua. El agua de amasado que se añade a la hormigonera tiene las siguientes misiones: hidratación de los componentes activos del cemento, actúa como lubricante haciendo posible que la masa fresca sea trabajable y crea espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

De una forma global, puede considerarse que la cantidad de agua necesaria para la hidratación es del 23% del peso de los componentes anhidros del cemento; sin embargo, un hormigón en el que se emplease esta cantidad de agua sería imposible de trabajar, de ahí que se utilicen cantidades mayores de ésta.

El agua apta para el proceso de elaboración de la mezcla, está normalizada con una serie de parámetros que debe cumplir; en la normativa NMX C 122².

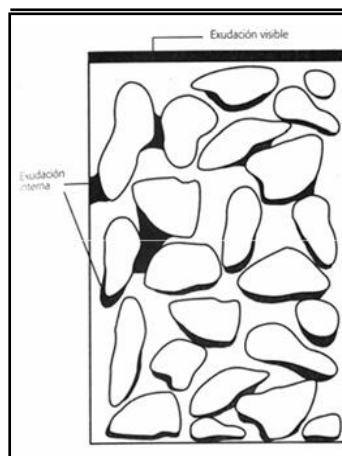
¹ American Society for Testing of Materials. ASTM C 150. *Standard Specification for Portland Cement*. Especificación Normalizada para Cemento Portland. 2007

² Norma Mexicana. NMX C 122. Agua para concreto.

2.1.1.4 Agregado grueso. Llamado también grava o gravilla cuyas partículas rocosas son de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, aunque no existe homogeneidad de criterio para el tamaño máximo, sin embargo éste generalmente está determinado por el proceso de construcción; especialmente influye la separación del refuerzo y las dimensiones del elemento que se pretende construir. La grava requiere buena gradación, resistencia al desgaste, durabilidad, superficies libres de impurezas.

Estos agregados son partículas granulares de material pétreo de tamaño variable. Se originan por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial, formas inadecuadas, como las lajosas o aciculares, no sólo producen un hormigón poco manejable, sino que dificultan la obtención de una estructura compacta, y por lo tanto, de un hormigón con buena resistencia y reducida permeabilidad. Una de las causas principales de ello es el deterioro de las propiedades de la zona de transición debido a la exudación interna, que es una parte del fenómeno global denominado exudación, y que se traduce en agua atrapada entre las partículas de árido y, sobre todo, debajo de ellas y de las armaduras (Figura 1).

Figura 1. Ilustración esquemática de la exudación de agua en un hormigón recién vertido.



Fuente: Perepérez y Barberá, 2002

2.1.1.5 Agregado fino. La forma de las partículas del *agregado fino* afecta, sobre todo, al volumen de agua necesario para alcanzar la consistencia y la docilidad del hormigón fresco deseadas. Existe, en efecto un incremento de agua necesaria en la mezcla y por lo tanto un costo adicional de cemento cuando se utilizan áridos finos angulares. Con todo, existen ciertas circunstancias donde el uso de los áridos finos machacados está justificado, tanto económica como técnicamente. Según Day (1995), a menudo es una buena solución optar por una combinación de árido fino machacado y arena natural (arena de corrección); en su opinión, esta mezcla produce más beneficios de los que en un primer momento se podrían esperar.

En general, el agregado fino o arena deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33³ (NTC 77 y 78), es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

2.1.2 Acero de refuerzo. El acero para reforzar concreto se utiliza en distintas formas; la más común es la barra o varilla que se fabrica tanto de acero laminado en caliente, como de acero trabajado en frío. Los diámetros usuales de barras producidas varían de ¼ pulg a 1 ½ pulg (algunos productores han fabricado barras corrugadas de 5/16 pulg, 5/33 pulg y 3/16 pulg) en otros países se usan diámetros aún mayores.

Todas las barras, con excepción del alambraón de ¼ de pulg, que generalmente es liso, tienen corrugaciones en la superficie para mejorar su adherencia al concreto. Generalmente el tipo de acero se caracteriza por el límite de esfuerzo de fluencia. Las barras laminadas en caliente pueden obtenerse con límites de fluencia desde

³ American Society of Testing for Materials. ASTM C 33. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Especificación Normalizada de Agregados para Concreto. 2001

2300 hasta 4200 kg/cm². El acero trabajado en frío alcanza límites de fluencia de 4000 a 6000 kg/cm².

Una propiedad importante que debe tenerse en cuenta en refuerzos con detalles soldados es la soldabilidad. La soldadura de aceros trabajados en frío debe hacerse con cuidado. Otra propiedad importante es la facilidad de doblado, que es una medida indirecta de ductilidad y un índice de su trabajabilidad.

Se ha empezado a generalizar el uso de mallas como refuerzo de losas, muros y algunos elementos prefabricados. Estas mallas están formadas por alambres lisos unidos por puntos de soldadura en las intersecciones. El acero es del tipo trabajado en frío, con esfuerzos de fluencia del orden de 5000 kg/cm². El espaciamiento de los alambres varía de 5 a 40 cm y los diámetros de 2 a 7 mm, aproximadamente. En algunos países, en lugar de alambres lisos, se usan alambres con algún tipo de irregularidad superficial, para mejorar la adherencia.

El acero que se emplea en estructuras presforzadas es de resistencia francamente superior a la de los aceros descritos anteriormente. Su resistencia última varía entre 14000 y 22000 kg/cm² y su límite de fluencia es definido por el esfuerzo correspondiente a una deformación permanente de 0.002%, entre 12000 y 19000 kg/cm².

2.1.3 Concreto reforzado. Es una combinación de concreto y acero, que a pesar de ser dos materiales diferentes en sus módulos de elasticidad y resistencia, forman una pareja extraordinaria ya que el concreto proporciona la forma y resiste los esfuerzos a compresión, mientras el acero soporta los esfuerzos a tensión y parcialmente los de compresión y cortante. Estos elementos unidos alcanzan propiedades como:

- Asimilar formas estables
- Aceptar combinaciones de esfuerzos
- Ser durable
- Grata apariencia en textura, color y temperatura
- Permitir que se recubra con cualquier material

2.2 PROCESO DE FABRICACION DEL CONCRETO

2.2.1 Diseño de mezcla. Es el estudio de los métodos de dosificación más significativos de cara a dominar el diseño de mezclas de hormigón. En este sentido, el análisis en detalle de las metodologías más representativas proporciona unas nociones esenciales en el arte de dosificar.

Consideraremos que las metodologías de dosificación pueden dividirse, fundamentalmente, en dos grupos: uno formado por los métodos que tienen como dato principal de partida la dosificación de cemento y otro formado por los hormigones definidos por sus resistencias mecánicas, especialmente la de compresión. En ambos casos, sin embargo, se deben aportar otros datos como pueden ser la consistencia, tamaño máximo del agregado a emplear, tipos de agregados, etc.

Existen varios procedimientos para determinar la mezcla óptima cuando conocemos la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón, no obstante nombramos algunos de ellos, que son el método de Füller, el de Bolomey, el de Faury y el método ACI. En el caso que conozcamos la resistencia del hormigón que vamos a fabricar nos centraremos, de entre los diversos métodos que tienen esta finalidad, en el del American Concrete Institute (ACI).

2.2.1.1 Método ACI. El sistema del American Concrete Institute (ACI 211.1-91) es, sin lugar a dudas, el método de dosificación más utilizado en todo el mundo,

siendo adecuado para cualquier obra realizada con hormigón. En las siguientes líneas se resumen los pasos que debemos seguir para dosificar nuestro hormigón.

a) Selección de la relación agua/cemento. A diferencia del procedimiento habitual seguido en los métodos anteriormente mencionados, en el método ACI debemos fijar la relación agua/cemento. Ésta se determina según predominen razones de durabilidad o de resistencia, ambas dato del problema. Para la elaboración de este trabajo se tomo una relación agua/cemento que fuera utilizada con frecuencia para la elaboración de obras civiles; esta relación fue de 0.5.

b) Determinación de la consistencia. Para la elección de la consistencia adecuada, usaremos el asentamiento más reducido posible compatible con la colocación adecuada del hormigón en obra. Los valores que se recomiendan de asentamiento en el cono de Abrams, en función de distintos tipos de construcción, pueden consultarse en la tabla 1.

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

Consistencia	Asentamiento (cm)	Tipo de estructura y condiciones de colocación
Muy seca	0 – 2.0	Vigas prefabricadas de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
Seca	2.0 – 3.5	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.
Semi-seca	3.5 – 5.0	Pavimentos con vibraciones normales. Fundiciones de concreto simple. Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración.
Media	5.0 – 10.0	Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas, columnas, vigas y muros reforzados con vibración.
Húmeda	10.0 – 15.0	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzo. Trabajar donde la colocación sea difícil. Nuevamente no es apropiado para compactarlo con demasiado.

Autores: Tecnoconcreto. Diseño de mezclas.

Nuestro siguiente objetivo es determinar las Cantidad de cemento para la mezcla, cantidades de árido grueso y de árido fino que intervienen en la mezcla. Como veremos, en el método ACI no se hace uso de curvas de referencia como en los otros métodos mencionados.

c) Cantidad de cemento para la mezcla. La cantidad de cemento por unidad de volumen se obtiene a partir de la relación agua/cemento y del contenido de agua; valores previamente determinados, los cuales están relacionados mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{a}{a/c} \quad (1)$$

d) Tamaño máximo del agregado grueso: el método ACI propone que sea el mayor posible, (por razones de economía de cemento y de agua) además que sea compatible con la docilidad, a fin de conseguir la máxima resistencia, la mínima cantidad de agua de amasado y la menor retracción, siempre y cuando este tamaño máximo no sea mayor que 1/5 de la dimensión menor de la pieza a fundir, ni mayor que 3/4 de la separación mínima entre armaduras, ni de 1/3 del espesor en el caso de unas losa. Para determinar el volumen de agregado grueso a usar en la mezcla se utiliza la siguiente ecuación:

$$b = (b/b_0) \times b_0 \quad (2)$$

Donde:

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

b_0 = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto

b/b_0 = Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

e) Determinación del contenido de agregado fino. El contenido de agregado fino puede obtenerse por el método de los volúmenes absolutos o por el de los pesos. En el primero, el volumen de arena se halla restando a 1.025 el

volumen de árido grueso, cemento, agua y aire. En el segundo, el peso del árido fino se determina como la diferencia entre el peso del hormigón fresco y la suma de los pesos de los otros componentes. Este sistema se basa en que, por experiencia, se conoce el peso del metro cúbico de hormigón fresco, aunque si esto no fuese así, pueden emplearse valores dados en tablas.

$$V_{af} = 1000 - (V_a + V_c + V_{ag}) \quad (3)$$

Donde: V_{af} = Volumen de agregado fino
 V_a = Volumen de agua
 V_c = Volumen de cemento
 V_{ag} = Volumen de agregado grueso

2.2.1.2 Fraguado del concreto. Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla.

Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

La determinación de estos dos estados, cuyo lapso comprendido entre ambos se llama tiempo de fraguado de la mezcla, es muy poco precisa y sólo debe tomarse a título de guía comparativa. El tiempo de fraguado inicial es el mismo para los cinco tipos de cemento enunciados y alcanza un valor de 45 a 60 minutos, el tiempo de fraguado final se estima en 10 horas aproximadamente.

En resumen, puede definirse como tiempo de fraguado de una mezcla determinada, el lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido. Así definido, el fraguado no es sino una parte del proceso de endurecimiento.

Es necesario colocar la mezcla en los moldes antes de que inicie el fraguado y de preferencia dentro de los primeros 30 minutos de fabricada. Cuando se presentan problemas especiales que demandan un tiempo adicional para el transporte del concreto de la fábrica a la obra, se recurre al uso de “retardantes” del fraguado, compuestos de yeso o de anhídrido sulfúrico; de igual manera, puede acelerarse el fraguado con la adición de sustancias alcalinas o sales como el cloruro de calcio.

2.2.1.3 Endurecimiento o curado del concreto. Es el endurecimiento normal de la mezcla de concreto, este depende a su vez del endurecimiento de la lechada o pasta formada por el cemento y el agua, entre los que se desarrolla una reacción química que produce la formación de un coloide “gel”, a medida que se hidratan los componentes del cemento. La reacción de endurecimiento es muy lenta, lo cual permite la evaporación de parte del agua necesaria para la hidratación del cemento, que se traduce en una notable disminución de la resistencia final.

El curado también es llamado fraguado final, ya que estos dos procesos no son más que dos estados separados usualmente, donde en realidad es un único proceso de hidratación continuo, puesto que las reacciones ocurren durante toda la etapa de maduración del concreto (28 días), es decir, estas reacciones continúan hasta alcanzar que todos los constituyentes del cemento provoquen el endurecimiento de la masa.

El curado es uno de los procesos más importantes porque define la calidad del producto final de una obra civil, ya que un buen curado promueve la hidratación del cemento y por ende el máximo desarrollo en su resistencia final. Este proceso se hace necesario para evitar cambios bruscos de temperatura, por esto se debe tener en cuenta que la cantidad de agua de curado depende de la temperatura del ambiente, es decir, la cantidad de agua de curado es proporcional a la temperatura.

Lo anterior no indica que este proceso siempre se deba llevar a cabo, pues también las estructuras expuestas al aire ganan resistencia pero en comparación con las curadas bajo agua es muy poca.

2.3 ENSAYO NO DESTRUCTIVOS

Los métodos "No destructivos" ofrecen a la ingeniería actual la posibilidad de determinar el estado o condición de un material o componente sin necesidad de afectar su servicio. El avance reciente de los "Métodos no destructivos" en la inspección de obras e inclusive en el control de la calidad de las mismas, lo hacen gozar en la actualidad de un gran auge debido a su utilidad práctica en la industria en general.

En la industria de la construcción su uso es aun limitado siendo su principal aplicación para examinar estructuras de concreto con problemas estructurales y/o remodelaciones o ampliaciones. Entre las pruebas no destructivas se encuentra el uso del equipo ultrasónico. Con esta prueba es posible determinar el grado de homogeneidad y porosidad entre otras características. Esto se logra a través de mediciones de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) sobre el material que se va a probar.

Según los estudios realizados en Canadá por Malhotra (1985), este relaciono la VPU, del concreto con su calidad, publicando un criterio de aceptación del concreto sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica⁴. La clasificación del concreto en categorías con base a intervalos de velocidad se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del concreto según su VPU

Velocidad ultrasonica, V (m/s)	Clasificación del concreto
V > 4575	Excelente
4575 > V > 3660	Bueno
3660 > V > 3050	Cuestionable
3050 > V > 2135	Pobre
V < 2135	Muy pobre

Fuente: Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno y William R. Castillo Pak

Un espécimen de la prueba se puede probar repetidas veces en la misma localización, que es útil para supervisar cambios estructurales internos que experimentan concretos sobre un período de tiempo largo.

2.3.1 El Método de la Velocidad de Pulso ultrasónico (VPU). La técnica de velocidad de pulso ultrasónico en concretos se realizo siguiendo la Norma Técnica Colombiana. NTC 4325⁵. Método de ensayo para la determinación de la VPU a través del concreto.

⁴ Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno y William R. Castillo Pak

⁵ Norma Técnica Colombiana NTC 4325. Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto. 2004

El equipo usado correspondió a un CNS FARNELL Modelo Pundit Plus (ver Fotografía 1), y su método de aplicación consiste en la transmisión de ondas mecánicas de frecuencias entre 20 a 150 KHz, las cuales son bajas comparándolas con las de un acero.

Fotografía 1. CNS FARNELL Modelo Pundit Plus



Fuente: los autores

Estas ondas son producidas por un transductor generador y recibidas por un transductor receptor, así que cualquier Interferencia que desvíe la misma producirá un mayor recorrido o reflexión de la misma, lo que sería indicada necesariamente en el equipo de medición, el cual convierte la energía mecánica en un impulso eléctrico, el que es digitalizado como tiempo de transmisión de la onda.

Es claro que ya que disponemos de las dimensiones de los elementos en estudios es posible obtener la velocidad de transmisión de ondas la que en definitiva será el parámetro de comparación para determinar la condición física o calidad del material en estudio.

Un pulso de oscilaciones longitudinales es producido por un transductor electroacústico, que se mantiene en contacto con una superficie de concreto bajo prueba. Cuando el impulso generado se transmite en el concreto del transductor con un material de acoplamiento líquido como grasa o pasta de celulosa, sufre múltiples reflexiones en los límites de las fases del concreto. Un complejo sistema

de ondas de tensión se desarrolla, que incluyen tanto ondas longitudinales y las ondas transversales, y se propaga a través del concreto. Después de atravesar el concreto, los pulsos se reciben y se convierten en energía eléctrica por un segundo transductor (receptor) situado a una distancia l del transductor que transmite (transmisor). El tiempo de tránsito t se mide electrónicamente.

La velocidad de pulso V se calcula dividiendo la longitud que recorre la onda sobre el tiempo que gasta en recorrerla.

$$v = \frac{l}{t} \quad (4)$$

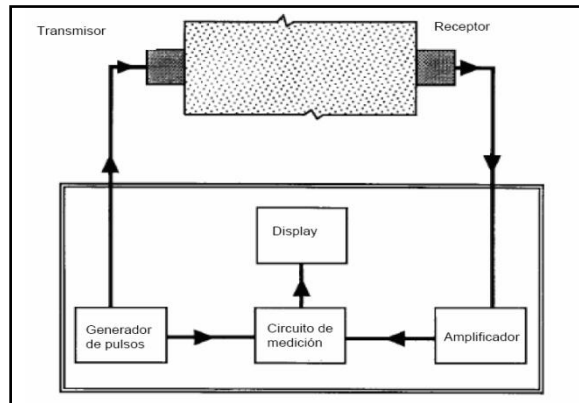
La propagación de las ondas puede ocurrir en dos direcciones:

- Onda longitudinal, aquí la dirección de oscilación de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda.
- Onda transversal, la dirección de oscilación de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

La idea básica en la cual se establece el método de la velocidad del pulso es que la velocidad de un pulso de ondas de compresión con un medio depende de las características y de la densidad elástica del medio, un diagrama esquemático se demuestra. Una descripción completa del método de la velocidad de pulso de la ASTM C 597.⁶

⁶ American Society of Testing for Materials ASTM C 597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Método de prueba estándar para medir la velocidad de pulso en concreto. 2003

Figura 2. Esquema del instrumento de velocidad de pulso



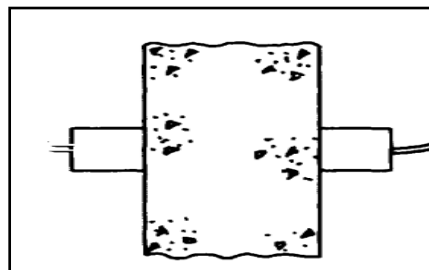
Fuente: Tomada de ASTM C-597

Hay tres configuraciones posibles en las cuales los transductores pueden ser combinados.

a) El método de transmisión directa

Es el arreglo más deseable y más satisfactorio porque la energía máxima del pulso se transmite y se recibe con este arreglo. Ver Figura 3.

Figura 3. Método de transmisión directa



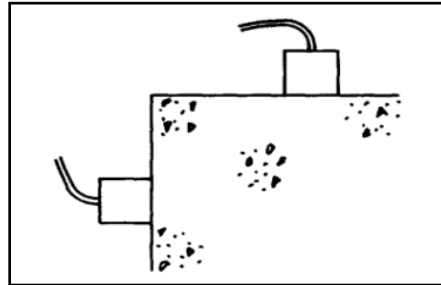
Fuente: Testing of concrete in structures

b) El método de transmisión semidirecto

Se puede también utilizar satisfactoriamente. Sin embargo, el cuidado debe ser práctico que los transductores no estén demasiado separados; si no el pulso

transmitido se puede atenuar y una señal del pulso no pudo ser detectada. Ver Figura 4.

Figura 4. Método de transmisión semidirecta.

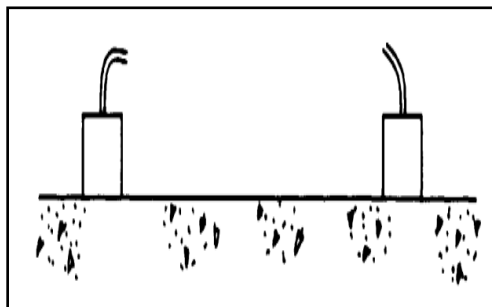


Fuente: Testing of concrete in structures

c) El método de transmisión indirecto o superficial.

Es el menos satisfactorio posible porque la amplitud de la señal recibida es notoriamente más baja que lo recibida por el método de la transmisión directa. Este método es también de errores más propensos y un procedimiento especial puede ser necesario para determinar la velocidad del pulso. Ver Figura 5.

Figura 5. Método de transmisión indirecta



Fuente: Testing of concrete in structures

2.3.2 Factores que Afectan a la Velocidad de Pulso. Aunque es relativamente fácil conducir una prueba de la velocidad del pulso, es importante que la prueba esté conducida de tal forma que las lecturas de la velocidad del pulso sean

reproductivas y que solo sean afectadas por las características del concreto bajo prueba y no por otros factores externos.

- **Tipo de cemento**

El tipo de cemento no tenía un efecto significativo en la VPU. El índice de la hidratación, sin embargo, es diferente para diversos cementos e influenciará la velocidad del pulso. Pues el grado de hidratación aumenta, el módulo de la elasticidad aumentará y la velocidad del pulso también aumentará.

- **Relación Agua/Cemento**

A medida que se aumenta esta relación la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión disminuyen, suponiendo que no hay ningún otro cambio en la composición del concreto.

- **Tipo de agregados**

La velocidad del pulso de la mezcla del cemento es generalmente más baja que la del agregado. El tipo de agregado no tenía ningún efecto significativo en la relación entre la velocidad del pulso.

- **Contacto entre superficies del concreto y transductores.**

Debe haber un esencial contacto acústico; las superficies moldeadas en general no presentan problemas y si presentan alguna rugosidad se puede eliminar frotando con piedra de pulir (piedra esmeril). Los transductores deben estar alineados entre si y nivelarse contra el concreto para mejorar el contacto, se suele colocar una capa de acoplante (vaselina) entre concreto y transductores.

- **Forma y tamaño del espécimen**

La velocidad de pulsos cortos de vibraciones es independiente del tamaño y la forma del espécimen en el cual viajen, excepto cuando la menor dimensión lateral del elemento sea menor que un cierto valor mínimo. Por debajo este valor la velocidad del pulso puede verse reducida considerablemente. El tamaño de la reducción depende primordialmente de la relación entre la longitud de onda de la vibración del pulso y la menor dimensión lateral del espécimen, pero es insignificante si dicha relación es menor que la unidad. La tabla. 3 proporciona la relación entre la velocidad del pulso en el concreto, la frecuencia de los transductores y la mínima dimensión lateral permisible para el espécimen.

Si la mínima dimensión lateral es menor que la longitud de onda o si se está utilizando el arreglo para transmisión indirecta, el modo de propagación cambia y por lo tanto, la velocidad medida es diferente. Esto es particularmente importante en los casos en que se esté comparando elementos de concretos de tamaños significativamente diferentes. NORMA NTC 4325.

Tabla 3. Efecto de las dimensiones del espécimen en la transmisión del pulso

Frecuencia del transductor	Velocidad de pulso en el concreto (Km/s)		
	V _c =3.5	V _c =4.0	V _c =4.5
	Dimensión lateral mínima permisible del elemento		
KHz	mm	mm	mm
24	146	167	183
54	65	74	83
82	43	49	50
150	23	27	30

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4325.

- **Efecto de las barras de refuerzo**

Las barras de refuerzo presentes en el concreto, afectan considerablemente las medidas de velocidad. La velocidad de pulso medido en un concreto reforzado en las proximidades de las barras de refuerzo es a menudo más elevado que en el concreto en blanco de la misma composición. Esto es porque la velocidad de pulso comprendida en un acero es 1.4 a 1.7 veces mayor que en el concreto en blanco.

El primer pulso para llegar al transductor receptor viaja parcialmente en el concreto y en parte del acero. El incremento de la velocidad del pulso depende de que tan cerca esta las mediciones a la barra de refuerzo, las dimensiones y la cantidad de barras de refuerzo, su orientación con respecto a la propagación de la onda, y la velocidad de pulso en los alrededores del concreto.

a. Barras de refuerzo paralelo a la dirección de propagación.

Si el borde de la barra está ubicado a una distancia de la línea que une los puntos más cercanos de los dos transductores y la longitud del camino entre transductores es l , entonces el tiempo de tránsito T en cualquiera de las configuraciones de la figura 6 está dado por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{l}{v_s} + 2a \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{v_s^2 v_c^2}} \quad (5)$$

Fuente: Testing of concrete in structures

para

$$\frac{a}{l} \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{v_s^2 v_c^2}} \quad (6)$$

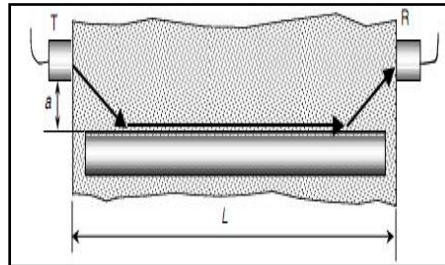
Fuente: Testing of concrete in structures

No hay ninguna influencia del acero cuando

$$\frac{a}{l} > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{v_s^2 v_c^2}} \quad (7)$$

Fuente: Testing of concrete in structures

Figura 6. Refuerzo paralelo a la dirección de propagación de la VPU

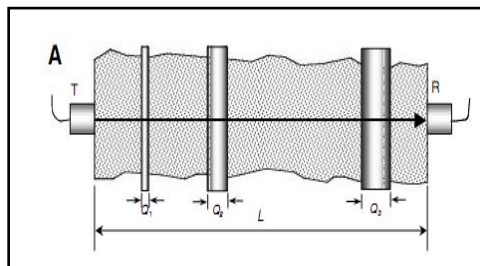


Fuente: Testing of concrete in structures

b. Barras de refuerzo perpendicular a la dirección de propagación.

La presencia de las barras de refuerzo puede ser calculado suponiendo que el pulso atraviesa directamente en el camino, con sus ejes perpendicular al recorrido de propagación. Ver Figura 7.

Figura 7. Refuerzo perpendicular a la dirección de propagación de la VPU



Fuente: Testing of concrete in structures

Con la siguiente relación se pueden calcular los parámetros deseados cuando existe este tipo de configuración.

$$\frac{v_c}{v} = 1 - \frac{ls}{l} \left(1 - \frac{v_c}{v_s} \right) \quad (8)$$

Fuente: Testing of concrete in structures

donde

v_c = Velocidad de pulso del concreto

v = Velocidad de pulso en el concreto reforzado

v_s = Velocidad de pulso del acero

l = Longitud total del camino

$l_s = \sum_1^n Q_i$ = Longitud de los diámetros del acero

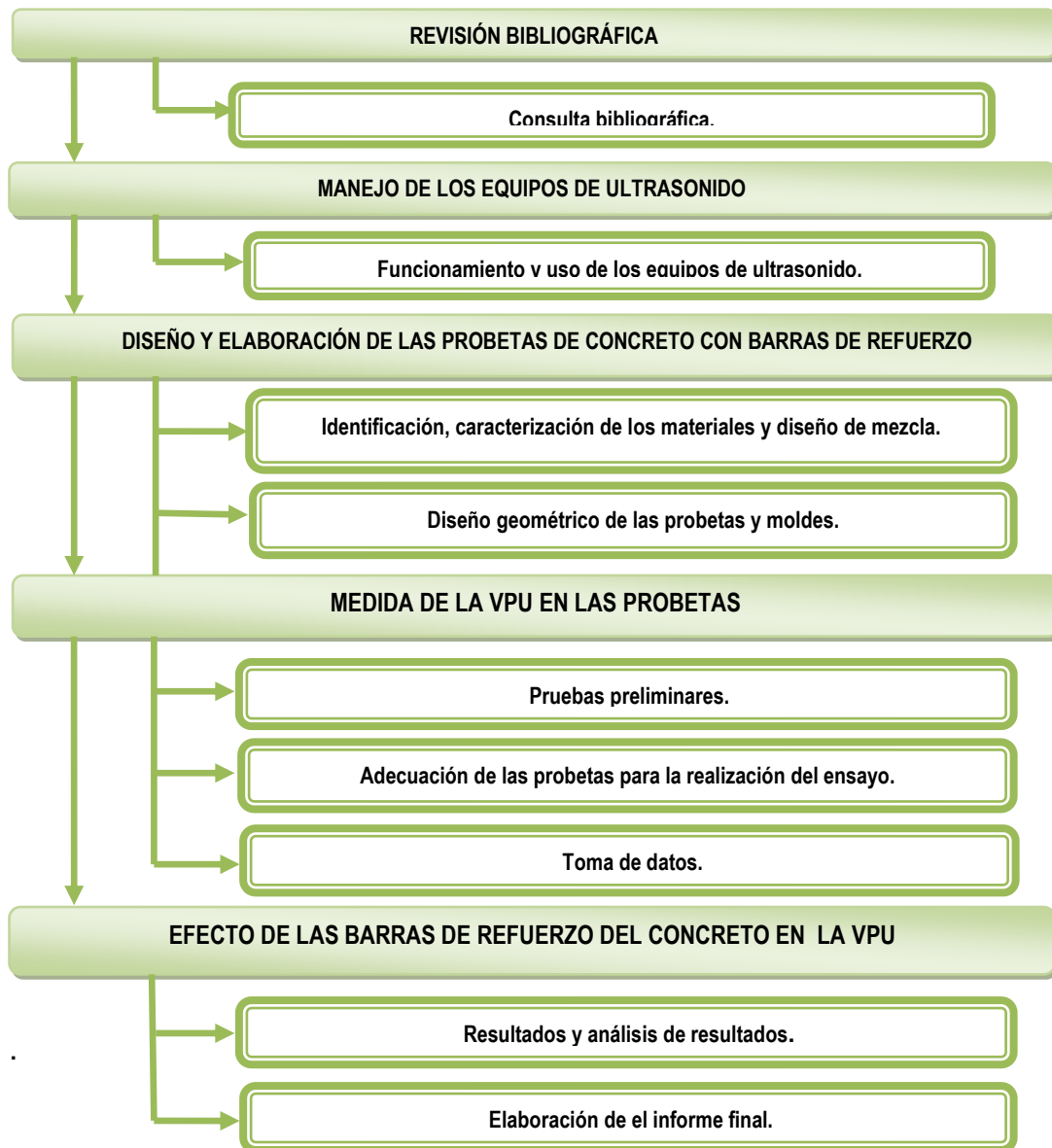
Sólo una pequeña fracción del pulso de energía realmente atraviesa el diámetro

Pleno de cada barra.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 8 se muestra un diagrama de flujo con las etapas que se llevaron a cabo para la realización de la presente investigación, posteriormente se hará una descripción detallada de cada una de ellas

Figura 8. Diagrama representativo de la metodología realizada en la investigación



Fuente: Los autores

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Desde el inicio y durante el desarrollo de la presente investigación se realizó una recopilación y revisión de material bibliográfico, que nos proporcionó información sobre el material a usar (concreto reforzado), procesos de fabricación, propiedades y el efecto del refuerzo sobre estas, método de velocidad de pulso ultrasónico, principios y características del equipo a utilizar y fundamentos para el análisis de los resultados obtenidos.

El material bibliográfico consistió en artículos, revistas, libros, manuales, páginas web, normas técnicas (como ASTM e ICONTEC, entre otras), etc.

3.2 MANEJO DE LOS EQUIPOS DE ULTRASONIDO

Los equipos utilizados para la realización de las pruebas fueron los siguientes: Equipo de ultrasonido de baja frecuencia **CNS FARNELL Modelo Pundit Plus** y el equipo de ultrasonido de alta frecuencia **KRAUTKRAMER USM 35 XS**. El primer equipo se utilizó para valorar tanto el concreto como el concreto reforzado y el segundo para caracterizar el acero de refuerzo. Estos fueron suministrados por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander. A continuación se presentan algunos detalles de estos equipos.

El equipo de ultrasonido **CNS FARNELL Modelo Pundit Plus**, de baja frecuencia es especial para la evaluación de materiales heterogéneos como la madera y el concreto. Cuenta con un juego de palpadores que van desde 24 a 250 KHz, un voltaje de entrada que puede establecerse en 250, 500 y 1200 voltios según sea el caso y tres diferentes modos de emisión del pulso ultrasónico que son continuo, retardado y un solo disparo; además trabaja con dos sistemas de medidas métrico y el ingles, también cuenta con una memoria de almacenamiento la cual puede registrar hasta 112 datos obtenidos. Con este equipo se pueden tomar medidas

de: tiempo de vuelo, velocidad y longitud recorrida por el haz sonoro y además el modulo de elasticidad del material. El equipo fue calibrado cada día antes de realizar las mediciones. Ver Fotografía 2.

Fotografía 2. Equipo de ultrasonido de baja frecuencia CNS FARNELL
Modelo Pundit Plus



Fuente: los autores

El equipo de ultrasonido **KRAUT KRAMER USM 35XS**, es de fabricación Alemana, opera en un intervalo de frecuencias de 0.5 a 20 [MHz], con una escala de calibración en la base del tiempo entre 0.5 a 1400 [mm] en acero y está diseñado tanto para la aplicación de piezas de gran tamaño como para la medición en alta resolución. Además, cuenta con un puerto RS 232, el cual sirve para el intercambio bidireccional de datos con un computador. Ver Fotografía 3.

Fotografía 3. Equipo de ultrasonido de alta frecuencia KRAUTKRAMER
USM 35XS



Fuente: Los autores

En esta etapa del proyecto se realizó un entrenamiento para el manejo y utilización adecuado de las diferentes funciones que tienen los equipos de ultrasonido de alta y baja frecuencia, lo cual se logró a partir del uso de los manuales de dichos equipos provistos por los fabricantes y la colaboración y asesoría del co-director de este proyecto.

3.3 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO CON BARRAS DE REFUERZO

Para el desarrollo de esta etapa, se llevaron a cabo las siguientes actividades: identificación, caracterización de los materiales y diseño de mezcla a emplear, diseño geométrico de las probetas a fabricar, diseño geométrico de los moldes y elaboración de las probetas diseñadas. A continuación se presentan detalles de cada una de estas actividades.

3.3.1 Identificación, caracterización de los materiales y diseño de mezcla.

a) Identificación de los materiales.

Para la elaboración de las probetas a estudiar se utilizaron los siguientes materiales: cemento Portland tipo I, agregado grueso, agregado fino, agua potable, las varillas o barras de refuerzo.

Estos materiales fueron adquiridos mediante fondos proporcionados por el grupo de investigación GIMAT, recursos propios y mediante donaciones hechas por el grupo INME (Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales de Construcción) adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad industrial de Santander.

b) Caracterización de los materiales.

- **Cemento Portland Tipo I:** este material se adquirió en el comercial local, su nombre es cemento **DIAMANTE** y cumple con los requisitos obligatorios de las normas NTC 121⁷, NTC 321⁸.
- **Agregados.** Para la elaboración de la mezcla se utilizó arena como agregado fino, y grava como agregado grueso, cuya procedencia fue de Pescadero Santander.

Para la caracterización de los agregados se realizaron pruebas granulométricas a fin de determinar el módulo de finura y el tamaño máximo de agregado grueso mostrándose estos resultados en las Tablas 5 y 7 del capítulo 4. Además se determinaron gravedades específicas, pesos específicos y la absorción para cada tipo de agregado basándose en las normas NTC 92⁹, NTC 176¹⁰ y NTC 237¹¹. La caracterización de estos materiales se realizó en el Centro de caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander.

Para la granulometría de los mismos se tuvo en cuenta las normas NTC 77¹², NTC 78¹³, para su caracterización se utilizó la escala de tamices del 4, 8, 16, 30, 50 y 100 en el orden respectivo para el agregado fino, pesando lo que quedó en cada

⁷ Norma Técnica Colombiana. NTC 121. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas.

⁸ Norma Técnica Colombiana. NTC 321. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas.

⁹ Norma Técnica Colombiana. NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. 1995

¹⁰ Norma Técnica Colombiana. NTC 176. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. 1995

¹¹ Norma Técnica Colombiana. NTC 237. Método para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos. 1995

¹² Norma Técnica Colombiana. NTC 77. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos). 1994

¹³ Norma Técnica Colombiana. NTC 78. Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. 1994

uno de ellos, a su vez se determinó su modulo finura. Para el agregado grueso se tomo el juego de tamices $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ y 4 en el orden respectivo, hallando a su vez el tamaño máximo y tamaño máximo nominal del agregado grueso; además se determinaron las gravedades especificas para cada tipo de agregado.

- **Agua potable.** Suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y los resultados de los análisis de la calidad del agua son facilitados por la misma entidad y son presentados en la Tabla 8 del capítulo de resultados.
- **Varillas o barras de refuerzo.** Se utilizaron barras de acero corrugadas y el diámetro seleccionado fue de $\frac{1}{2}$ de pulgada siendo estas las de mayor aplicación en las obras civiles.

Estas se cortaron en longitudes de 50 cm para que coincidieran con la longitud de los moldes de las probetas, también se tomaron muestras representativas las cuales fueron rectificadas para poder facilitar la evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander y los resultados se muestran en la Tabla 17 del capítulo de resultados.

c) Diseño de mezcla.

Después identificados y caracterizados los materiales se procedió al diseño de la mezcla de concreto con relación agua/cemento de 0.5, los resultados finales de los cálculos realizados se presentan en el Anexo a.

3.3.2 Diseño geométrico de las probetas. El diseño geométrico de las probetas a evaluar se determinó teniendo en cuenta los siguientes parámetros: técnica ultrasónica empleada, longitud mínima requerida según la frecuencia a utilizar,

dimensiones mínimas según el tamaño de agregado grueso utilizado, orientación y distribución de los refuerzos y el tamaño del palpador a utilizar.

La técnica ultrasónica empleada fue la de transmisión directa, para la cual se necesitan para cada inspección dos superficies opuestas planas y paralelas (como se indica en **2.3.2**), por lo anterior se descartaron los diseños cilíndricos y se escogió un paralelepípedo rectangular. Teniendo en cuenta las posibles frecuencias de operación: 24, 54 y 150 KHz, se determinaron las dimensiones mínimas de la probeta, basados en sus respectivas longitudes de onda de 0.16, 0.07 y 0.026 m respectivamente. Se descarto la dimensión de 0.16 m por aspectos económicos, dificulta de manejo por su gran tamaño, entre otros y la 0.026 m tomando en consideración el tamaño máximo del agregado grueso (3/4" o 0.019 m) el cual genera interferencia con el haz sonoro (como se indica en **2.2.1.1 parte (d)**). De acuerdo con lo anterior la probeta debería tener forma de paralelepípedo rectangular con dimensiones superiores a 0.07 m.

Las dimensiones finales de las muestras a utilizar se determinaron teniendo en cuenta la orientación y distribución de los refuerzos de acero además del tamaño de los palpadores a utilizar. Se emplearon distribuciones uniformes de refuerzos longitudinales, no se utilizaron amarres (o estribos) debido a su poco efecto sobre la VPU según la bibliografía revisada¹⁴. Teniendo en cuenta lo anterior, el tamaño del palpador a utilizar (0.050 m) y la posibilidad de tomar una gran variedad de medidas se determino que las probetas a desarrollar debían tener dimensiones de: 0.15 x 0.30 x 0.50 m.

Con el fin de evaluar el efecto de la orientación y cantidad de refuerzos se diseñaron probetas con y sin refuerzo. El número de refuerzos escogido vario

¹⁴, Raffaele Pucinotti, INFLUENCE OF STEEL REINFORCEMENT ON ULTRASONIC PULSES VELOCITY Department of Mechanics and Materials, Mediterranean University of Reggio Calabria, Italy 2007

entre 1 y 4 varillas (esta última simulando un caso real). Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

3.3.3 Diseño geométrico de los moldes. Para la elaboración de probetas fue necesario diseñar moldes para la fundición de cada una de ellas, estos se elaboraron con forma de paralelepípedos rectangulares de madera tipo triplex, (estas están fabricadas con chapas de madera, las cuales por ser un producto de origen natural presentan variaciones en su color, veta y textura; que son características propias de la madera, además presentan ventajas como mantener sus dimensiones estables a través del tiempo)¹⁵, cuyas dimensiones internas fueron de 0.15 x 0.30 x 0.50 m. Adicional a esto una de las caras es extraíble para facilitar el desencofrado de las probetas. Los planos y especificaciones de estos moldes se presentan en el capítulo de resultados. También se utilizaron correas de ajuste y alambre de amarre para asegurar la tapa extraíble de los moldes y por ende las dimensiones de las probetas.

3.3.4 Elaboración de las probetas diseñadas. Para la elaboración de las probetas se utilizaron las instalaciones del Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

Inicialmente se ubicaron los materiales a utilizar en el lugar determinado siendo previamente pesados en una balanza analítica, después se armaron los moldes ajustando la tapa movable con amarraderas y alambre de amarre, se limpiaron y se les impregno de A.C.P.M. para evitar que la mezclas se adhiriera y facilitar su desmoldado o desencofrado, como se indica en la Fotografía 4.

¹⁵ PIZANO S.A. – EI TRIPLEX PIZANO cumple y supera los requisitos de la Norma Técnica Colombiana NTC 698 - TIPO I.

Fotografía 4. Moldes de triplex

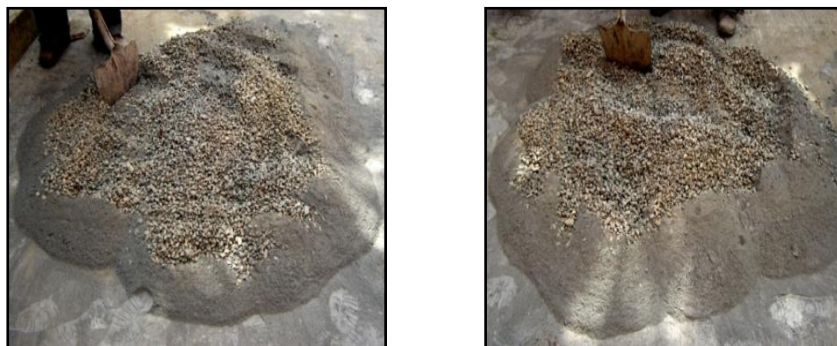


Fuente: los autores

Luego se procedió a realizar la mezcla; agregando los materiales, de acuerdo a los cálculos para el diseño de la mezcla mostrado en el capítulo 4 en las Tablas 10 y 11 para la relación agua/cemento de 0.5.

En la elaboración de la mezcla; primero se agregó la arena, seguidamente el cemento, estos se mezclaron por un tiempo hasta homogenizar, después se extendió en forma de círculo para así luego agregar la grava y seguidamente el agua, como se indica en la Fotografía 5.

Fotografía 5. Elaboración de la mezcla



Fuente: los autores

Después de agregados todos los materiales, estos se mezclaron fuertemente hasta obtener una pasta homogénea y manejable como se aprecia en la Fotografía 6.

Fotografía 6. Mezcla homogénea



Fuente: los autores

Cuando la mezcla estuvo lista, se procedió al llenado de los moldes, esto se hace depositando tres capas de igual volumen aproximadamente. Cada vez que se agrega una capa, esta se empareja y se apisona con la varilla de compactación, dando 25 golpes distribuidos uniformemente en cada una de las capas, teniendo en cuenta que las barras de refuerzo no se movieran del sitio establecido para estas, además de esto también se dieron unos golpes por fuera de los moldes para que ayude a obtener una mejor compactación de la mezcla. Esto se hizo siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 1377¹⁶.

Una vez terminado este procedimiento, las probetas se dejaron entre 16 y 24 horas de fraguado en los moldes a temperatura ambiente y después se desencofraron, como se muestra en la Fotografía 7 y 8 respectivamente.

¹⁶ Norma Técnica Colombiana. NTC 1377. Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio.

Fotografías 7 y 8. Fraguado y desencofrado de las probetas



Fuente: los autores

Después del desencofrado, las probetas se dejaron curar en condiciones ambientales hasta que alcanzara su resistencia máxima la cual se estima es lograda a los 28 días de curado, sin embargo se dejaron en este estado más tiempo lo cual no cambia sustancialmente sus condiciones, porque su resistencia crece asintóticamente a partir de este tiempo (como se indica en **2.2.1.3**) ver Fotografía 9.

Fotografía 9. Curado de las probetas al ambiente



Fuente: los autores

3.4 MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LAS PROBETAS.

Para el desarrollo de esta etapa, se llevaron a cabo las siguientes actividades: realización de pruebas preliminares, adecuación de las probetas para la realización del ensayo y toma de datos.

En la mayoría de las aplicaciones es necesario medir la velocidad de pulso a un alto grado de la exactitud ya que cambios relativamente pequeños en la velocidad de pulso por lo general reflejan relativamente grandes cambios en el estado del concreto. Por esta razón es importante que el cuidado se tenga para obtener la posible exactitud más alta del tiempo de tránsito y las medidas de longitud de camino desde que la medida de la velocidad de pulso depende de estos dos.

Es conveniente para medir la velocidad del pulso con una precisión de $\pm 2\%$, lo que permite una tolerancia en la medición independiente de la longitud del camino y tiempo de tránsito de sólo un poco más de $\pm 1\%$.¹⁷

3.4.1 Pruebas preliminares. A partir de esto se definieron los parámetros con los cuales se realizaron las pruebas establecidas para el desarrollo de esta investigación, los cuales fueron voltaje de operación, frecuencia de los palpadores y el acoplante más adecuado para dicho fin. Los resultados se indican en la Tabla 12 del capítulo 4.

3.4.2 Adecuación de las probetas para la realización del ensayo. Para realizar las mediciones, se prepararon las caras de las probetas, lijándolas con piedra esmeril y lija de agua numero 80, alternativamente de tal manera que sus superficies quedaran lisas y planas para un mejor acople y así garantizar la toma de los datos (ver Fotografía 10).

¹⁷ Farnell. Ultrasonic Pulse Velocity Testing Technical Reference Manual. 2008.

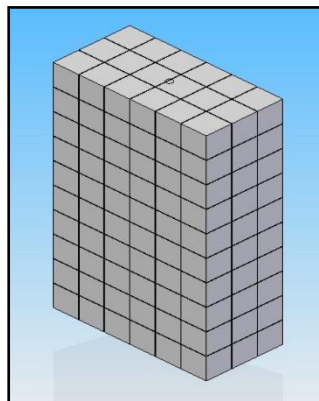
Fotografía 10. Preparación de las superficies de las probetas



Fuente: los autores

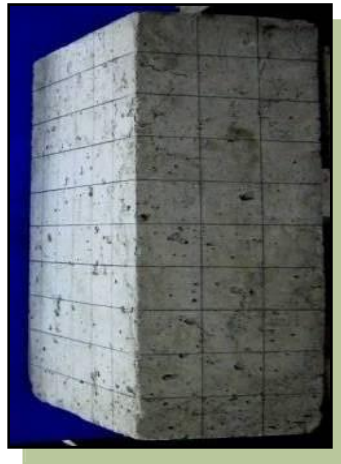
A partir de las pruebas preliminares se determinó que la posición correcta de los palpadores debería ser cara a cara para poder obtener una medida adecuada de las aplicaciones deseadas, de lo contrario se obtendrán mediciones erróneas o incorrectas, por lo anterior y considerando el tamaño de las probetas a caracterizar, fue necesario trazar una cuadrícula de 5x5 cm en todas sus caras como se muestra en la Figura 9 y la Fotografía 11.

Figura 9. División de las probetas en todas las superficies



Fuente: los autores

Fotografía 11. División de las probetas en todas sus superficies



Fuente: los autores

3.4.3 Toma de datos. Una vez cargado el equipo, se conectaron los transductores a los puertos correspondientes, se encendió el equipo, se aplicó acoplante y se enfrentaron los transductores para su calibración, como se observa en la Fotografía 12, obteniéndose un tiempo de vuelo de la onda de $0 \mu\text{s}$.

Fotografía 12. Calibración del equipo de ultrasonido.



Fuente: los autores

Posteriormente se escogió el parámetro a medir (VPU o tiempo de transito) y se aplicó suficiente acoplante, que en este caso fue vaselina blanca, a los transductores y a la superficie de la probeta a estudiar.

Seguidamente se ubicaron el transductor emisor en un extremo de la probeta y el transductor receptor en el otro extremo, utilizando el método directo de medida de velocidad de pulso ultrasónico Fotografía 13.

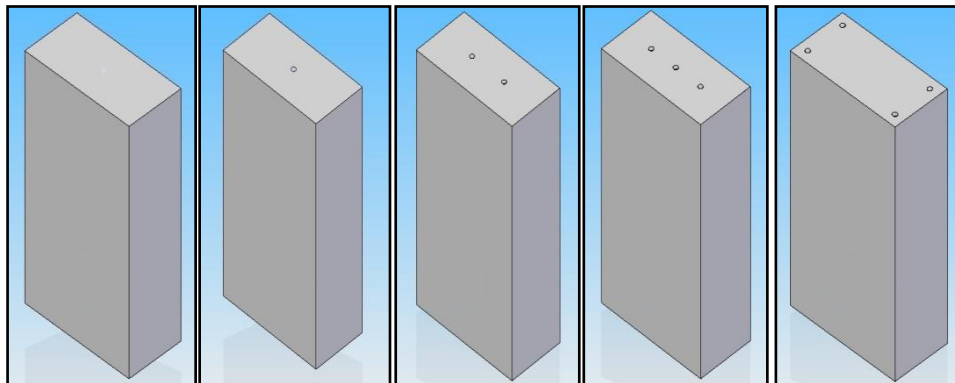
Fotografía 13. Método directo, ubicación de los palpadores.



Fuente: los autores

Para el desarrollo de este ensayo se utilizaron cinco probetas con relación agua/cemento (a/c) constante de 0.5 en las cuales se variaron el numero de barras de refuerzo desde 0,1,2 y 3 refuerzos los cuales fueron distribuidos uniformemente en las probetas y por ultimo una con 4 refuerzos la cual simula un caso real de una columna. Ver Figura 10.

Figura 10. Probetas con diferente número de refuerzos



Fuente: los autores

A cada probeta se les realizó mediciones haciendo un barrido sobre cada una de la superficie de las caras, obteniéndose 2 valores de VPU y 2 valores de tiempo de tránsito por cada punto de medición y calculándose un promedio de los datos obtenidos, los cuales se presentan en el capítulo 4.

Para continuar con esta investigación era necesario conocer la VPU en el concreto blanco (sin barra de refuerzo) y la VPU en la barra de refuerzo por separado y tomar esta información como punto de partida para analizar la influencia de el refuerzo del concreto en la VPU

Con el fin de evaluar el efecto de la orientación de las barras de refuerzo se hicieron mediciones de VPU y tiempo de tránsito tanto en la dirección longitudinal y transversal de los refuerzos. El efecto de la cantidad de refuerzos se valoro tomando datos sobre las muestras con 1, 2, 3, y 4 varillas de refuerzo. La influencia de la cercanía del palpador a las barras de refuerzo se evaluó asiendo mediciones con variación de distancia a las barras de refuerzo. Se estableció un eje de coordenadas sobre cada una de las probetas con el fin de llevar control sobre las mediciones realizadas.

3.5 EFECTO DE LAS BARRAS DE REFUERZO DEL CONCRETO EN LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Después de tomados los tiempo de tránsito y las VPU a las probetas, se procedió a hacer el respectivo análisis de resultados, analizando el efecto de la orientación, la cantidad de refuerzos y la influencia de la cercanía de los palpadores al refuerzo sobre la VPU. Estos resultados se presentan en el capítulo 4.

3.6 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Con los resultados obtenidos y sus respectivos análisis se elaboro el informe final.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación así como sus respectivos análisis.

4.1 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO CON BARRAS DE REFUERZO.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales componentes de la mezcla de concreto, el diseño de la mezcla utilizada en esta investigación y el diseño geométrico de las probetas.

4.1.1 Caracterización de los materiales.

Agregado fino. En las Tablas 4 y 5 se presentan respectivamente las propiedades físicas y el análisis granulométrico del agregado fino.

Tabla 4. Propiedades físicas del agregado fino (arena)

ENSAYO	RESULTADO
Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC 92.	Peso unitario suelto: 1414 Kg/m ³ Peso unitario compactado: 1584 Kg/m ³
Determinación de la densidad y absorción del agregado fino. NTC 237.	Densidad aparente SSS: 2670 Kg/m ³ Absorción: 1.46 %
Determinación del contenido de material orgánica sobre los agregados (calorimetría). NTC 127	#1

Fuente: los autores

Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado fino (arena).

Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	36.9	3.69	3.69	96.31
8	157.2	15.72	19.41	80.09
16	163.9	16.3	35.71	64.29
30	251.3	25.13	61.01	38.99
50	203	20.3	81.31	18.69
100	99.7	9.97	91.28	8.72
Fondo	88.9	8.89	100	0
Total	1000	100	Peso Muestra	1000 g

Fuente: los autores

A partir del análisis granulométrico se obtuvo el modulo de finura mediante el uso de la siguiente expresión matemática.

$$\text{Modulo de Finura} = \sum \% \text{Retenido Acumulado Tamiz 4-100} / 100$$

$$\text{Modulo de Finura} = 292.41 / 100 = 2.924$$

$$\text{Modulo de Finura} = 2.92.$$

El modulo de finura cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33, indicándonos que debe ser mayor de 2.3 y menor de 3.1.

Agregado grueso. En las Tablas 6 y 7 se presentan respectivamente las propiedades físicas y el análisis granulométrico del agregado grueso.

Tabla 6. Propiedades físicas del agregado grueso (grava)

ENSAYO	RESULTADO
NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados.	Peso unitario suelto: 1438 Kg/m ³ Peso unitario compactado: 1573 Kg/m ³
NTC 176. Método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso.	Densidad aparente: 2650 kg/m ³ Densidad aparente SSS: 2690 kg/m ³ Absorción: 1.54 %

Fuente: los autores

Tabla 7. Análisis granulométrico del agregado grueso (grava).

Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
¾	-	-	-	-
½	882	12.60	12.60	87.4
3/8	4424	63.20	75.80	24.2
4	1694	24.20	100	0
Fondo	-	100		
Total	7000			

Fuente: los autores


A partir del análisis granulométrico se obtuvo el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Tamaño Máximo ¾"

Tamaño Máximo Nominal ½"

Agua potable. En la Tabla 8 Se presentan los resultados del análisis de control de el agua utilizada.

Tabla 8. Resultados de los análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

No Aplica		CALIDAD FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCIÓN																		
F CC 507-006		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																		
Rev.:0																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA					AÑO:		2009											
PARAMETROS MES	Parámetros Físicoquímicos											Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL			
	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNIT	Color Aparente UPC	pH Unidades	Clor y Sabor (0: Aceptable 1: No Aceptable)	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitros mg NO ₂ /L	Nitritos mg NO ₃ /L	No de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales		% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
Enero	90	1,05	0,81	4,0	7,35	0	0,06	51,2	64,0	2,5	20,1	ND	1,9	ND	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	81	1,07	1,1	2,8	7,28	0	0,07	47,4	61,0	2,5	20,6	ND	2,0	ND	162	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,1	2,86	7,04	0	0,08	40,8	68,1	2,7	32	ND	2,0	ND	186	0	100	0	100	0,02
Abril	87	1,03	1,3	2,6	7,16	0	0,09	47,5	65,1	2,5	24,3	ND	1,9	ND	174	0	100	0	100	0,32
Mayo	93	1,06	1,1	2,1	6,99	0	0,09	42,2	62,4	2,7	22,6	ND	2,2	ND	186	0	100	0	100	0,10
Junio	90	0,98	1,0	3,8	7,06	0	0,08	42,5	57,6	2,4	20,2	ND	1,8	ND	180	0	100	0	100	0,02
PROMEDIO	89	1,02	1,1	3,0	7,15	0	0,08	45,3	63,0	2,5	23,3	ND	2,0	ND	178	0,0	100	0,0	100	0,08
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/día	0	100	0	100	0-5

Convencciones: mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable

Nota: El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5 AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.

Elaboró: URIEL SALOMON BARRAGAN Revisó y Aprobó: CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente: www.amb.com.co

Varillas o barras de refuerzo. Se utilizó acero de bajo carbono cuya composición se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Composición química de la barra de refuerzo

COMPOSICIÓN QUÍMICA (Análisis de colada %)						
Denominación	C Máx.	Mn Máx.	P Max.	S Max.	Si Max.	CE
NTC – 2289 (PDR – 60*)	0,30	1,5	0,035	0,045	0,5	0,55Máx.
NTC – 161	Máx.	Máx.	0,05	0,06	-	-

Fuente: Normas ASTM A 706

Diseño de la mezcla. En las Tablas 10 y 11. Se indican los diferentes agregados, las cantidades obtenidas en peso y su equivalencia en volumen a partir del diseño de mezcla con relación agua cemento de 0.5, así como también se indican las cantidades totales de la mezcla realizada. Los respectivos cálculos se presentan en el anexo A.

Tabla 10. Cantidades en peso y volumen para un metro cubico de concreto.

Material	Peso (Kg)	Volumen (L)
Agua	200	200
Cemento	400	132.01
Agregado fino	830.37	311
Agregado grueso	960	357

Fuente: los autores

En la Tabla 11 se presentan las cantidades necesarias para la preparación de las 5 probetas de concreto con relación A/C de 0.5.

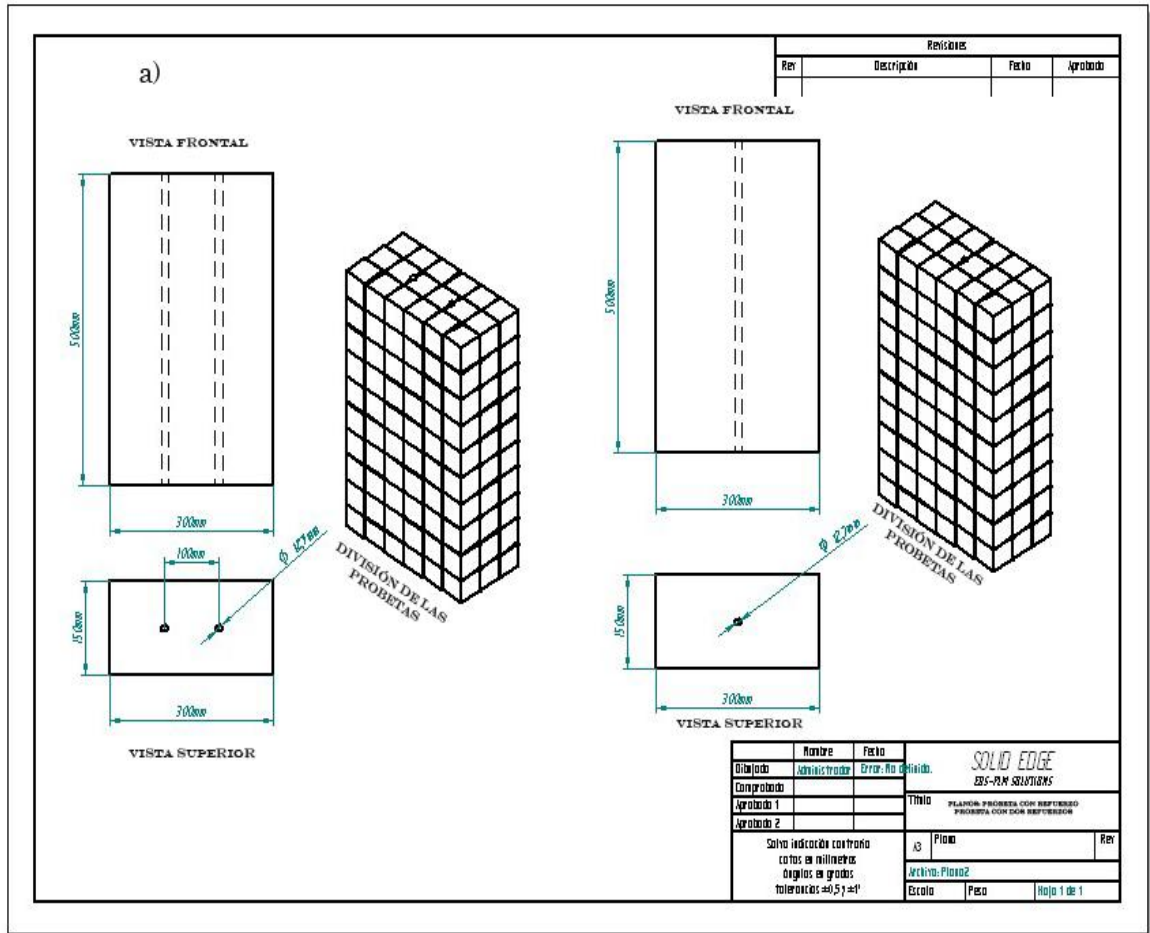
Tabla 11. Peso de los materiales para la mezcla realizada.

Material	Peso (Kg) 1 probeta	Peso (kg) Mezcla total
Agua	4.5	22.5
Cemento	9	45
Agregado fino	18.68	93.40
Agregado grueso	21.6	108.0

Fuente: los autores

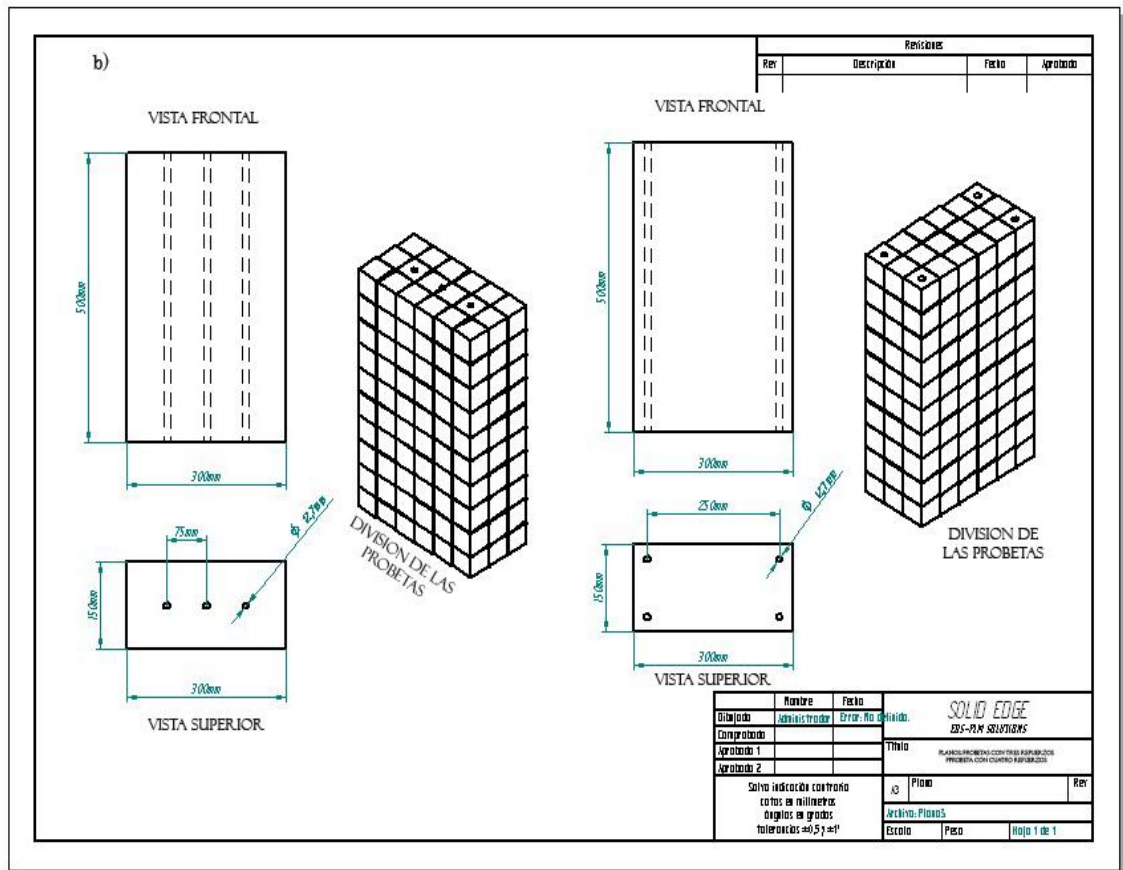
4.1.2 Diseño geométrico de las probetas y los moldes. En las Figuras 11 y 12, se aprecian las vistas superior y frontal de las diferentes probetas elaboradas con sus respectivos refuerzos. Con una y dos varillas de refuerzo, con tres y cuatro varillas de refuerzo respectivamente.

Figura 11. Probetas con una y dos varillas de refuerzo



Fuente: los autores

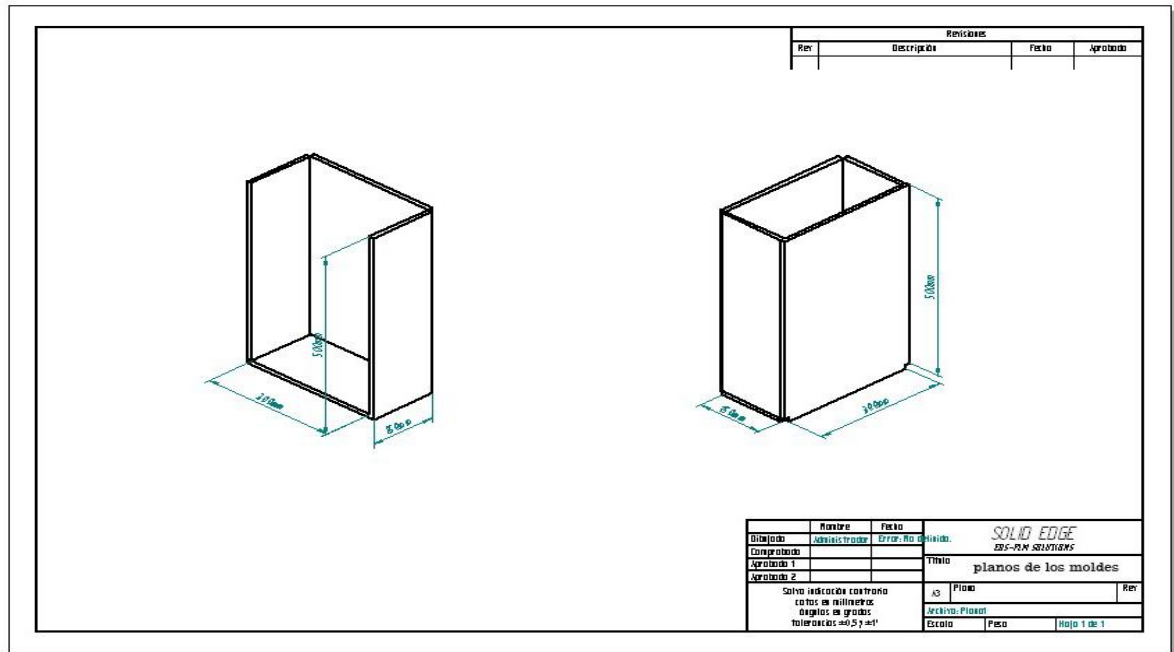
Figura 12. Probetas con tres y cuatro varillas de refuerzo



Fuente: los autores

En la Figura 13 y la Fotografía 14, se aprecian los planos de los moldes y su presentación final.

Figura 13. Planos de los moldes



Fuente: los autores

Fotografía 14. Moldes de madera



Fuente: los autores

4.2 MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LAS PROBETAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la realización de las pruebas preliminares y la toma de datos de las probetas a estudiar. Para realizar esta etapa se llevaron a cabo las siguientes actividades: pruebas preliminares, caracterización del concreto, la barra de refuerzo y mediciones por ultrasonido en concreto reforzado.

4.2.1 Pruebas preliminares. Los resultados de estas pruebas se muestran en el Anexo B. Una vez realizadas se escogieron los parámetros a utilizar para el desarrollo de esta investigación.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, lo aconsejado en el manual del equipo y la teoría consultada se escogieron los parámetros de funcionamiento los cuales se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de operación.

TIPO DE PARÁMETRO	
Voltaje de operación	500 V
Frecuencia de los palpadores	54 KHz
Acoplante	Vaselina blanca

Fuente: los autores

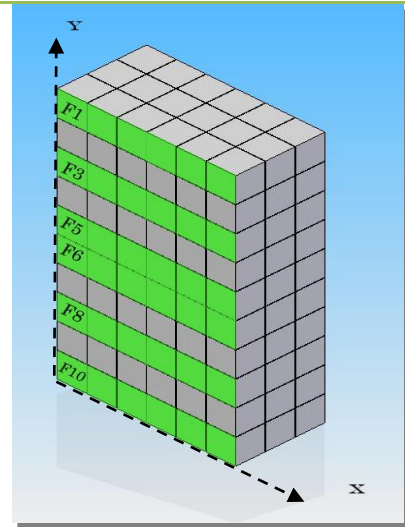
4.2.2 Toma de datos. En esta etapa se realizó la medición de VPU sobre muestras de concreto, la barra de refuerzo y el concreto reforzado.

4.2.2.1 Medición de la VPU sobre concreto. Utilizando el equipo **CNS FARNELL Modelo Pundit Plus**, se realizaron lecturas en la probeta blanca o sin barra de refuerzo. Los resultados se muestran en las Tablas 13 a la 16 y en las Gráficas 1 a la 3. A continuación se presenta el análisis realizado para cada una de las vistas

de la probeta evaluada. La opción alternativa de medición de tiempo ofrecida por el equipo se tomo principalmente con el fin de verificar los resultados obtenidos. En la Tabla 13 se muestran los datos obtenidos para la VPU en m/s y el tiempo de vuelo en μs para la vista frontal y en la Gráfica 1 el comportamiento seguido por éstos.

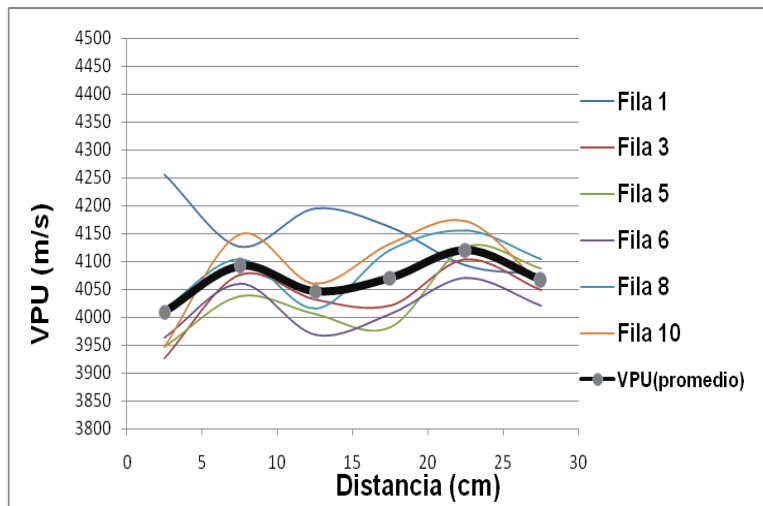
Tabla 13. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto para una distancia de 0.15 m.

Vista frontal probeta # 1		Numero de refuerzos: 0					
		Voltaje 500 V					
		Palpador 54 KHz					
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.15 m					
Fila 1	VPU	4255	4126	4195	4161	4093	4076
	TIEMPO	35,2	36,5	35,7	36,25	36,45	36,75
Fila 3	VPU	3926	4076	4032	4021	4104	4049
	TIEMPO	38,15	36,6	37,05	37,35	36,55	37,05
Fila 5	VPU	3947	4038	4005	3982	4126	4087
	TIEMPO	38,25	37,05	37,5	37,55	36,35	36,45
Fila 6	VPU	3963	4060	3968	4005	4071	4021
	TIEMPO	37,85	36,95	37,8	37,3	36,9	36,95
Fila 8	VPU	4016	4104	4016	4120	4155	4104
	TIEMPO	37,3	36,55	37,25	36,45	36,1	36,85
Fila 10	VPU	3947	4149	4060	4132	4172	4060
	TIEMPO	37,95	36,15	37,1	36,6	35,95	36,7



Fuente: los autores

Gráfica 1. Distancia Vs VPU vista frontal

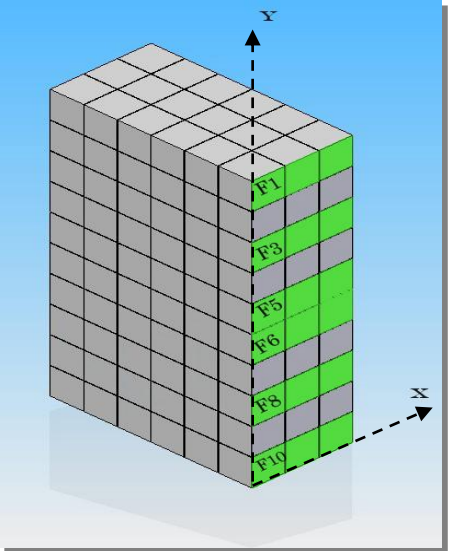


En la Gráfica 1 se observan las curvas obtenidas de las mediciones de VPU realizadas a través de un barrido hecho por filas en la cara frontal de la probeta, así como también la curva del promedio de éstas mediciones. Estas curvas muestran un comportamiento propio de un material heterogéneo y no presentan un patrón definido, por lo anterior se hizo necesario calcular la desviación o incertidumbre que presentan los resultados obtenidos sobre cada vista en cada una de las probetas, es así, que para esta vista se obtuvo un valor de velocidad promedio o media de 4067.08 ± 24.79 m/s.

En la Tabla 14 se muestran los datos obtenidos para la VPU en m/s y el tiempo de vuelo en μ s para la vista lateral y en la Gráfica 2 el comportamiento seguido por éstos.

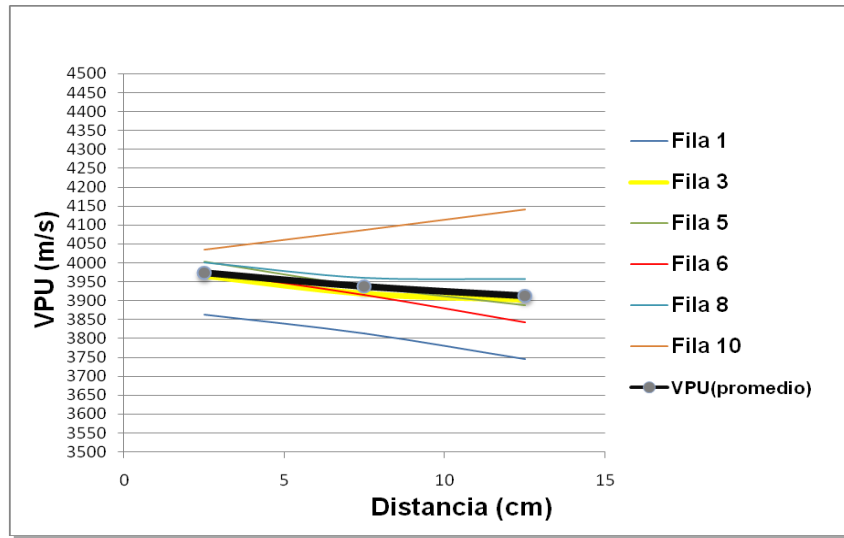
De la observación de la Gráfica 2 se puede decir que la VPU presenta un comportamiento lineal descendente, sin embargo se resalta que solo se dispone de tres puntos por fila para la elaboración de la curva, en este caso se obtuvo una velocidad promedio de $3941,72 \pm 44.11$ m/s.

Tabla 14. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto para una distancia de 0.30 m.

Vista lateral probeta # 1		Numero de refuerzos: 0		
		Voltaje 500 V		
		Palpador 54 KHz		
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.30 m		
Fila 1	VPU	3863	3813,5	3745
	TIEMPO	75,45	73,45	75,25
Fila 3	VPU	3965,5	3918,5	3903,5
	TIEMPO	75,4	76,75	76,8
Fila 5	VPU	4002,5	3937	3888,5
	TIEMPO	75,35	76,35	77,15
Fila 6	VPU	3975,5	3916	3843,5
	TIEMPO	75,05	76,7	78,15
Fila 8	VPU	4000	3960	3957
	TIEMPO	74,95	75,45	75,85
Fila 10	VPU	4035	4087	4140
	TIEMPO	73,95	73,65	72,4

Fuente: los autores

Gráfica 2. Distancia Vs VPU vista lateral.



En la Tabla 15 y la Gráfica 3 se muestran los datos obtenidos en la vista superior para la VPU en m/s y el tiempo de vuelo en μs y el comportamiento seguido por éstos.

Gráfica 3. Distancia Vs VPU vista superior.

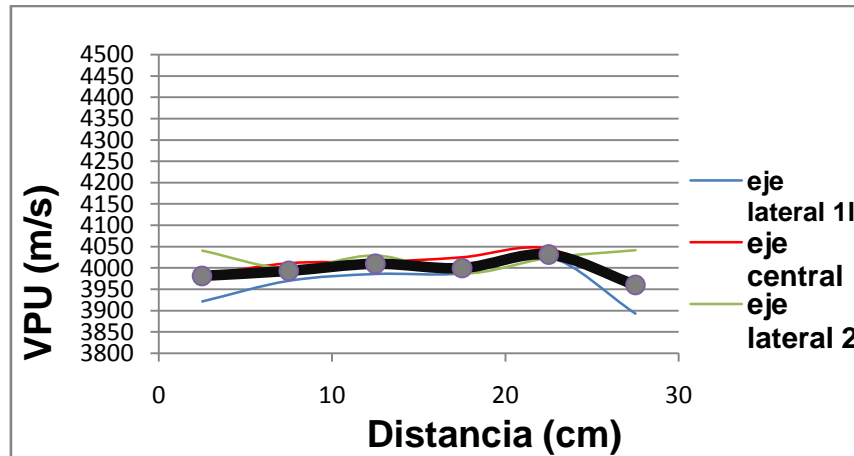
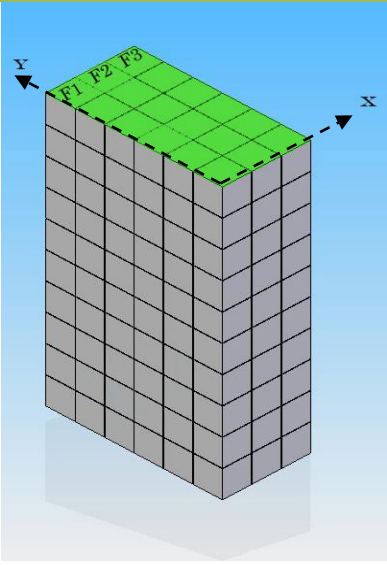


Tabla 15. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto para una distancia de 0.50 m.

Vista superior probeta # 1	Número de barras de refuerzo: 0						
	Voltaje 500 V						
	Palpador 54 KHz						
	Longitud de recorrido de la VPU: 0.50 m						
Fila	VPU	3921	3969,5	3985,5	3987	4025,5	3892,5
1	TIEMPO	127,7	125	125,1	125,4	123,95	129
Fila	VPU	3982	4011	4014	4025	4045	3946
2	TIEMPO	125,6	124,75	124,2	124,05	123,6	127,05
Fila	VPU	4040,5	3998	4029	3986,5	4023,5	4041,5
3	TIEMPO	123,55	125,05	124,2	125,45	124	123,6

Fuente: los autores

Al igual que para las dos vistas anteriores se hizo necesario calcular la incertidumbre que se presenta en los datos, obteniendo un valor de velocidad promedio de 3995.75 ± 19.59 m/s.

Tabla 16. VPU y tiempo de vuelo promedio para la probeta blanca

	VPU PROMEDIO (m/s)	TIEMPO DE TRANSITO PROMEDIO (μs)
Vista Superior	3987,5	125,4
Vista Lateral	3941,72	76,15
Vista Frontal	4052,4	37,01
Promedio total	3993.87	*

Fuente: los autores

*Para el tiempo de tránsito no se determina el valor promedio debido a que las distancias tomadas para evaluar la VPU son diferentes en cada vista.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en las diferentes vistas de la probeta en blanco, se obtuvo un valor promedio para la VPU de 3993.87 ± 88.49 m/s, la cual teniendo en cuenta la clasificación realizada por Malhotra (**ver Tabla 2**) permite clasificarlo como un concreto de buena calidad. Debido a que esta muestra analizada no tiene refuerzo se tomo como patrón de comparación para el análisis de las demás muestras con refuerzo.

4.2.2.2 Medición de VPU sobre la barra de refuerzo. Utilizando el equipo **KRAUTKRAMER USM 35XS**, se realizaron las pruebas en la barra de refuerzo utilizando un intervalo frecuencia de 2-20 MHz, una ganancia de 50 dB y se utilizo un palpador KRAUTKRAMER de línea de retardo referencia ALPHA 2 de 15 MHz y diámetro 0.25 “. Los resultados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Determinación de la velocidad en el acero de refuerzo.

No. de prueba	Velocidad (m/s)	
	Paralelo al eje	Normal al eje
1	5721	5856
2	5812	5856
3	5628	5871
4	5567	5848
Promedio	5769.88	

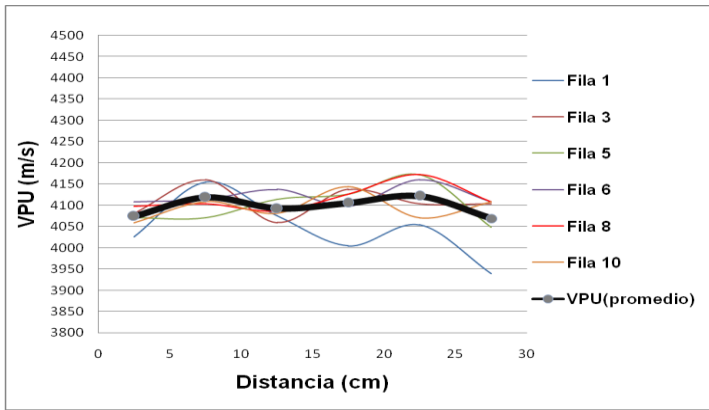
Fuente: los autores

De los datos medidos en forma paralela y normal al eje de la muestra de acero reportados en la Tabla 17 se obtiene una velocidad promedio del sonido en el material de 5769.88 ± 81.41 m/s.

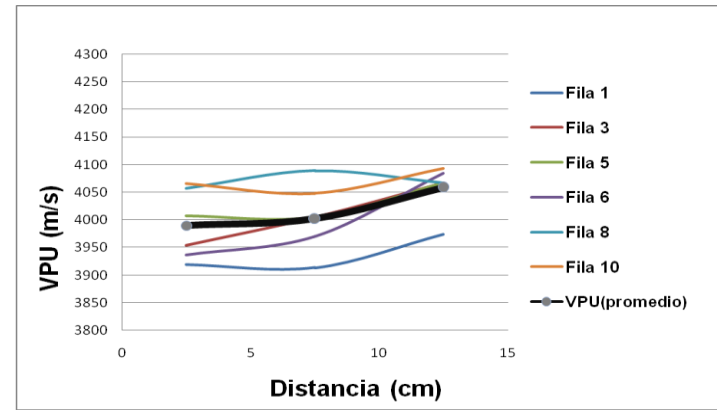
4.2.3 Medición de la VPU sobre el concreto reforzado. Conociendo los respectivos valores de VPU y tiempo de vuelo de la onda para el concreto y la

Gráfica 4. Comportamiento de la Vpu para la probeta con una barra de refuerzo

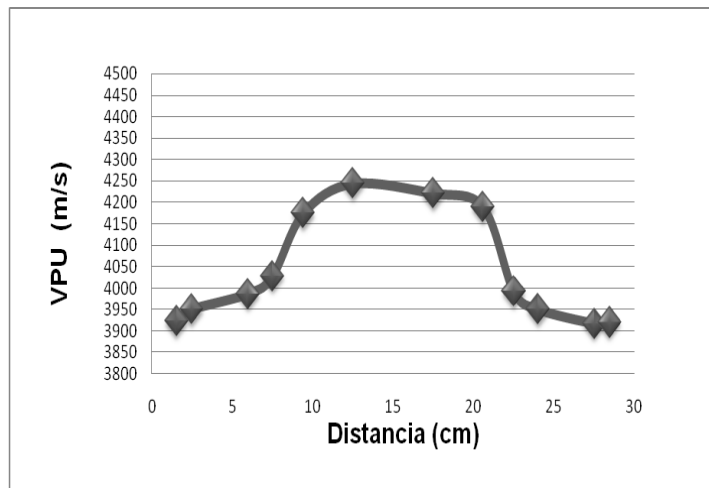
a) VISTA FRONTAL



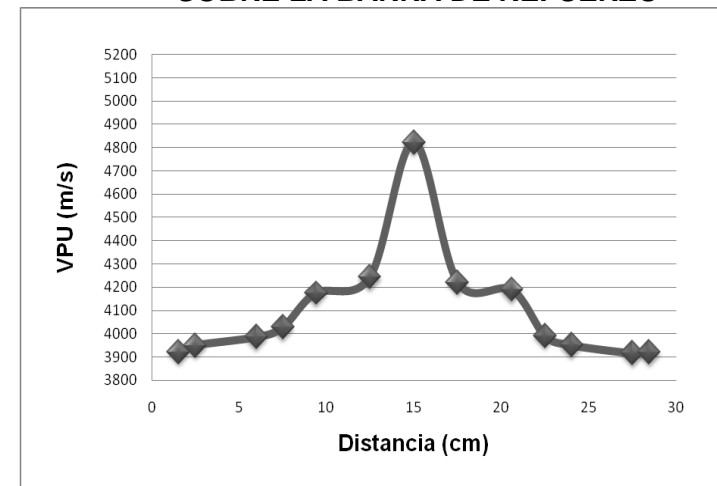
b) VISTA LATERAL



c) VISTA SUPERIOR



d) VISTA SUPERIOR INCLUYENDO LECTURA SOBRE LA BARRA DE REFUERZO



barra de refuerzo, se procedió a obtener estas mediciones para las probetas de concreto reforzado, iniciando por la que tenía una barra y finalizando con la que tenía 4 barras. Los resultados se presentan a continuación.

Los valores de VPU y tiempo de vuelo para cada una de las vista de cada probeta con 1, 2, 3 y 4 refuerzos se presenta en el Anexo D. A continuación se muestra el comportamiento seguido por estos parámetros.

En la Gráfica 4 se muestra el comportamiento de VPU contra distancia para la probeta con una barra de refuerzo, en ella se presentan los resultados obtenidos para las vistas frontal, lateral y superior.

En la Gráfica 4 a) se observan las curvas obtenidas de las mediciones de VPU realizadas en la cara frontal de la probeta, así como también la curva del promedio de las mediciones. Al igual que en la probeta sin refuerzo las curvas muestran VPU propias de un material heterogéneo, pero no muestran un incremento significativo al acercarse a la posición de la barra de refuerzo, pues solo se aprecia un aumento de 44.88 m/s con respecto a la probeta sin refuerzo (ver Tabla 16). Por lo anterior podemos decir que la VPU cuando es medida perpendicularmente a la posición del refuerzo no sufre cambios que permitan establecer la presencia de éste en el material.

En la Gráfica 4 b) se muestra el comportamiento seguido por la VPU en la vista lateral de la probeta de un solo refuerzo. En este caso el haz sonoro transita en forma perpendicular al mismo, la gráfica observada muestra un comportamiento ligeramente ascendente, sin embargo se debe tener en cuenta que solo se utilizan tres datos promedio para su elaboración, y el refuerzo esta ubicado en el punto central de la curva. Además muestra una variación de 75.6 m/s respecto a la VPU promedio de la probeta sin refuerzo (ver Tabla 18) lo cual indica un efecto leve sobre la VPU.

En la Gráfica 4 c) y d) se presentan los resultados obtenidos para la vista superior de la probeta con un refuerzo, se debe tener en cuenta que en la Gráfica 4 c) el incremento en la VPU es notorio, pero en la Gráfica 4 d) la variación es más evidente ya que incluye el valor leído sobre la barra de refuerzo. Los valores graficados corresponden a los obtenidos sobre el eje central de la probeta (fila 2), debido a que en ésta se aprecia en forma clara el efecto causado por el refuerzo. Las gráficas muestran un aumento significativo de la VPU cuando el haz sonoro viaja en forma longitudinal a la barra de refuerzo, notándose éste a medida que los puntos de evaluación son más cercanos a la barra. Por lo anterior se puede identificar en forma clara el efecto de la cercanía de los palpadores al refuerzo, el cual se traduce en un aumento de la VPU que va aproximadamente desde 3930 (m/s) cuando no hay influencia de la barra de refuerzo hasta 4820 (m/s) cuando los palpadores están ubicados sobre la barra de refuerzo.

Como ya se indico anteriormente, tanto la gráfica de la vista frontal como la vista lateral de la probeta con un refuerzo presentan un comportamiento similar a las obtenidas para las mismas vistas de la probeta en blanco, por lo anterior, la VPU no se ve afectada significativamente por la presencia de una barra de refuerzo. El aumento presentado puede ser resultado de otros factores como son la heterogeneidad del material, una compactación no uniforme en el proceso de fabricación de las probetas y el tamaño del agregado.

Tabla 18. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca y con un refuerzo

	VPU PROMEDIO (m/s) 0 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 1 refuerzo
Vista Superior	3987,5	4082.94
Vista Lateral	3941,72	4016.78
Vista Frontal	4052,4	4097.28

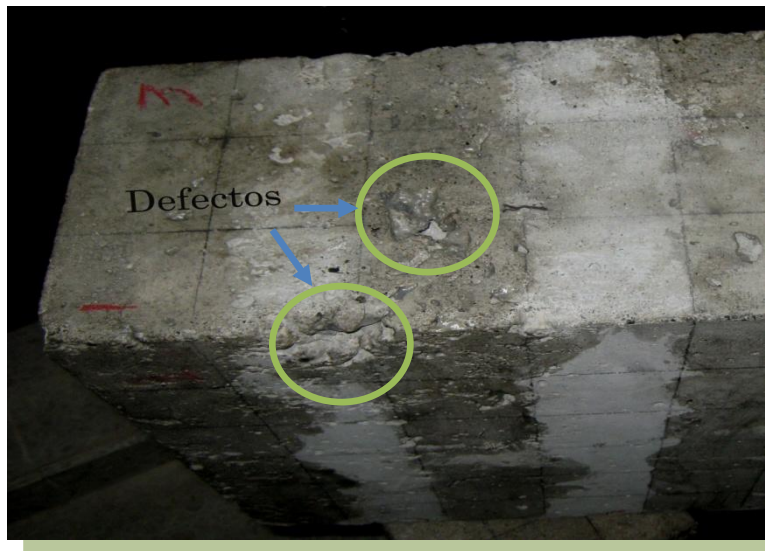
Fuente: los autores

Adicional a esto se puede destacar que la distancia del palpador al refuerzo tampoco influye en el aumento o disminución de las velocidades obtenidas, puesto que los comportamientos no varían entre sí, al hacer mediciones tomando distancias de 0.075 m (cara frontal) y 0.15 m (cara lateral) entre el palpador y la barra de refuerzo respectivamente.

En la Gráfica 5 se muestra el comportamiento de VPU contra distancia para la probeta con dos barras de refuerzo, en ella se presentan los resultados obtenidos para las vistas frontal, lateral y superior.

Antes de hacer el respectivo análisis de la probeta con dos barras de refuerzo, cabe mencionar que ésta presentó fallas visibles de falta de compactación en el proceso de fabricación (ver Fotografía 15). A pesar de estas fallas, los valores obtenidos sirvieron para enriquecer el estudio realizado.

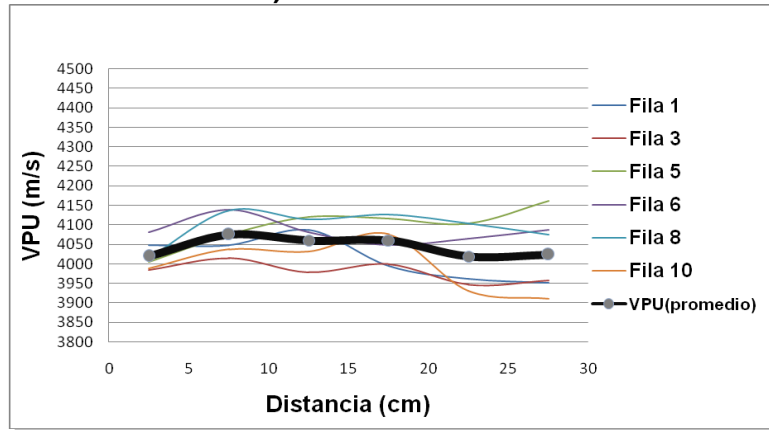
Fotografía 15. Fallas encontradas en la probeta con dos barras de refuerzo



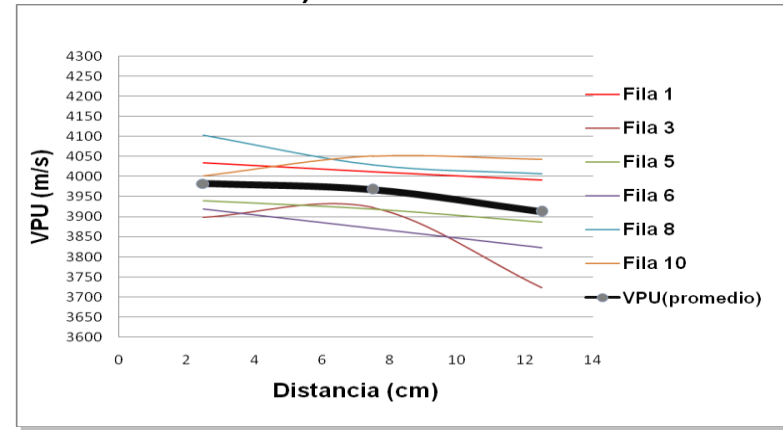
Fuente: los autores

Gráfica 5. Comportamiento de la vpu para la probeta con dos barras de refuerzo

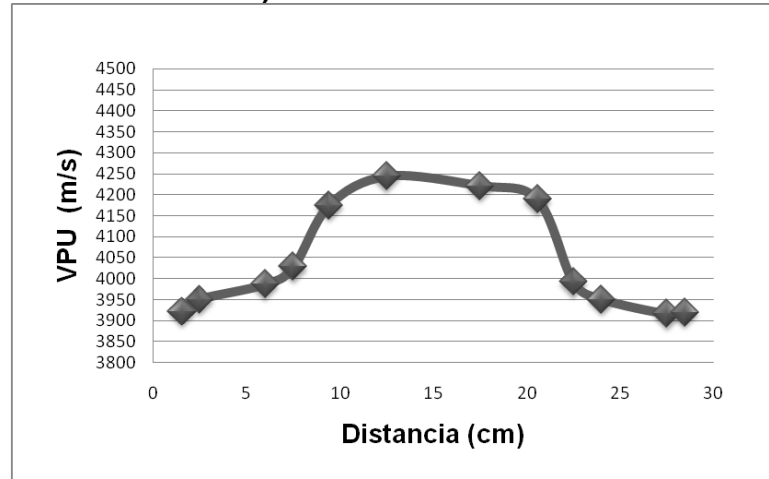
a) VISTA FRONTAL



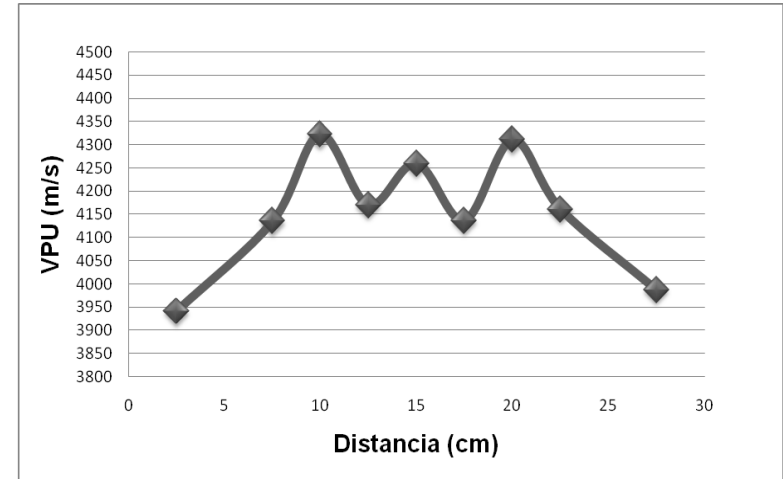
b) VISTA LATERAL



c) VISTA SUPERIOR



d) VISTA SUPERIOR INCLUYENDO LECTURA SOBRE LAS BARRAS DE REFUERZO



La Gráfica 5 a) vista frontal, muestra el comportamiento de la VPU cuando el haz sonoro viaja en forma perpendicular a las barras de refuerzo, (en este caso dos), se observa que al igual que en los casos anteriores, probetas con 0 y 1 refuerzo (ver Tabla 19), no hay un aumento en la VPU de la probeta analizada, puesto que el incremento que se esperaba ocurriera por la presencia de las barras, es contrareestado por los defectos mencionadas anteriormente, por esta razón los cambios de VPU se le atribuyen a la heterogeneidad del material, especialmente a la falta de compactación durante el proceso de fabricación.

Tabla 19. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca, con uno y dos refuerzos

	VPU PROMEDIO (m/s) 0 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 1 refuerzo	VPU PROMEDIO (m/s) 2 refuerzos
Vista Superior	3987,5	4082.94	4044.08
Vista Lateral	3941,72	4016.78	3954.44
Vista Frontal	4052,4	4097.28	4044.63

Fuente: los autores

En la Gráfica 5 b) se observa que no hay ningún comportamiento en la VPU que nos indique alguna influencia debido a la presencia de barras de refuerzo en la probeta analizada, adicional a esto teniendo en cuenta las fallas mencionadas al inicio de este análisis y los valores obtenidos, se puede decir que el comportamiento presentado es similar al de la probeta sin refuerzo. Además, se confirma que cuando las mediciones de VPU se hacen en forma normal a las barras de refuerzo no se manifiesta la presencia de estas en la probeta.

En las Gráficas 5 c) y d) vista superior, se observa claramente el aumento de la VPU a medida que nos acercamos a la posición de las barras de refuerzo. En la Gráfica 5 d), se pueden apreciar tres picos de velocidad, los dos más altos corresponden a las medidas registradas sobre las barras de refuerzo, en las cuales el haz sonoro viaja en mayor proporción en el acero que en el concreto; el tercer pico corresponde a la medida tomada en el intermedio de las barras de

refuerzo y se observa que su valor es menor al presentado en los otros picos de VPU, pero mayor que los valores registrados en las cercanías de las barras de refuerzo; esto es debido a que el haz sonoro viaja parcialmente en las dos barras dando una mayor velocidad al viaje de la onda.

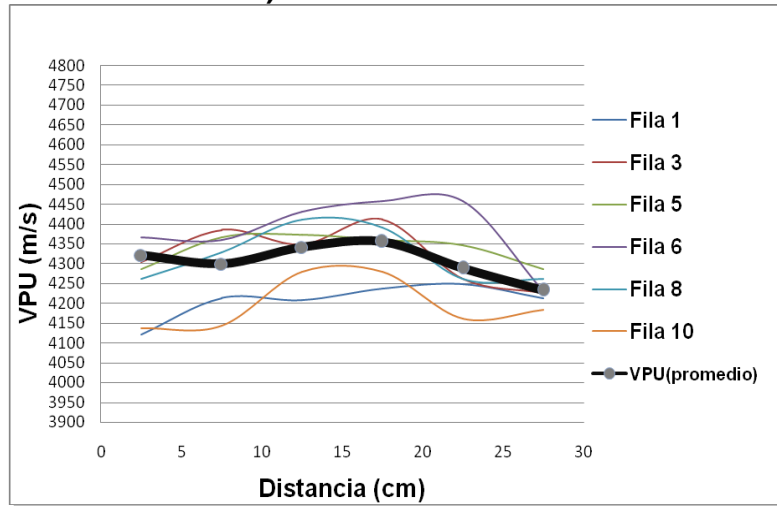
En la Gráfica 6 se muestra el comportamiento de VPU contra distancia para la probeta con tres barras de refuerzo, en ella se presentan los resultados obtenidos para las vistas frontal, lateral y superior.

Al hacer el barrido de la probeta con tres refuerzos por cada una de las filas y al observar las gráficas obtenidas con los respectivos valores logrados de (VPU), se puede ver en la Gráfica 6 a) vista frontal, un aumento en la VPU, comparando estos valores con los mostrados para la misma vista en las probetas con 0, 1 y 2 refuerzos (ver Tabla 20), este efecto es causado por la cantidad de refuerzos (tres) y por la distribución de éstos en la probeta, ya que las ondas que viajan en forma normal a las barras de refuerzo tienen más posibilidad de encontrarse en su recorrido con una mayor área de las barras de acero, y por esta razón se registra un incremento significativo en la VPU de la probeta.

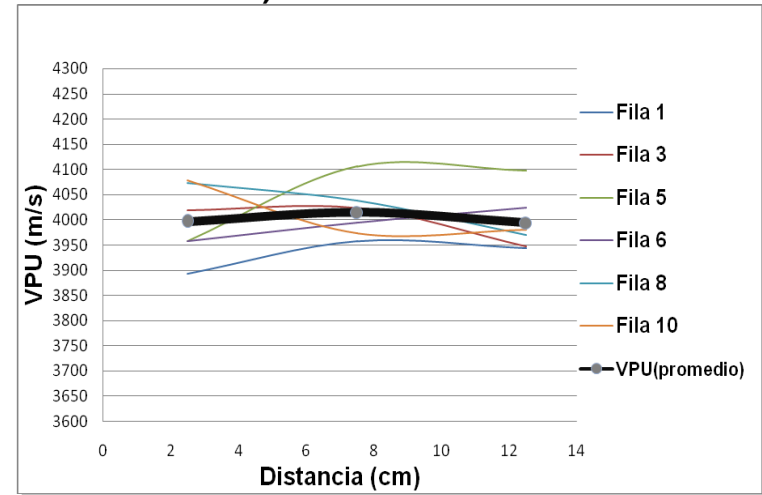
También se puede decir que haz ultrasónico no identifica la posición de las barras de refuerzo en la probeta, puesto que no se observa un aumento en la VPU cuando se registran datos en las inmediaciones a su posición que nos permitan suponer la presencia de éstas.

Gráfica 6. Comportamiento de la VPU para la probeta con tres barras de refuerzo

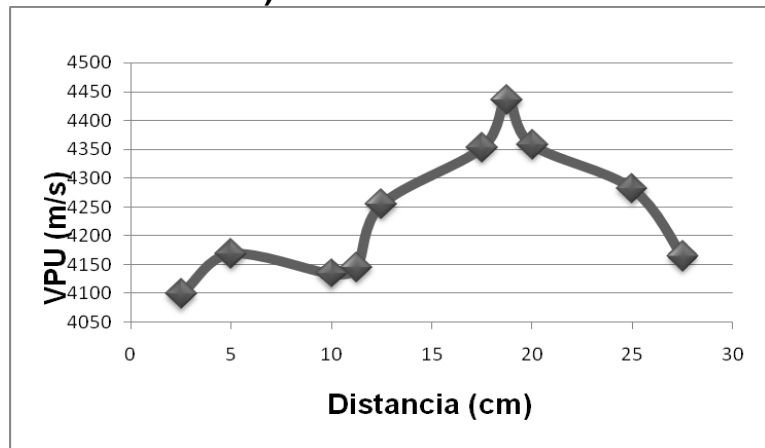
a) VISTA FRONTAL



b) VISTA LATERAL



c) VISTA SUPERIOR



d) VISTA SUPERIOR INCLUYENDO LECTURA SOBRE LAS BARRAS DE REFUERZO

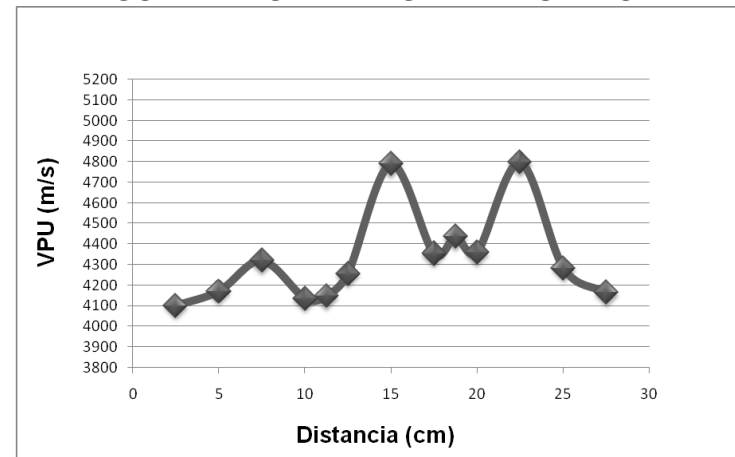


Tabla 20. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca, con uno, dos y tres refuerzos

	VPU PROMEDIO (m/s) 0 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 1 refuerzo	VPU PROMEDIO (m/s) 2 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 3 refuerzos
Vista superior	3987,5	4082.94	4044.08	4160.57
Vista Lateral	3941,72	4016.78	3954.44	4002
Vista Frontal	4052,4	4097.28	4044.63	4294.13

Fuente: los autores

En la Gráfica 6 b) vista lateral de la probeta de tres (3) refuerzos, a medida que se realiza el barrido y se registran los valores obtenidos, se observa en la mayoría de las curvas un leve aumento de la VPU, cuando el haz sonoro se acerca a la zona de ubicación de las barras de refuerzo. Este efecto se aprecia mas cuando se esta en la misma línea de las barras de refuerzo aproximadamente a una distancia entre 7 y 8 cm, cabe resaltar que las ondas sonoras viajan en forma normal a las barras de refuerzo y por esta razón su efecto es menor o poco relevante.

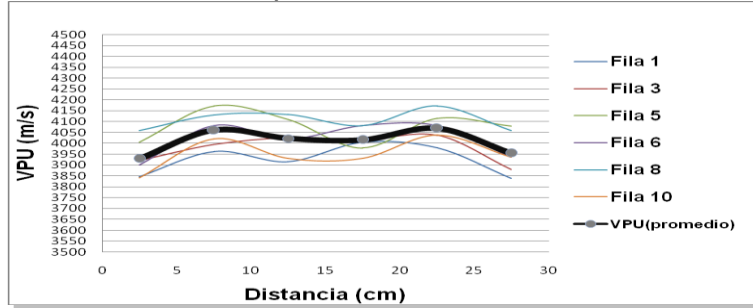
En la Gráfica 6 c) y d) vista superior, de la probeta de tres refuerzos (3), donde el haz sonoro viaja paralelo a las barras de refuerzo, se realizó el barrido por toda su superficie, encontrando que el efecto de la cercanía de los palpadores a las barras de refuerzo se muestra en un incremento significativo en la VPU como se puede observar claramente en las gráficas.

La Gráfica 6 d) precisa donde se encuentran ubicadas las barras de refuerzo ya que en estos picos se observan los mayores incrementos en la VPU, esto es, por que la onda que es longitudinal viaja en su gran mayoría a través de las barras de refuerzo; los otros picos que se observan tienen un incremento menor, estos se producen cuando la onda está viajando parcialmente entre el concreto y las barras de refuerzo.

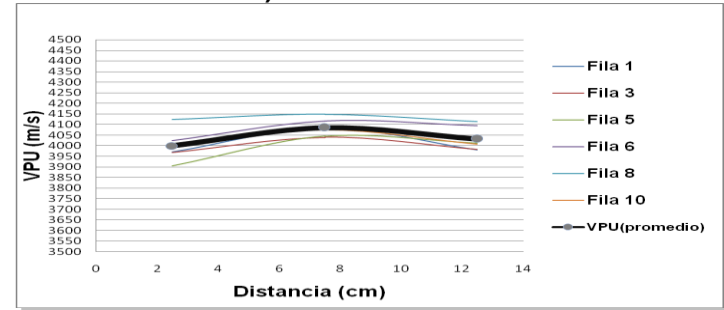
Como se aprecia en la parte inicial de la Gráfica 6 d) hay un pico que muestra la posición de una barra de refuerzo pero su valor es menor que los otros, esto se

Gráfica 7. Comportamiento de la VPU para la probeta con cuatro barras de refuerzo

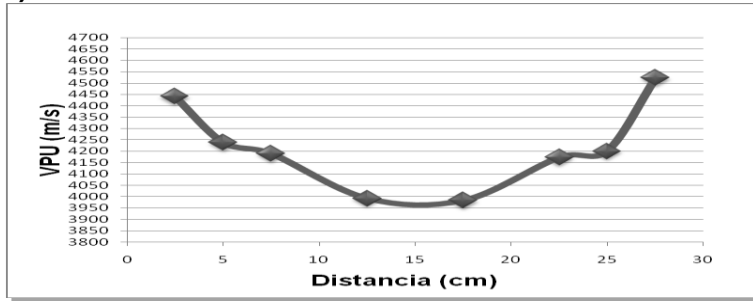
a) VISTA FRONTAL



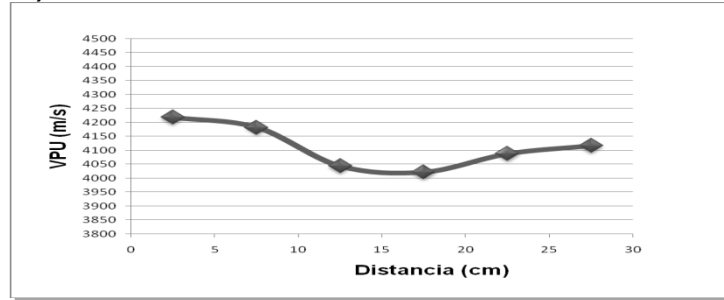
b) VISTA LATERAL



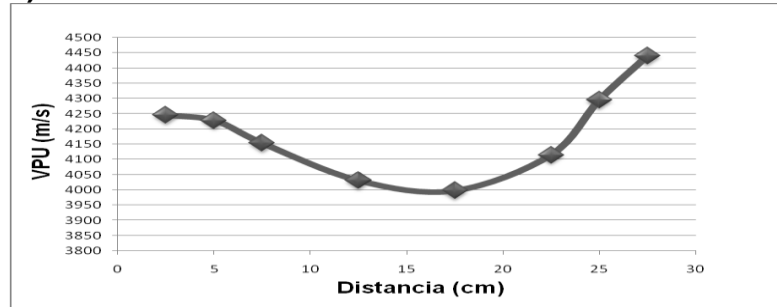
c) VISTA SUPERIOR SOBRE EL EJE DE LAS BARRA FILA 1



d) VISTA SUPERIOR CENTRO DE LA PROBETA-FILA 2



e) VISTA SUPERIOR SOBRE EL EJE DE LAS BARRAS-FILA 3



debe a que en esta parte donde se encontraba ubicada la barra de refuerzo no se logro obtener una superficie lisa, por lo anterior no se obtuvo un acople óptimo entre el palpador y la probeta; por esta razón los valores obtenidos para la VPU fueron más bajos.

En la Gráfica 7 se muestra el comportamiento de VPU contra distancia para la probeta con cuatro barras de refuerzo, en ella se presentan los resultados obtenidos para las vistas frontal, lateral y superior.

En la Gráfica 7 a) vista frontal, de la probeta con cuatro (4) barras de refuerzo la cual se asemeja a un caso real, presenta un comportamiento similar a la mayoría de las probetas analizadas (ver Tabla 21), el cual corresponde a un material heterogéneo sin que se ponga de manifiesto la presencia de las barras de refuerzo, esto ocurre debido a la ubicación en los extremos de dichas barras.

En la Gráfica 7 b) vista lateral de la probeta reforzada con cuatro (4) barras la onda viaja normal a ellas, se observa un comportamiento similar al seguido en la vista lateral en todas las probetas analizadas. La gráfica presenta un aumento evidente en el valor central, debido probablemente a una ligera influencia de los refuerzos ubicados en los extremos de la probeta, posiblemente por el viaje del haz sonoro parcialmente entre el concreto y el refuerzo. Todo lo anterior confirma la influencia de los refuerzos sobre la VPU cuando el haz sonoro viaja normal a ellos.

En las Gráficas 7 c), d) y e) vista superior de la probeta con cuatro (4) refuerzos, se muestran los comportamientos seguidos a través de cada una de las filas analizadas. En las Gráficas 7 c) y e) se aprecian valores mayores al inicio y al final de las curvas los cuales corresponden a la posición de las barras de refuerzo. En la Gráfica 7 e) se observa una diferencia mayor en los valores de VPU

obtenidos sobre los refuerzos, esto es debido a un desalineamiento de ± 1 cm en una de las barras de refuerzo sobre la cual se lee la menor VPU. En la Gráfica 7 d), los valores altos observados al inicio y al final de la curva son producidos por el efecto de las barras de refuerzo, por donde viaja el haz sonoro más rápidamente.

Las diferentes curvas de la vista superior no muestran un aumento cuando se registran los valores en el punto intermedio de los refuerzos, esto se debe posiblemente a que la distancia de separación entre los refuerzos es grande y la onda sonora no alcanza a ser afectada por éstos.

Tabla 21. VPU Comparación de valores promedio de VPU para las probetas blanca, con uno, dos, tres y cuatro refuerzos

	VPU PROMEDIO (m/s) 0 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 1 refuerzo	VPU PROMEDIO (m/s) 2 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 3 refuerzos	VPU PROMEDIO (m/s) 4 refuerzos
Vista superior	3987,5	4082.94	4044.08	4160.57	4126
Vista Lateral	3941,72	4016.78	3954.44	4002	4039.2
Vista Frontal	4052,4	4097.28	4044.63	4294.13	4008.4

Fuente: los autores

Una vez realizado el análisis a todas las probetas podemos observar que cuando la onda sonora viaja paralelamente al refuerzo (vista superior), se obtienen valores que muestran un claro efecto de la orientación y de la cercanía de los palpadores a las barras de refuerzo.

4.2.4. Comprobación estadística y verificación de los resultados. Estos estudios se hicieron con el fin de dar un soporte a los análisis realizados anteriormente.

4.2.4.1 Comprobación estadística. En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos a partir de un estudio estadístico realizado a cada una de las vistas de

las probetas analizadas, lo anterior permitió confirmar la influencia de las barras de refuerzo sobre la VPU.

En primer lugar se plantearon las hipótesis

$$H_0 = \mu_v \leq \mu_B$$

$$H_1 = \mu_v > \mu_B$$

H_0 : No hay diferencia entre las VPU de la probeta sin barra y las probetas con 1,2,3 y 4 refuerzos

H_1 : Hay diferencia entre las VPU de la probeta sin barra y las probetas con 1,2,3 y 4 refuerzos.

Posteriormente se seleccionó para este caso un nivel de significancia de 0.01, ya que se trabajo con valores promedio, estos permiten tener una curva de distribución normal.

Se escogió el método estadístico de prueba de hipótesis para dos muestras con dos medias y desviación estandar conocida.

$$\text{Ecuación } z = \frac{\bar{\chi}_v - \bar{\chi}_B}{\sqrt{\frac{\sigma_v^2}{n_v} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}}} \quad (9)$$

z = Valor del estadístico de prueba

$\bar{\chi}_v$ = Valor promedio de la probeta sin refuerzo

$\bar{\chi}_B$ = Valor promedio de las probetas con 1, 2, 3 y 4 refuerzos

σ_v = Desviación estándar para la probeta sin refuerzo

σ_B = Desviación estándar para las probetas con 1, 2, 3 y 4 refuerzos

n_v = Numero de datos por vista de la probeta sin refuerzo

n_B = Numero de datos por vista de la probeta con 1, 2, 3 y 4 refuerzos

Posteriormente se halló en valor crítico es cual fue de 2.33 para la curva de distribución normal.

Por último se calcularon los valores del estadístico de prueba.

4.2.4.2 Verificación de los resultados. A partir de las formulas y sus respectiva condición de aplicación encontradas en la bibliografía consultada (**2.3.2 a**)), se hizo una validación de los tiempos de vuelo para la vista superior en la probeta con una barra de refuerzo. Los calculos realizados se muestran en el anexo C y su respectiva comparación con los datos reales se indican en la Tabla 23.

Como se puede observar en el Anexo c, la formula funciona cuando la relación a/l es mayor a la condición dada, es decir cuando no hay influencia de la barra de refuerzo. También se aprecia que para este caso de estudio a medida que la relación a/l disminuye cumpliendo aun con la condición establecida para su uso, los tiempos de vuelo calculados difieren en un alto porcentaje de los reales, por lo anterior se puede decir que para éste estudio, la formula no cumple para todos los casos estudiados aunque se cumpla la condición para su aplicación.

Tabla 22. Comprobación estadística para la justificación de los resultados

Cantidad	Vista	z	Consecuencia
Probeta con un refuerzo	Lateral	2,98080011	Se rechaza H_0 , pero siendo el efecto de las barras muy leve
	Frontal	2,00981077	Se acepta H_0 , lo cual indica que no se presenta un incremento significativo en la VPU debido a las barras
	Superior	2,8334551	Se rechaza H_0 , pero siendo el efecto de las barras muy leve
Probeta con dos refuerzos	Lateral	0,40162863	Se acepta H_0 , teniendo en cuenta que este valor representa las fallas que tiene la probeta
	Frontal	-1,34115813	No se puede rechazar o aceptar H_0 ya que los datos reflejan las fallas de fabricación que tiene la probeta
	Superior	1,98848562	No se puede rechazar o aceptar H_0 ya que este valor representa las fallas que tiene la probeta
Probeta con tres refuerzos	Lateral	2,27494541	Se acepta H_0 , es decir no se presenta efecto o el efecto sobre la VPU es muy leve
	Frontal	11,4157891	Se rechaza H_0 , el efecto es significativo al aumentar la VPU
	Superior	6,00989127	Se rechaza H_0 , el efecto es significativo al aumentar la VPU
Probeta con cuatro refuerzos	Lateral	3,56120328	Se rechaza H_0 , el efecto es notorio
	Frontal	-2,95146528	Se acepta H_0 , no tiene efecto, las velocidades en 4 es menor que en blanco
	Superior	5,29973257	Se rechaza H_0 , el efecto es significativo al aumentar la VPU

Fuente: los autores

Tabla 23. Comparación del tiempo de vuelo real y teórico para la probeta con una barra de refuerzo

	TIEMPO DE VUELO REAL (μs)			TIEMPO DE VUELO TEÓRICO (μs)			% ERROR			Aceptación de la ecuación
Fila 1	127,1	126,35	125,55	125,8	123,5	124,1	1.03	2.3	1.16	Si
Fila 2	125,2	124,5	124,15	107	104,4	106,6	16.82	19.2	16.4	Bajo condiciones
Fila 3	120	117,05	118,75	94,92	86,65	94,74	26.42	35.0	25.3	No
Fila 4	118,85	119,3	119,8	86,65	86,65	94,77	37.16	37.6	26.4	No
Fila 5	124,95	125,45	124,75	107,2	104,7	106,8	16.55	19.8	16.8	Bajo condiciones
Fila 6	127,95	128,05	127,55	125,3	124,1	125	2.11	3.18	2.04	Si

Fuente: los autores

5. CONCLUSIONES

- Una vez desarrollada la metodología planteada para la elaboración de este trabajo de grado, analizados los resultados obtenidos para las probetas con relación agua/cemento de 0.5 y diferente número de barras de refuerzo, evaluadas después de 28 días de curado, se puede concluir:
- Cuando el haz sonoro viaja paralelo a la barra en la probeta de un refuerzo se presenta un aumento gradual en la VPU, a medida que la posición de los palpadores en la probeta va cambiando y se va acercando a la posición de la barra hasta llegar un máximo (aproximadamente un 21%); esto sucede porque al iniciar el barrido de las mediciones, el haz sonoro viaja solamente por el concreto, al acercarse a la barra, el haz sonoro viaja parcialmente en el concreto y parcialmente en el acero y por último cuando los palpadores están sobre el refuerzo la onda del haz sonoro viaja en mayor proporción o casi en su totalidad sobre la barra.
- Cuando el haz sonoro viaja paralelo al eje longitudinal a la barra pero el número de refuerzos cambia (2 y 3) se aprecia un comportamiento similar de aumento gradual a medida que la lectura se aproxima a las barras de refuerzo. Además de lo anterior se evidencia entre las barras un efecto combinado sobre la VPU por la cercanía de las barras vecinas. Este mismo efecto no se aprecia para la probeta con cuatro barras de refuerzo, debido a la separación (en este caso es mayor) entre las barras.
- Cuando la VPU es medida en forma perpendicular al eje longitudinal de la barra no se presenta efecto significativo sobre ésta en la probeta de una barra de refuerzo. El mismo efecto se aprecia cuando los palpadores están ubicados a diferentes distancias de el refuerzo 0.075 m cara frontal y 0.15 m

cara lateral. Lo anterior es debido al poco espesor de la barra de refuerzo (1/2") el cual la hace poco perceptible para la onda sonora.

- Al realizar la toma de datos en la probeta con tres (3) barras de refuerzo, se aprecia un aumento en los valores de VPU, cuando las ondas del haz sonoro viajan perpendicularmente al refuerzo y la distribución de las barras se hace a lo largo de la cara frontal (longitud de recorrido 0.15 m), se considera que la distribución de los refuerzos en la probeta permite que cualquier onda de haz sonoro que viaje en ella los pueda encontrar y por esta razón aumenta su velocidad. También se aprecia que al igual que en las probetas con 1,2 y 4 refuerzos las ondas sonoras no identifican la ubicación de las barras de refuerzo en éstas.
- La toma de datos se realizó a partir del método de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) por transmisión directa, donde las ondas sonoras se propagan en dirección longitudinal y transversal al refuerzo. Cuando la propagación de la onda es paralela a la longitud del refuerzo es donde se evidencia más el efecto sobre la VPU, pues ésta onda viaja tanto en el concreto como en el acero, mostrando así un efecto mayor que el producido por las ondas sonoras viajan en forma perpendicular a la barra de refuerzo.
- En el desarrollo de la presente investigación se pudo comprobar que La VPU es afectada también por diferentes factores como: presencia de superficies irregulares, fallas en el proceso de fabricación (falta de compactación, desviación de las barras de refuerzo, presencia de defectos, etc). El efecto que causa los anteriores se aprecia principalmente en la probeta con dos barras de refuerzo, en la cual el aumento de la VPU originada por la presencia de las barras de refuerzo es minimizado por las fallas en la compactación ocurridas en el proceso de fabricación.

- De acuerdo a los ensayos realizados en las diferentes probetas con barras de refuerzo 1, 2, 3 y 4 respectivamente, el efecto sobre la VPU se observa mejor en la probeta con tres (3) barras de refuerzo, en la cual se obtuvo mayores valores de VPU, este aumento es debido a la distribución uniforme de las barras de refuerzo.

6. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación se derivan las siguientes recomendaciones:

- Continuar con el estudio del efecto sobre la VPU de concreto reforzado, incluyendo mayor número de refuerzos y otras distribuciones de éstos, con el fin de enriquecer este estudio.
- Desarrollar proyectos en los cuales se puedan relacionar los ensayos destructivos (resistencia a la compresión) con los no destructivos (velocidad de pulso ultrasónico) para el concreto reforzado y de esta forma dar una mayor aplicación a la técnica de VPU en la valoración de estructuras compuestas.
- Implementar en otras investigaciones el uso del método de transmisión indirecto o superficial, el cual permite hacer evaluaciones en cualquier situación en la que se encuentran las estructuras en una situación real; ya que solo se necesita acceso a esta por una de sus superficies para hacer el estudio.
- Se debe tener especial cuidado en el proceso de fabricación de las probetas, principalmente en la compactación del concreto; para de esta forma obtener especímenes con una mayor uniformidad los cuales permitan evaluar con más certeza el efecto de las barras de refuerzo.
- Hacer una buena preparación de las superficies de las probetas para la toma de datos, puesto que superficies irregulares o rugosas no permiten un

buen acople entre los palpadores y el material a evaluar; lo anterior origina una obtención defectuosa de los datos a analizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM C597-02.USA, 2003.
- [2] _____. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM C33-01. Philadelphia, USA, 2001.
- [3] _____. *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM C150-07. Philadelphia, USA, 2007.
- [4] _____. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM C597-02. USA , 2002.
- [5] HANDBOOK NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. *The Ultrasonic Pulse Velocity Method*. Chapter 8.
- [6] ULTRASONIDO. <Disponible en: es.wikipedia.org/wiki/Ultrasonido Visitado en agosto del 2009.
- [7] HORMIGÓN. <Disponible en: [//icc.ucv.cl/hormigon/index.htm](http://icc.ucv.cl/hormigon/index.htm) Visitado en agosto del 2009.
- [8] EQUIPO ULTRASONIDO-ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL HORMIGON. <Disponible en icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.doc Visitado en agosto del 2009.
- [9] ULTRASONIDO <Disponible en: www.fundalanavial.gob.ve/equipo20.htm Visitado en septiembre del 2009.
- [10] EL ULTRASONIDO Y SU APLICACIÓN. <Disponible en: revistas.concytec.gob.pe/pdf/id/v8n1/a05v8n1.pdf Visitado en octubre del 2009
- [11] ENSAYOS NO DESTUCTIVOS, FUNDAMENTOS. <Disponible en: www.dimf.upct.es/personal/JB_A/END%20fundamentos.pdf Visitado en octubre del 2009
- [12] INDUSTRIAL APPLICATIONS AND CHEMISTRY SECTION INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*. Vienna, 2002

- [13] LA HISTORIA DEL CEMENTO, EL CONCRETO Y EL CONCRETO REFORZADO. Instituto del Cemento, 2008
- [14] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos)*. NTC 77. 1994.
- [15] _____. *Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje del material que pasa tamiz*. NTC 78. 1995.
- [16] _____. *Especificaciones de los agregados de hormigón*. NTC 174. 2000.
- [17] _____. *Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso*. NTC 176. 1995.
- [18] _____. *Hormigón y sus agregados*. NTC 385. 1999.
- [19] _____. *Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra*. NTC 550. 2000.
- [20] _____. *Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado*. NTC 92. 1995.
- [21] _____. *Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino*. NTC 237. 1995.
- [22] _____. *Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto*. NTC 4325. 2004.
- [23] _____. *Elaboración y curado de muestras en el laboratorio*. NTC 1377. 1995
- [24] _____. *Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas*. NTC 121. 1995
- [25] _____. *Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas*. NTC 321. 1995
- [26]. Pucinotti Raffaele, Hinterholz Loana, D'Elia Alessandro, De Lorenzo Rita A. Hellenic society for NDT. INFLUENCE OF STEEL REINFORCEMENT ON ULTRASONIC PULSES VELOCITY 11-14 october 2007, Chania, Crete-Greece.
- [27] Malhotra V.M. y Carino Nicholas, HANBOOK ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE, Cap 8: "The Ultrasonic Pulse Velocity". CRC Press, Boca Raton USA.

- [28] Yiching Lin, Shih-Fang Kuo, Chiamen Hsiao, and Chao-Peng Lai. INVESTIGATION OF PULSE VELOCITY- STRENGTH RELATIONSHIP OF HARDENED COCNCRETE. ACI MATERIALS JOURNAL, JULY – AUGUST 2007, PAG. 344-350.
- [29] Eulogio Santos de la Cruz, Nestor Cancino Vere, Julio Venque Dedios y otros. EL ULTRASONIDO Y SU APLICACIÓN. INDUSTRIA DATA, Revista de investigación. Enero-Julio 2005, pag. 25-28.
- [30] International atomic energy agency, GUIDEBOOK ON NON-DESTRUCTIVE TESTING OF COCNCRETE STRUCTURES. Vienna, 2002. Capitulo 11, pag. 100-128.
- [31] Hiroshi Irie, Yasukatsu Yoshida, Yousuke Sakurada†, and Takao Ito, NON-DESTRUCTIVE-TESTING METHODS FOR CONCRETE STRUCTURES. 2008.
- [32] CNS Farnell, ULTRASONIC PULSE VELOCITY TESTING TECHNICAL REFERENCE MANUAL August 2008.
- [33] Wonsiri Punurai, NON-DESTRUCTIVE TESTS OF IN-SITU MATERIALS – STRENGTH INDICES. Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Mahidol University, 2008.
- [34] Martino, CONCRETO REFORZADO 30 Julio 2008 pag. 1-5.
- [35] Ing. Luís armando Díaz Infante de la Mora, ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO, CIMBRAS PARA CONCRETO, CÁUCULO, CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS EN CONCRETO PREEESFORZADO. Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM).
- [36] JH. BUNDEY, SG. MILLARD. TESTING OF CONCRETE IN STRUCTURES. Capitulo 3: “Ultrasonic pulse velocity methods”. 1996.
- [37] Lind – Marchal – Wathen. ESTADÍSTICA APLICADA A LOS NEGOCIOS Y LA ECONOMÍA. Capitulo 11: “Pruebas de hipótesis de dos muestras”. Decimotercera edición.

ANEXOS

Anexo A. Calculos del diseño de mezcla realizada para una relacion de agua-cemento (a/c) de 0.5.

- Tamaño máximo de agregado = $\frac{3}{4}$ "=19mm
- Agua = 200 Kg (según tabla)
- Relación agua/cemento A/C=0.5
- Resistencia a la compresión=275 Kg/cm² = 3911 Psi
- Contenido de cemento (determinado a continuación).

$$C = \frac{\text{agua}}{A/C} = \frac{200}{0.5} = 400 \text{ Kg}$$

- Estimación del contenido agregado grueso

$$b = \frac{b}{b_o} * b_a$$

$$\frac{b}{b_o} = 0.61$$

$$b = 0.61 \frac{m^3 \text{ agregado grueso}}{1m^3 \text{ concreto}} * 1576 \frac{Kg. \text{ agregado grueso}}{m^3 \text{ agregado grueso}} = 960 Kg. \text{ agregado grueso}$$

Determinación de los volúmenes de cada uno de los componentes de la mezcla.

- Agua = 200L
- Cemento = $\frac{400}{3.03} = 132.01L$
- Agregado grueso = $\frac{960}{2.69} = 356.88 \approx 357 L$

- Agregado fino = $1000 - (200L + 132L + 357L) = 311L$
- Peso agregado fino = $311L * 2.67 = 830.37 \text{ Kg}$

Datos en peso para una probeta de 0.15x0.30x0.50m de concreto

- Agua = $200 \text{ Kg} * 0.0225 = 4.5 \text{ Kg}$
- Cemento = $400 \text{ Kg} * 0.0225 = 9 \text{ Kg}$
- Agregado grueso = $960 \text{ Kg} * 0.0225 = 21.6 \text{ Kg}$
- Agregado fino = $830.37 \text{ Kg} * 0.0225 = 18.68 \text{ Kg}$

Anexo B. Pruebas Preliminares Para La Escogencia De Los Parámetros De Trabajo.

Tabla 24. VPU para distancias de 0.15 y 0.50 m, frecuencia de 54 KHz, variando el voltaje de operación.

Probeta blanca	Longitud 0.15 m			Longitud 0.50 m			
	Voltaje(V)	250	500	1200	250	500	1200
1	Velocidad(m/s)	4010	4098	4166	3863	3971	4029
2		4043	4120	4178	3897	3974	4012
3		4076	4143	4201	3863	4012	4045

Fuente: los autores

Tabla 25. VPU para distancias de 0.15 y 0.50 m, frecuencia de 24 KHz, variando el voltaje de operación.

Probeta blanca	longitud 0.15 m			Longitud 0.50 m			
	Voltaje(V)	250	500	1200	250	500	1200
1	Velocidad(m/s)	3870	3778,5	3685	2655,5	2616	2584,5
2		3694	3836	3727,5	2631,5	2635	2648,5
3		3667	3802	3644,5	3154	3144	3134,5

Fuente: los autores

Tabla 26. VPU para distancias de 0.15 y 0.50 m, frecuencia de 150 KHz, variando el voltaje de operación.

Probeta blanca	longitud 0.15 m			Longitud 0.50 m			
	Voltaje(V)	250	500	1200	250	500	1200
1	Velocidad(m/s)	3999,5	3967,5	4010	3963	3938,5	3974,5
2		3962,5	3947	3999,5	4004,5	3974	3966
3		3989	4032	4087	4040	3990	4017

Fuente: los autores

Tabla 27. VPU con probetas de dimensiones 0.07x0.15 m con un voltaje de operación de 250 V

Relación agua/cemento A/C	VPU (m/s)		
0,35	3733	3645	3753
0,45	3645	3684	3562
0,5	3357	3482	3517

Fuente: los autores

Tabla 28. VPU con probetas de dimensiones 0.07x0.15 m con un voltaje de operación de 500 V

Relación agua/cemento A/C	VPU (m/s)		
0,35	4223	4232	4257
0,45	4110	4166	4193
0,5	4043	4054	4043

Fuente: los autores

Anexo C. Correlación de tiempos de transito para pulsos longitudinales o paralelos al refuerzo para la probeta de un refuerzo (vista superior).

$$T = \frac{l}{v_s} + 2a \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{v_s^2 * v_c^2}}$$

Condición de uso cuando no hay ninguna influencia del refuerzo.

$$\frac{a}{l} > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_s^2 - v_c^2}{v_s^2 v_c^2}}$$

$T =$ tiempo de transito

$l =$ longitud del especimen

$a =$ distancia entre palpador y barrillasw refuerzo

$v_s =$ velocidad de pulso ultrasonico del acero

$v_c =$ velocidad de pulso ultrasonico de el concreto

1.1

Donde $a = 0.10332$ m

$L = 0.5$ m

$V_s = 5769,88$ m/s

$V_c = 3922,5$ m/s

$a/l = 0.206 > 9.348 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,10332) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3922,5^2}{5769,88^2 * 3922,5^2}}$$

$$T = 1,258 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 125.8 \mu\text{s}$$

1.2

$a = 0,1$ m

$L = 0,5$ m

$V_s = 5769,88$ m/s

$$V_c=3950,5 \text{ m/s}$$

$a/l=0.2 > 9.22 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,1) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3950,5^2}{5769,88^2 * 3950,5^2}}$$

$$T = 1,235 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 123.5 \mu\text{s}$$

1.3

Donde $a = 0.10332 \text{ m}$

$L = 0.5 \text{ m}$

$V_s=5769,88 \text{ m/s}$

$V_c=3984 \text{ m/s}$

$a/l = 0.206 > 9.07 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,10332) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3984^2}{5769,88^2 * 3984^2}}$$

$$T = 1,241 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 124.1 \mu\text{s}$$

2.1

$a=0,0559\text{m}$

$L=0,5 \text{ m}$

$V_s=5769,88 \text{ m/s}$

$V_c=3986,5 \text{ m/s}$

$a/l=0.118 > 9.06 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,0559) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3986,5^2}{5769,88^2 * 3986,5^2}}$$

$$T = 1,069 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 107 \mu\text{s}$$

2.2

$a=0,05\text{m}$

$L=0,5 \text{ m}$

$V_s=5769,88 \text{ m/s}$

$$V_c=4028,5 \text{ m/s}$$

$a/l= 0.1 > 8.88 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,05) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4028,5^2}{5769,88^2 * 4028,5^2}}$$

$$T = 1,044 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 104.4 \mu\text{s}$$

2,3

$$a=0,0559$$

$$L=0,5 \text{ m}$$

$$V_s=5769,88 \text{ m/s}$$

$$V_c=4017,5 \text{ m/s}$$

$a/l= 0.1118 > 8.93 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,0559) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4017,5^2}{5769,88^2 * 4017,5^2}}$$

$$T = 1,066 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 106.6 \mu\text{s}$$

3.1

$$a=0,025 \text{ m}$$

$$L=0,5 \text{ m}$$

$$V_s=5769,88 \text{ m/s}$$

$$V_c=4175 \text{ m/s}$$

$a/l= 0.05 > 8.29 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,025) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4175^2}{5769,88^2 * 4175^2}}$$

$$T = 9,492 \times 10^{-5} \text{ s} \approx 94.92 \mu\text{s}$$

3.2

$a=0$

$L=0,5$ m

$V_s=5769,88$ m/s

$V_c=4244$ m/s

No se cumple la condición, es decir hay influencia de la barra de refuerzo

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4244^2}{5769,88^2 * 4244^2}}$$
$$T = 8.66510^{-5} s \approx 86.65 \mu s$$

3.3

$a=0,025$ m

$L=0,5$ m

$V_s=5769,88$ m/s

$V_c=4219$ m/s

$a/l=0.05 > 8.08 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,025) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4219^2}{5769,88^2 * 4219^2}}$$
$$T = 9,474 \times 10^{-5} s \approx 94.74 \mu s$$

4.1

$a=0,025$ m

$L=0,5$ m

$V_s=5769,88$ m/s

$V_c=4189$ m/s

$a/l=0.05 > 8.20 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,025) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4189^2}{5769,88^2 * 4189^2}}$$
$$T = 8,665 \times 10^{-5} s \approx 86.65 \mu s$$

4.2

$a=0$ m

$L=0,5$ m

$V_s=5769,88$ m/s

$V_c=4220,5$ m/s

No se cumple la condición, es decir hay influencia de la barra de refuerzo

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4220,5^2}{5769,88^2 * 4220,5^2}}$$
$$T = 8.66510^{-5} s \approx 86.65 \mu s$$

4.3

$a=0,025$ m

$L=0,5$ m

$V_s=5769,88$ m/s

$V_c=4211,5$ m/s

$a/l=0.05 > 8.11 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,025) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 4211,5^2}{5769,88^2 * 4211,5^2}}$$
$$T = 9,477 \times 10^{-5} s \approx 94.77 \mu s$$

5.1

$a=0,0559$ m

$L=0,5$ m

$V_s=5769,88$ m/s

$V_c=3950,5$ m/s

$a/l= 0.1118 > 9.22 \times 10^{-5}$ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,0559) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3950,5^2}{5769,88^2 * 3950,5^2}}$$

$$T = 1,072 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 107.2 \mu\text{s}$$

5.2

a=0,05m

L=0,5 m

V_s=5769,88 m/s

V_c=3991,5 m/s

a/l= 0.1 > 9.05 x10⁻⁵ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,05) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3991,5^2}{5769,88^2 * 3991,5^2}}$$

$$T = 1,047 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 104.7 \mu\text{s}$$

5.3

a=0,0559

L=0,5 m

V_s=5769,88 m/s

V_c=3991,5 m/s

a/l= 0.1118 > 9.05 x10⁻⁵ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,0559) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3991,5^2}{5769,88^2 * 3991,5^2}}$$

$$T = 1,068 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 106.8 \mu\text{s}$$

6.1

a = 0.10332 m

L= 0.5 m

V_s=5769,88 m/s

V_c=3919,5 m/s

a/l=0.206 > 9.36 x10⁻⁵ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,10332) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3919,5^2}{5769,88^2 * 3919,5^2}}$$

$$T = 1,253 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 125.3 \mu\text{s}$$

6.2

a=0,1 m

L=0,5 m

V_s=5769,88 m/s

V_c=3916,5 m/s

a/l=0.2 > 9.37 x10⁻⁵ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,1) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3916,5^2}{5769,88^2 * 3916,5^2}}$$

$$T = 1,241 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 124.1 \mu\text{s}$$

6.3

a = 0.10332 m

L= 0.5 m

V_s=5769,88 m/s

V_c=3927 m/s

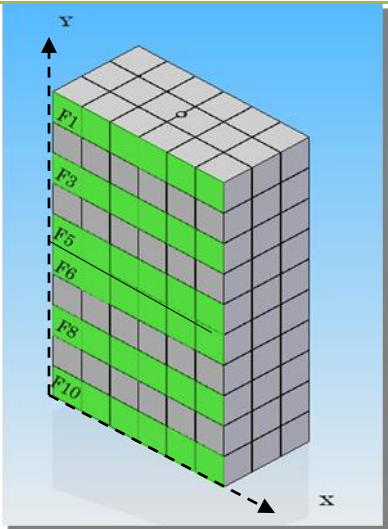
a/l= 0.206 > 9.33 x10⁻⁵ se cumple la condición

$$T = \frac{0,5}{5769,88} + 2(0,10332) \sqrt{\frac{5769,88^2 - 3927^2}{5769,88^2 * 3927^2}}$$

$$T = 1,25 \times 10^{-4} \text{ s} \approx 125 \mu\text{s}$$

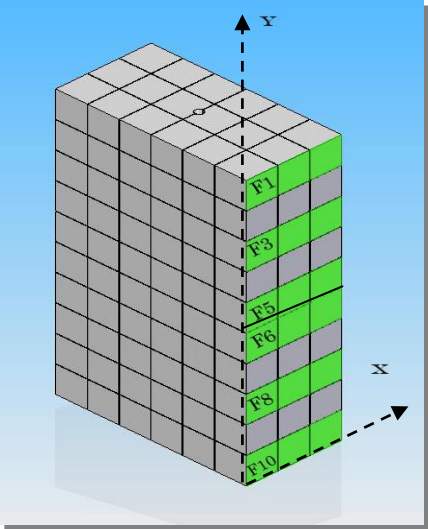
Anexo D. Resultados de las mediciones sobre concreto reforzado

Tabla 29. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m.

Vista frontal probeta # 2	Número de barras de refuerzo: 1						
	Voltaje 500 V						
	Palpador 54 KHz						
	Longitud de recorrido de la VPU: 0.15 m						
Fila 1	VPU	4026,5	4155	4076	4005	4054	3936,5
	TIEMPO	37,25	36,2	36,8	37,5	37,05	38
Fila 3	VPU	4081,5	4160,5	4059,5	4137,5	4103,5	4103,5
	TIEMPO	36,65	36,05	37	36,35	36,6	36,5
Fila 5	VPU	4070,5	4070,5	4114,5	4126	4172	4048,5
	TIEMPO	36,8	36,85	36,65	36,45	36	36,9
Fila 6	VPU	4109	4114,5	4137,5	4098	4160,5	4109
	TIEMPO	36,5	36,35	36,15	36,6	36,05	36,5
Fila 8	VPU	4098	4103,5	4087	4126	4172	4109
	TIEMPO	36,6	36,55	36,45	36,35	35,8	36,45
Fila 10	VPU	4059,5	4109	4081,5	4143,5	4070,5	4109
	TIEMPO	36,8	36,85	36,65	36,45	36	36,9

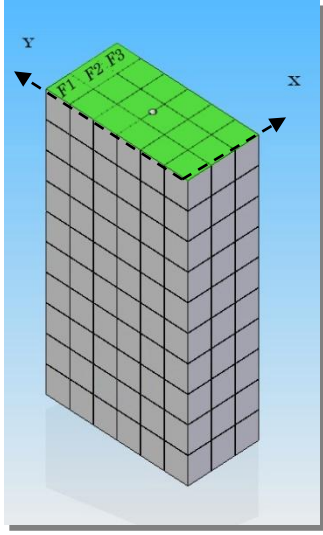
Fuente: los autores

Tabla 30. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.

Vista lateral probeta # 2		Numero de barras de refuerzo: 1		
		Voltaje 500 V		
		Palpador 54 KHz		
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.30 m		
				
Fila	VPU	3918,5	3913,5	3973
1	TIEMPO	76,5	76,75	75,6
Fila	VPU	3954,5	4005	4067,5
3	TIEMPO	75,65	74,75	73,85
Fila	VPU	4007,5	4005	4067,5
5	TIEMPO	74,95	74,75	73,75
Fila	VPU	3936,5	3970,5	4084
6	TIEMPO	76,5	75,45	73,4
Fila	VPU	4056,5	4069	4067,5
8	TIEMPO	74,05	74,2	73,5
Fila	VPU	4066	4048	4092,5
10	TIEMPO	74,5	74	73,45

Fuente: los autores

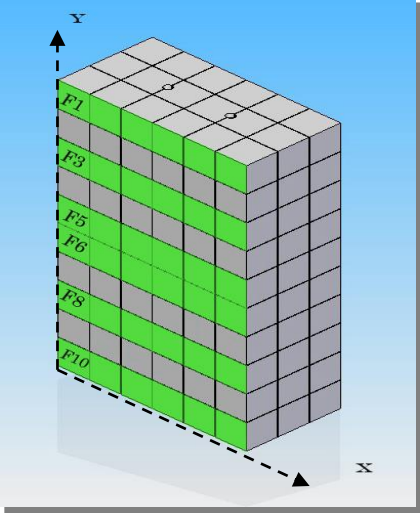
Tabla 31. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m

Vista superior probeta # 2	Numero de barras de refuerzo: 1			
	Voltaje 500 V			
	Palpador 54 KHz			
	Longitud de recorrido de la VPU: 0.5 m			
		Fila 1	Fila 2	Fila 3
	VPU	3922,5	3950,5	3984
	TIEMPO	127,1	126,35	125,55
	VPU	3986,5	4028,5	4017,5
	TIEMPO	125,2	124,5	124,15
Antes	VPU	4175	4244	4219
Barra	TIEMPO	120	117,05	118,75
Barra	VPU	4237	4823	4254
	TIEMPO	117.3	105.1	118.1
Después	VPU	4189	4220,5	4211,5
Barra	TIEMPO	118,85	119,3	119,8
	VPU	3950,5	3991,5	3991,5
	TIEMPO	124,95	125,45	124,75
	VPU	3919,5	3916,5	3927
	TIEMPO	127,95	128,05	127,55

Fuente: los autores

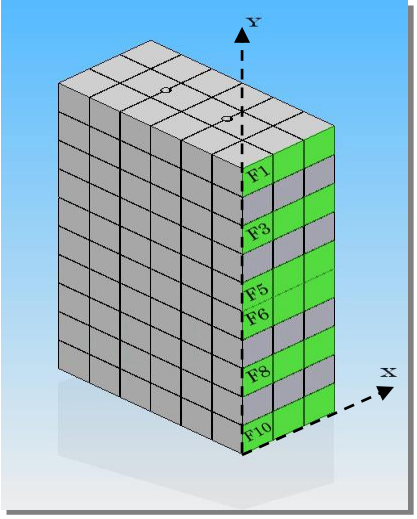
Probeta con 2 refuerzo

Tabla 32. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m.

Vista frontal probeta # 3		Numero de barras de refuerzo: 2					
		Voltaje 500 V					
		Palpador 54 KHz					
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.15 m					
Fila 1	VPU	4048,5	4048	4087	3994	3962,5	3952
	TIEMPO	37	36,95	36,65	37,7	37,75	38
Fila 3	VPU	3983,5	4015,5	3978,5	3999,5	3947	3957
	TIEMPO	37,65	37,5	37,65	37,4	37,95	37,95
Fila 5	VPU	4005	4076	4120,5	4115,5	4103,5	4160,5
	TIEMPO	37,55	36,7	36,35	36,4	36,55	36,05
Fila 6	VPU	4081,5	4139	4081,5	4048,5	4065	4087
	TIEMPO	36,75	36,2	36,7	37,05	36,8	36,65
Fila 8	VPU	4015,5	4137,5	4114,5	4126	4103,5	4076
	TIEMPO	37,35	36,25	36,5	36,35	36,55	36,8
Fila 10	VPU	3989	4037,5	4032	4076	3931,5	3911
	TIEMPO	37,65	37,1	37,2	36,8	38,1	38,3

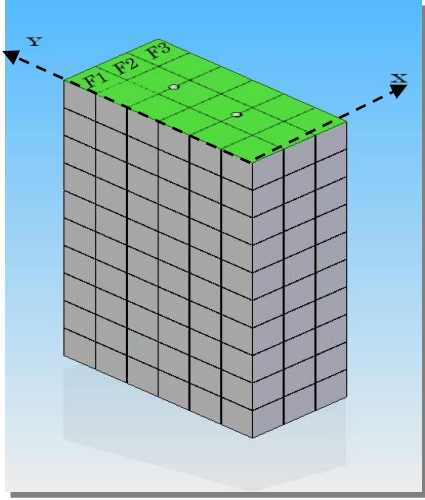
Fuente: los autores

Tabla 33. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.

Vista lateral probeta # 3		Numero de barras de refuerzo: 2		
		Voltaje 500 V		
		Palpador 54 KHz		
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.30 m		
Fila 1	VPU	4034,5	4013	3992
	TIEMPO	74,2	74,75	75,3
Fila 3	VPU	3898	3923,5	3724
	TIEMPO	77,1	76,45	80,5
Fila 5	VPU	3939,5	3918,5	3887,5
	TIEMPO	76,15	76,55	77,25
Fila 6	VPU	3918,5	3871	3823,5
	TIEMPO	76,5	77,45	78,25
Fila 8	VPU	4104	4029	4007,5
	TIEMPO	73,15	74,4	74,85
Fila 10	VPU	4002,5	4051	4042,5
	TIEMPO	74,95	73,95	74,05

Fuente: los autores

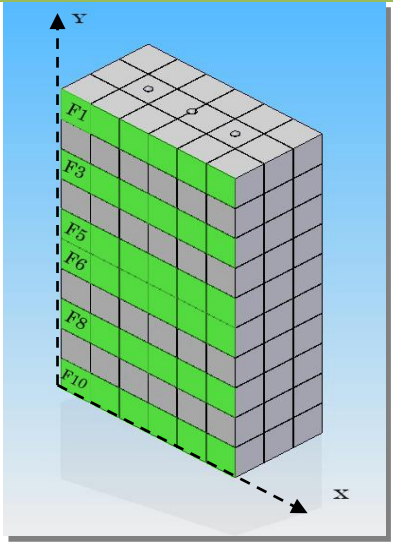
Tabla 34. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m

Vista superior probeta # 3	Numero de barras de refuerzo: 2				
	Voltaje 500 V				
	Palpador 54 KHz				
	Longitud de recorrido de la VPU: 0.5 m				
			Fila 1	Fila 2	Fila 3
	VPU	3890,5	3940,5	3944,5	
	TIEMPO	129,05	126,05	126,85	
Antes Barra 1	VPU	4114,5	4135,5	4126,5	
	TIEMPO	121,3	119,95	120,35	
Barra 1	VPU		4322		
	TIEMPO		115,5		
Después Barra 1	VPU	4089,5	4170	4075	
	TIEMPO	122,1	119,25	122,5	
Centro	VPU		4260		
	TIEMPO		117,3		
Antes Barra 2	VPU	4006	4137	4050	
	TIEMPO	123,7	120	123	
Barra 2	VPU		4311		
	TIEMPO		115,6		
Después Barra 2	VPU	4073	4161	4079,5	
	TIEMPO	122,7	119,9	122,45	
	VPU	3902,5	3987,5	3910,5	
	TIEMPO	128,65	125,6	128,25	

Fuente: los autores

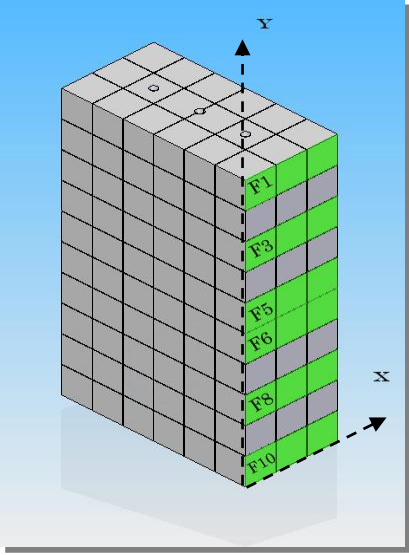
Probeta con 3 refuerzos

Tabla 35. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m

Vista frontal probeta # 4		Numero de barras de refuerzo: 3					
		Voltaje 500 V					
		Palpador 54 KHz					
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.15 m					
							
Fila 1	VPU	4120	4213	4207	4237,5	4249	4213
	TIEMPO	36,4	35,55	35,65	35,45	35,3	35,6
Fila 3	VPU	4303,5	4385	4347,5	4411	4261	4225
	TIEMPO	34,75	34,2	34,45	34	35,2	35,55
Fila 5	VPU	4285	4366,5	4372,5	4360	4347	4285
	TIEMPO	35,05	34,35	34,25	34,4	34,5	35
Fila 6	VPU	4366,5	4360	4430,5	4457,5	4457,5	4231
	TIEMPO	34,25	34,4	33,85	33,65	33,65	35,45
Fila 8	VPU	4261	4328,5	4411	4391,5	4261	4261
	TIEMPO	35,2	34,65	34	34,15	35,25	35,25
Fila 10	VPU	4137,5	4143,5	4279	4279	4160,5	4183,5
	TIEMPO	36,3	36,25	35	35,0	36,25	36,05

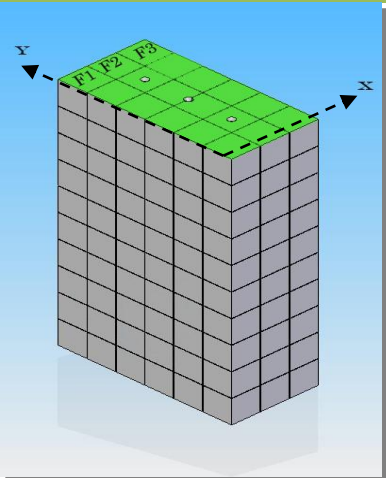
Fuente: los autores

Tabla 36. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.

Vista lateral probeta # 4		Numero de barras de refuerzo: 3			
		Voltaje 500 V			
		Palpador 54 KHz			
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.30 m			
Fila 1	VPU	3893	3957,5	3944,5	
	TIEMPO	77,05	76,05	76,05	
Fila 3	VPU	4018,5	4023,5	3947	
	TIEMPO	74,6	74,45	76,05	
Fila 5	VPU	3957,5	4106	4098	
	TIEMPO	75,7	73	73,15	
Fila 6	VPU	3957,5	3994,5	4024	
	TIEMPO	75,65	75,1	74,35	
Fila 8	VPU	4073	4037,5	3970,5	
	TIEMPO	73,65	74,55	75,4	
Fila 10	VPU	4078,5	3973,5	3981	
	TIEMPO	73,6	75,5	75,35	

Fuente: los autores

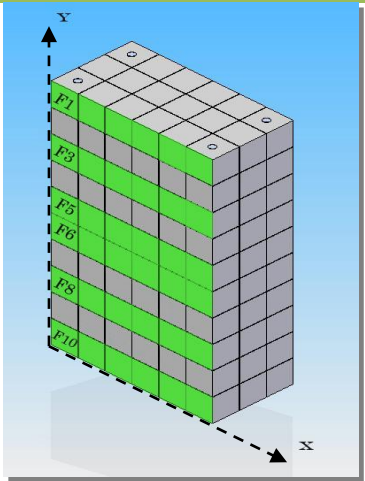
Tabla 37. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m

Vista superior probeta # 4		Numero de barras de refuerzo: 3		
		Voltaje 500 V		
		Palpador 54 KHz		
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.5 m		
				
		Fila 1	Fila 2	Fila 3
	VPU	3956.5	4099.5	4025.5
	TIEMPO	126,45	122,05	123,65
Antes varilla1	VPU		4169.5	
	TIEMPO		119.5	
Varilla 1	VPU	4173.5	4319.5	4192
	TIEMPO	119.45	115.35	118.95
Después varilla 1	VPU		4135	
	TIEMPO		120.6	
Centro Varilla 1 y 2	VPU		4145,5	
	TIEMPO		120.6	
Antes varilla 2	VPU	4091	4255	4187.5
	TIEMPO	121,7	117.8	119,35
Varilla 2	VPU		4788.5	
	TIEMPO		103.8	
Después Varilla 2	VPU	4050	4353	4125
	TIEMPO	123.4	114,85	121,15
	VPU		4436	
	TIEMPO		112.5	
Antes varilla 3	VPU		4358.5	
	TIEMPO		114.15	
Varilla 3	VPU	4136.5	4796.5	4159.5
	TIEMPO	120.8	103.95	119.9
Después varilla 3	VPU		4282.5	
	TIEMPO		116.8	
	VPU	4023.5	4164,5	4014
	TIEMPO	123,85	120,05	124,05

Fuente: los autores

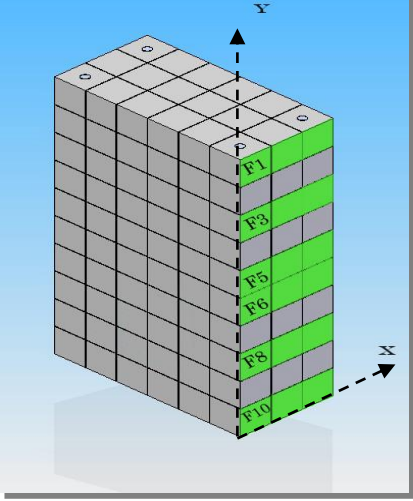
Probeta con 4 refuerzos

Tabla 38. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto reforzado para una distancia de 0.15 m

Vista frontal probeta # 5		Numero de barras de refuerzo: 4					
		Voltaje 500 V					
		Palpador 54 KHz					
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.15 m					
Fila	VPU	3845,5	3962,5	3916	4005	3978,5	3836
1	TIEMPO	38,95	37,75	38,25	37,45	37,7	39,15
Fila	VPU	3921	3994,5	4026,5	4015,5	4037,5	3881
3	TIEMPO	37,35	35,95	36,55	37,65	36,4	36,7
Fila	VPU	4005	4172	4109	3978,5	4114,5	4076
5	TIEMPO						
Fila	VPU	3901	4081,5	4021	4081,5	4081,5	3936,5
6	TIEMPO	38,4	36,7	37,25	36,7	36,75	38,1
Fila	VPU	4059,5	4130	4132	4081,5	4172	4059,5
8	TIEMPO	36,95	36,1	36,3	36,75	35,95	36,95
Fila	VPU	3841	4021	3931,5	3931,5	4037,5	3936,5
10	TIEMPO	39,05	37,3	38,15	38,25	37	38,15

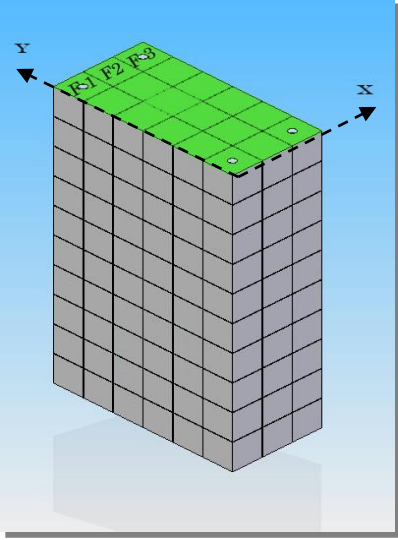
Fuente: los autores

Tabla 39. Determinación de la VPU (m/s) y el tiempo de vuelo (μ s) de el concreto reforzado para una distancia de 0.30 m.

Vista lateral probeta # 5		Numero de barras de refuerzo: 4		
		Voltaje 500 V		
		Palpador 54 KHz		
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.30 m		
Fila 1	VPU	3970,5	4084	3981
	TIEMPO	75,45	73,45	75,25
Fila 3	VPU	3968	4040	3983,5
	TIEMPO	75,65	74,25	75,45
Fila 5	VPU	3906	4045	4013
	TIEMPO	76,85	74,2	74,5
Fila 6	VPU	4023,5	4117,5	4095
	TIEMPO	74,55	72,85	73,3
Fila 8	VPU	4123	4149	4114,5
	TIEMPO	72,7	72,3	73,05
Fila 10	VPU	4008	4076	4008
	TIEMPO	74,85	73,6	74,95

Fuente: los autores

Tabla 40. Determinación de la VPU (m/s) y tiempo de vuelo (μs) de el concreto reforzado para una distancia de 0.50 m

Vista superior probeta # 5		Numero de barras de refuerzo: 4		
		Voltaje 500 V		
		Palpador 54 KHz		
		Longitud de recorrido de la VPU: 0.5 m		
		Fila 1	Fila 2	Fila 3
Barras	VPU	4442	4218,5	4246
	TIEMPO	111,75	118,65	118,05
Después Barras	VPU	4238,5		4228
	TIEMPO	117,9		118,1
	VPU	4189	4182	4154
	TIEMPO	119,9	119,7	120,1
	VPU	3992	4043,5	4031,5
	TIEMPO	125,35	123,7	123,85
	VPU	3983,5	4022	3998
	TIEMPO	125,5	124,7	124,9
	VPU	4173,5	4088	4115
	TIEMPO	120,1	122	121,9
Antes Barras	VPU	4199,5		4295
	TIEMPO	119,2		116,45
Barras	VPU	4523.5	4116,5	4440
	TIEMPO	111.2	121,4	112.75

Fuente: los autores