

**EFFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO DE LA
PRESENCIA DE DAÑO EN CONCRETO SIN REFUERZO**

**JUAN GUILLERMO TORRES MARTÍNEZ
EDILSON SEGUNDO PÉREZ MADERA**

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

2011

**EFFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO DE LA
PRESENCIA DE DAÑO EN CONCRETO SIN REFUERZO**

**JUAN GUILLERMO TORRES MARTÍNEZ
EDILSON SEGUNDO PÉREZ MADERA**

Trabajo de grado realizado para optar el título de ingeniero metalúrgico

Director:

Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Codirectora:

M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz

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

2011

A Dios y a la Virgencita por mantenerme con bien y llevarme por el buen camino a lo largo de la carrera y sobre todo por darme la capacidad y fuerza para este trabajo.

A mi madre que siempre ha estado allí para mí en las buenas y en las malas apoyándome en todo.

A mi padre que nunca le faltó un consejo justo cuando más lo necesitaba y me ayudó a superarme.

A mis hermanos, Yule y Edier por estar conmigo y siempre ofrecerme una sonrisa cuando más me hacía falta.

A mi abuela Erlinda, por todo el apoyo que me brindó y por confiar en mí todos estos años.

A una mujer que se ha ganado mi corazón y mi respeto, me ha apoyado, comprendido, entendido y me ha sabido demostrar su cariño. ¡Veí gracias por estar conmigo en esta etapa de mi vida.

A Eli, a Gise y a Karen (K), amigas que me han ayudado, brindado su confianza y siempre han estado allí para mí.

A mi gran amigo poncho, que desde jóvenes quisimos superarnos y hoy en día somos profesionales.

A mi compañero de proyecto, Juan Guillermo Torres por su compromiso.

A la profe Luz Amparo Quintero, por ayudarme a culminar mis estudios superiores de la mejor manera.

A todos mis amigos que conocí a lo largo de la carrera y siempre compartimos buenos y malos momentos a todos gracias... (Ya saben quiénes son no los puedo nombrar uno por uno no caben)

Y a mis compañeros de la U esto es para ustedes también gracias por todo.

Edilson Segundo Pérez Madera.

Quiero darle las gracias a Dios por darme fortaleza, entendimiento y sabiduría para salir a delante, sin su ayuda nada de esto sería posible.

A mi madre hermosa Sara Lucía Martínez por su amor incondicional y sus sabios consejos que siempre me ayudaron en los momentos cuando mas lo necesitaba, dándome fuerza para salir a delante y obtener este título.

A mi padre Miguel Ángel Torres por apoyarme en esta etapa de mi vida y confiar en mis capacidades.

A mis hermanos Germán Emilio, Lilitiana Patricia por ser ejemplo de humildad y perseverancia

A mi hermano Miguel Ángel por vivir parte de mi carrera junto a él, siendo mi respaldo, mi amigo y ese apoyo incondicional en todo momento.

A mi tío Hernando Torres por su nobleza y sus valores y ser ese ejemplo a seguir

A mi tía Lourdes por brindarme todo su apoyo, confianza y sus oraciones para que todo saliera bien

A mis tíos Camilo torres, Rosario torres y armando Saucedo

A mis amigos, compañeros de Universidad y personas que estuvieron a mi lado que me brindaron su cariño, amistad y confianza, con los cuales viví momentos tristes y felices durante este largo camino universitario

Juan Guillermo Torres Martínez

AGRADECIMIENTOS

A la universidad Industrial de Santander por acogernos y haber sido el sitio de nuestra formación como profesionales

A nuestro director de proyecto Ph.D Ricardo Cruz por habernos permitido trabajar en este proyecto de investigación, por su colaboración y apoyo.

A nuestra codirectora de proyecto Ms.C Luz Amparo Quintero, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por brindarnos la confianza necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A la escuela de ingeniería metalúrgica a sus profesores y técnicos por habernos colaborado en las dificultades que se presentaron en toda nuestra vida universitaria

A la escuela de ingeniería civil, por proporcionarnos sus instalaciones y los materiales empleados en esta investigación. A sus técnicos por su colaboración prestada.

Por ultimo a nuestras familias por la confianza y paciencia entregada a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

GLOSARIO

Agregado: es toda aquella partícula de mineral, relativamente inerte que ocupa el mayor volumen de la mezcla de concreto.

Agregado fino: el agregado fino consistirá de arena natural, arena manufacturada o combinación de ambas, que pasa el tamiz N°4 (4.75mm) y es predominante retenido en el tamiz N°200 (0.075mm). La arena manufacturada consistirá en polvo de piedra en su condición natural o lavado que se ajusta a los requisitos de calidad especificadas.

Agregado grueso: el agregado grueso consistirá de grava, de piedra o grava quebrada o una mezcla de los materiales anteriores, este agregado es retenido en su totalidad en el tamiz N°4 (4.75mm).

Análisis granulométrico: etapa en la cual se separa una masa de agregado en fracciones de igual tamaño a través de una serie de tamices cuyas características se ajustan según la norma.

Concreto: es la mezcla de un material aglutinante (cemento), agua y aditivos si se prefiere, que al endurecer forman un todo compacto y después de un tiempo desarrolla grandes propiedades mecánicas.

Daño: cambio en la estructura que causa deterioro y baja el rendimiento de la estructura trayendo consigo bajo desempeño del material (concreto).

Durabilidad del concreto: se define como la resistencia que presenta el concreto a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro.

Granulometría: procedimiento mediante el cual se establece las proporciones de las partículas de los diversos tamaños que componen el agregado fino o grueso.

Grietas: una grieta es una abertura larga y estrecha producto de la separación de dos materiales. En Geología se pueden distinguir dos tipos comunes de grietas: las grietas de contracción y las grietas en cuña.

Relación agua-cemento: relación entre las masas de agua (excluyendo el agua absorbida por los agregados) y de cemento en una mezcla de hormigón.

Resistencia a la compresión: se puede definir como la máxima resistencia medida en un espécimen de concreto. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado.

Tamaño máximo de agregado: es el tamaño de partícula más grande que hay dentro de las masas de agregado, el cual debe ser compatible con las dimensiones de la estructura.

Aditivos: ingredientes del concreto, además del cemento portland, del agua y de los agregados, que se integran a la dosificación inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo para obtener o dar alguna característica especial al concreto hidráulico (impermeabilizantes, acelerantes, retardantes, fluidizantes, inclusiones de aire, estabilizadores, endurecedores, etc.).

Aglomérate: 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.

Aglutinante: es un material que ayuda a unir partículas pequeñas y formar partículas mas grandes.

Cimentación: Parte de la estructura cuya misión es transmitir las cargas de la edificación al suelo.

Clinker: es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento. Caliza cocida.

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.

Gel: nombre con el que se le denomina al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento.

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

Modulo de finura: diámetro promedio de las partículas que hay en el material.

Mortero: mezcla de cemento con arena y agua.

Segregación: separación del concreto en sus componentes (áridos, cemento, agua)

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

CONTENIDO

INTRODUCCION	22
1.PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.2. JUSTIFICACIÓN	25
1.3. ESTADO DEL ARTE	25
1.4 OBJETIVOS	27
1.4.1objetivo General	27
1.4.2 Objetivos Específicos	27
2. FUNDAMENTOS TEORICOS	28
2.1. GENERALIDADES DEL CONCRETO	28
2.1.1. Cemento	29
2.1.2. Agua	30
2.1.3. Agregados	31
2.1.4. Proceso de fabricación del concreto	32
2.1.4.1. Caracterización de la materia prima	32
2.1.2.2. Diseño de mezcla	33
2.1.2.3. Fraguado	33
2.1.2.4. Curado	33
2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	34
2.2.1. Factores que afectan la resistencia a la compresión	37
2.3. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	39
2.3.1 Factores que afectan la velocidad de pulso ultrasónico	41

3. METODOLOGÍA	45
3.1. RECOLECCIÓN Y REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	46
3.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	46
3.2.1. Caracterización de la materia prima.	46
3.2.2. Diseño de la Mezcla.	48
3.2.3. Elaboración de las Probetas.	48
3.2.4. Fraguado y Curado.	50
3.2.5. Secado.	50
3.3. CAPACITACIÓN PARA EL MANEJO DE LOS EQUIPOS	51
3.4. ENSAYOS PRELIMINARES	52
3.4.1. Inspección visual	52
3.4.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico	52
3.5. ENSAYOS DESPUES DE LA APLICACIÓN DE LA CARGA al 50% Y 100% DE SU RESISTENCIA DE DISEÑO.	55
3.5.1. Ensayo de compresión	56
3.5.2. Inspección visual.	57
3.5.3. Velocidad de pulso ultrasónico	57
3.6. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	58
3.6.1. Evaluación de la matriz	58
3.6.2. Caracterización de las grietas	59
3.7. Análisis de resultados.	60
3.8. Preparación del reporte final.	60
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
4.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	61
4.1.1. Caracterización de la materia prima.	61

4.1.2. Diseño de mezcla.	62
4.2. ENSAYOS PRELIMINARES	63
4.2.1. Inspección visual.	63
4.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	64
4.3. ENSAYOS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LA CARGA DE 50% Y 100% DE SU RESISTENCIA DE DISEÑO.	68
4.3.1. Resistencia a la compresión	69
4.3.2. Inspección visual	71
4.3.3. Velocidad de pulso ultrasónico	72
4.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	79
4.4.1. Inspección de la matriz de concreto para comprobar el comportamiento ante la carga aplicada	79
4.4.2. Caracterización de las grietas	81
5. CONCLUSIONES	85
6. RECOMENDACIONES	87
7. BIBLIOGRAFÍA	88
8. ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Proceso de fabricación del cemento	30
Figura 2. Desarrollo de fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.	35
Figura 3 Curva esfuerzo-deformación para compresión, con ilustración de los tramos elástico y plástico.	36
Figura 4. Tipos de medición de velocidad de pulso ultrasónico	41
Figura 5. Lectura paralela a la aplicación de carga.	43
Figura 6. Lectura perpendicular a la aplicación de carga.	43
Figura 7. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación.	45
Figura 8. Análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	47
Figura 9. Formaleta utilizada en la elaboración de las probetas	49
Figura 10. Proceso de elaboración de las probetas	51
Figura 11. Equipo de ultrasonido	53
Figura 12. Cuadrícula empleada para la medición de pulso en probetas.	53
Figura 13. Filas correspondientes de cada cara de las probetas	54
Figura 14. Maquina de compresión	56
Figura 15. Ensayo de pulso ultrasónico	58
Figura 16 .Estimación de la profundidad de la grieta. Grieta perpendicular a la superficie del concreto	59
Figura 17. Estimación de una grieta inclinada a la superficie del concreto	60
Figura 18. Porosidades	64
Figura 19 Probeta al 50% de la carga aplicada	71
Figura 20. Probetas al 100% de la carga aplicada	72
Figura 21. Inspección para una probeta al 50% de carga aplicada	79
Figura 22. Inspección para una probeta al 100% de carga aplicada.	80
Figura 23. Caracterización de las grietas	82

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfica 1. Velocidad de pulso promedio de todas las caras de las probetas antes de la aplicación de la carga.	68
Gráfica 2. Velocidad de pulso ultrasónico promedio a probetas después de la aplicación de la carga al 50% de su resistencia de diseño	74
Gráfica 3. Velocidad de pulso ultrasónico perpendicular a la dirección de la carga	75
Gráfica 4. Velocidad de pulso ultrasónico paralela a la dirección de la carga	77
Gráfica 5. Inclinación de la grieta.	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de los agregados	31
Tabla 2. Clasificación de los concretos según su resistencia	37
Tabla 3 Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman	39
Tabla 4. Parámetros utilizados en el equipo de ultrasonido	55
Tabla 5. Caracterización de los agregados fino y grueso	61
Tabla 6. Análisis granulométrico del agregado fino	62
Tabla 7. Dosificación de la mezcla de concreto.	63
Tabla 8 Resultado de velocidad de pulso ultrasónico en la cara A de la probeta 1.	65
Tabla 9. Resultado de velocidad de pulso ultrasónico en la cara A de la probeta 2.	66
Tabla 10. Velocidad de pulso promedio de las filas de cada cara de las probetas antes de la aplicación de la carga.	67
Tabla 11. Probetas al 50% de la carga aplicada.	70
Tabla 12. Probetas al 100% de la carga aplicada.	70
Tabla 13. Velocidad de pulso promedio de las filas de cada cara de las probetas después de la aplicación de la carga al 50% de su resistencia de diseño.	73
Tabla 14. Medida de profundidad de la grieta	83
Tabla 15. Medida de la inclinación de la grieta	84

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Pasos para el diseño de mezcla.	92
ANEXO B. Gráficas correspondientes de las caras de cada probeta antes de la aplicación de la carga.	100
ANEXO C. Tablas y gráficas de velocidad de pulso ultrasónico a probetas después de la aplicación de la carga al 50% de su resistencia de diseño.	104
ANEXO D. Tablas de velocidad de pulso ultrasónico a probetas después de la aplicación de la carga al 100% de su resistencia de diseño.	108

RESUMEN

TÍTULO: EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO DE LA PRESENCIA DE DAÑO EN CONCRETO SIN REFUERZO.*

AUTORES: TORRES MARTINEZJUAN GUILLERMO, PEREZ MADERAEDILSON SEGUNDO.**

PALABRAS CLAVES: velocidad de pulso ultrasónico, concreto, resistencia a la compresión, daño, grietas.

RESUMEN:

La velocidad de pulso ultrasónico a lo largo de los últimos años se ha convertido en una de las técnicas no destructivas más empleadas para la inspección del concreto, arrojando resultados altamente confiables. En la presente investigación se evaluó el efecto de la velocidad de pulso ultrasónico con la presencia de daño en un concreto sin refuerzo. Para esto se fabricaron 10 probetas cúbicas de dimensiones 20x20x20 centímetros, hechas para una relación agua/cemento de 0,5; todas de después del fraguado fueron llevadas a la piscina en el mismo laboratorio para el curado que llevo 28 días, luego se dejaron expuestas a temperatura ambiente para el secado por 15 días. A cada una de ellas se le tomó medida de pulso ultrasónico y posteriormente a cuatro de ellas se les aplicó una carga del 50% de su resistencia de diseño y a otras cuatro se les aplicó una carga de 100%. Una vez aplicada la carga se le tomo nuevamente lectura de pulso ultrasónico, y de acuerdo al daño producido por el ensayo de compresión y la ubicación del daño, en este caso la grieta, el tiempo de vuelo de la onda varió considerablemente notándose los cambios en la velocidad de pulso.

Luego por medio del método indirecto se midió el tiempo de transito a través de grietas inducidas de forma perpendicular y oblicua a dos probetas patrones respectivamente, para dos posiciones de los transductores en la superficie, esto con el fin de conocer la profundidad y el grado de inclinación de la grieta.

Con el fin de conocer y corroborar el daño presente en la matriz de la probeta, se realizaron cortes paralelos a la aplicación de la carga, y por medio de la inspección visual se determinaron las discontinuidades presentes.

* Trabajo de Grado

** Facultad de fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Director. Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirectora. M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz

ABSTRACT

TITLE: EFFECT ON THE VELOCITY OF ULTRASONIC PULSE OF THE PRESENCE OF DAMAGE IN CONCRETE WITHOUT REINFORCEMENT.*

AUTHORS: TORRES MARTINEZJUAN GUILLERMO, PEREZ MADERAEDILSON SEGUNDO.**

KEY WORDS: concrete, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, damage, cracks.

ABSTRACT:

Over recent years Ultrasonic pulse velocity has become in one of the most used Non-destructive techniques for concrete inspection, giving highly reliable results. In the present research the effect of ultrasonic pulse velocity in the presence of damage in an unreinforced concrete was evaluated. For this, 10 cubic specimens were fabricated with dimensions of 20x20x20 centimeters. They were made using a water / cement ratio of 0.5. After setting, all the specimens were taken into the curing pool at the same laboratory for a 28-day curing period, and then they were left at room temperature for 15 days drying. Ultrasonic pulse velocity was measured on each specimen and then four of them were given a 50% charge of its design strength and four others were given an extra 100%. Once the load was applied, ultrasonic pulse velocity was taken again, and according to the damage caused by the compression test and location of damage, in this case the crack, flight time of the wave being varied considerably noticing the changes in ultrasonic pulse velocity.

Then using the indirect method were measured the transit time inducing perpendicular and oblique cracks to two test patterns, respectively, for two positions of the transducers on the surface, in order to know the depth and extent of inclination of the crack.

To know and verify the damage present in the matrix of the specimen, parallel cuts were made to the application of the load, and through visual inspection were identified the discontinuities present.

* Research Work.

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering. Director: Ph.D. Ricardo Cruz. Codirector: Msc. Luz Amparo Quintero

INTRODUCCIÓN

El concreto se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado a nivel mundial, en razón a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener; sus propiedades físicas y mecánicas para ser usado como elemento estructural; además de su economía; razones que lo hacen muy competente frente a construcciones de madera, mampostería o acero [22].

Ha sido de interés el estudio de sus propiedades tanto físicas como mecánicas para ampliar su campo de aplicación y la prevención de sus posibles fallas, por ser un material de bajo costo.

Uno de los factores que influye en el comportamiento de las propiedades mecánicas es la presencia de grietas, las cuales dependen principalmente, de la forma y tamaño. Además intervienen en su durabilidad, afectando su resistencia a la compresión, permitiendo que la vida útil del material se vea disminuida considerablemente [12].

El desarrollo de la industria de la construcción ha conllevado a buscar métodos más efectivos y económicos de inspección, que permiten un control rápido y confiable, entre estos se encuentra el ultrasonido, el cual evalúa las estructuras sin afectarlas. Por medio de este se puede estimar la resistencia mecánica tanto in situ como en el laboratorio. La técnica ultrasónica de mayor aplicación es la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) la cual se basa en la medición del tiempo de vuelo del haz sonoro, pudiéndose relacionar con la resistencia a la compresión del concreto [38] [12].

Es así, que este trabajo pretende establecer a través de la velocidad de pulso ultrasónico como ensayo no destructivo la determinación de daño presente en un concreto sin refuerzo. La metodología utilizada se presenta en el capítulo 3, los resultados obtenidos con base en esta metodología en el capítulo 4 y las conclusiones se presentan en el capítulo 5.

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

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

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto (hormigón), al igual que otros materiales de construcción, se contrae y se expande con los cambios de humedad y temperatura, y se deforma dependiendo de la carga y de las condiciones de apoyo presentándose daño (por ejemplo grietas) cuando no se han tomado las medidas necesarias en el diseño y la construcción para soportar dichos movimientos [8] [33].

En casos importantes, la presencia de grietas en concreto genera un gran debilitamiento en la estructura trayendo consigo consecuencias relevantes hasta el punto de llegar a cambiarla; para ello es importante determinar la localización y desarrollo de la grieta, ofreciendo alternativas viables para tomar las medidas preventivas adecuadas [10].

Es necesario tratar de hacer el menor daño posible a la estructura para la detección de las grietas; basándose en esto se emplea como medida prioritaria la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) que nos ofrece un control rápido y confiable de la estructura.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Para la determinación de daño presente en concreto se realizan diversas pruebas destructivas como es el caso de la extracción de núcleos, la cual brinda la información necesaria de la estructura pero ocasiona debilitamiento y una disminución en la vida útil. Por lo tanto es necesario el uso de métodos no destructivos que permiten evaluar sin causar daño a la estructura analizada.

Dentro de los ensayos no destructivos empleados en la evaluación de daño está el ultrasonido y dentro de este la técnica de velocidad de pulso ultrasónico VPU.

El tipo de daño más común son las grietas y las fisuras en las estructuras; teniendo como recurso la VPU se pueden detectar sin riesgo de que la estructura reciba algún esfuerzo extra que le pueda causar más daño o propagar dichas grietas.

1.3. ESTADO DEL ARTE

Varios estudios se han realizado para el desarrollo del concreto, sobre su composición, propiedades químicas y físicas. Unas de las principales razones a evaluar en una estructura de concreto es el proceso de agrietamiento debido a los diferentes factores como cargas, aumento y disminución de la temperatura entre otras. En los últimos años el interés de los investigadores sobre el control, simulación y caracterización de grietas presentes en estructura de concreto, han llevado a realizar diversos materiales de trabajos relacionados con este tema de importancia.

Algunos de los resultados obtenidos en trabajos realizados se presentan a continuación:

En 1996 Edel Mohamed Fathy [1] en su tesis de doctorado en la Universidad politécnica de Madrid, realizó estudios sobre la inyección de resina epoxi y el método general que describe el flujo de la resina en las grietas y aperturas producidas por la presión de la inyección, esto con el fin de prevenir los desastres que se pueden presentar en las grandes estructuras como las presas y macizos rocosos.

El 2006 [2] en la Universidad de Judea y Samaria (Israel), se realizó ensayos no destructivos para la inspección de estructuras de hormigón defectuosa sometidas a cargas de impacto, los cuales muestran las diferentes grietas y defectos en la estructura.

Los resultados del análisis muestra la eficacia de los ensayos no destructivos para la evaluación y detección de daño estructural.

El 22 junio 2004 [14] el departamento de ciencia de materiales, de la Universidad Politécnica de Madrid E.T.S.I. presentó en su artículo los datos experimentales que sirven para verificar los modelos teóricos de la fractura de hormigón; en particular el efecto de la fuerza agregada, las rutas de fractura y las propiedades de deformación, los cuales pueden predecir el aumento de fragilidad de un elemento estructural.

En el 2005 [9] en la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander se realizaron estudios acerca de la metodología de la evaluación en patología estructural de los concretos existentes, haciendo una análisis de la metodología de edificaciones existentes, destacando sus virtudes y defectos por cuestiones de aplicabilidad y relación entre ellas. Esto con el fin de identificar las causas y efectos que se puede presentar en una estructura de concreto.

En el 2008 [15] el Departamento de Ingeniería Civil, del Centro Universitario Ariel de Samaria, Ariel 44837 Israel, realizó un trabajo de investigación, donde se

presentan los resultados de pruebas de ultrasonidos en muestra de hormigón. El estudio se centró en las pruebas no destructivas de ultrasonido con transductores de frecuencias diferentes 100, 200 y 300KHz respectivamente, en especímenes cúbicos de hormigón los cuales fueron examinados antes de inducirle daños creados por medio de compresión. Los resultados de las pruebas obtenidas por cada cubo de hormigón, tanto en condiciones dañadas y en buen estado, fueron comparados y se demostró que las muestras analizadas con frecuencia de 100KHz mostraban mayor sensibilidad a los defectos en comparación con las de 200 y 300kHz. Estos hallazgos son muy útiles para entender el comportamiento de los daños en secciones de hormigón evaluados a partir de ultrasonido [6].

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 objetivo General

- Evaluar el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la presencia de daño en concreto sin refuerzo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la velocidad de pulso ultrasónico en especímenes de concreto después de aplicación de carga al 0%, al 50% y al 100% de su resistencia de diseño.
- Evaluar el efecto de la dirección de la aplicación de la carga sobre la velocidad de pulso ultrasónico en los especímenes de concreto sin refuerzo, a partir de lecturas en direcciones paralelas y transversales a la de la aplicación de la carga.
- Establecer la relación entre las variables estudiadas.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS

En este capítulo se tratan las generalidades del concreto, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, aspectos importantes para el desarrollo de la investigación.

2.1. GENERALIDADES DEL CONCRETO

En general el concreto puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y aditivos, que al endurecerse forman un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [8].

El principal componente del concreto es el cemento portland, que ocupa entre el 7% y el 15% del volumen de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y cohesión que prevee la buena resistencia a la compresión. El cemento portland es producido por el hombre y proviene de la calcinación de rocas calizas y arcillas. El segundo componente son los agregados, ocupan entre el 59% y el 76% del volumen de la masa. Estos últimos son esencialmente materiales inertes, naturales o artificiales de forma granular, que por conveniencia han sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). En general proviene de las rocas naturales, pero también existen agregados artificiales. El tercer componente, el agua ocupa entre el 14% y el 18% del volumen de la mezcla e hidrata al cemento portland [22] [8] [33].

Adicionalmente, el concreto también contiene alguna cantidad de aire atrapado entre el 1% y el 3% del volumen de la mezcla y puede contener aire incluido

intencionalmente entre el 1% y el 7% del volumen de la mezcla lo cual se logra con el uso de aditivos o con cementos que tengan agentes inclusores de aire [10].

Finalmente con alguna frecuencia se añaden aditivos a la mezcla con el objeto de modificar las propiedades del concreto tales como acelerar, retardar, mejorar la trabajabilidad, reducir requerimientos de agua, incrementar resistencia o alterar otras propiedades [8].

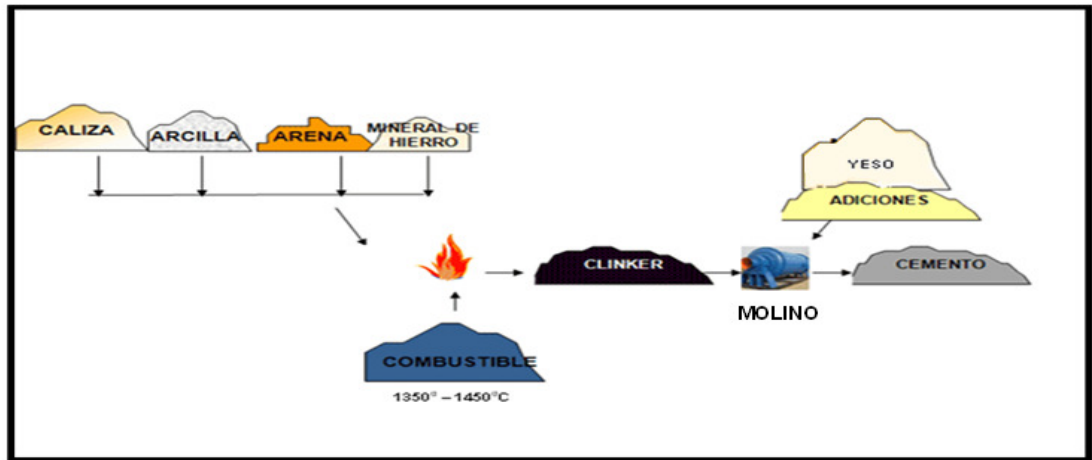
El proporcionamiento de la mezcla de concreto o diseño de estas, es un proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agua, agregados y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir, tanto económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad del volumen y apariencia adecuada [33] [10].

Estas proporciones dependen de las propiedades y características de los ingredientes usados, de las propiedades particulares del concreto especificado, y de las propiedades particulares del concreto especificado y de las condiciones particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado [33] [10] [8].

2.1.1. Cemento

Producto de la pulverización de materiales calcinados, es el componente aglomerante de propiedades adhesivas y cohesivas que le permiten unir fragmentos minerales entre sí para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad. En la figura 1 se puede ver el proceso de fabricación del cemento.

Figura 1. Proceso de fabricación del cemento



Fuente : Autores

El cemento portland se forma a partir de la producción de clinker. Al calcinar arcilla y caliza a una temperatura comprendida entre 1350° y 1450 °C, se obtiene este material considerado la materia prima para producir el cemento, posterior a esto, el clinker se alimenta a los molinos junto con el yeso (regulador del fraguado), para obtener como producto final el cemento [12]

La dosificación de los cementos, al igual que la de los agregados, debe hacerse por peso, pues la medida de estos o cualquier otro sólido con base en su volumen, puede conducir a grandes errores al no tenerse en cuenta el grado de compactación o abultamiento de las partículas [10] [1] [14].

2.1.2. Agua

El agua es el componente de concreto, en virtud del cual, se experimentan reacciones químicas llamadas hidratación, que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Por otra parte el agua moja suficientemente la masa entera de cemento y agregados para que la mezcla y la colocación sean posibles.

Debido a que ciertas sustancias orgánicas que se presentan en el agua pueden producir manchas indeseables, es recomendable emplear agua potable; puesto que muchas veces el extremo cuidado en la selección de cementos y agregados, se ve anulado por el efecto de agua contaminada [10] [15] [14].

2.1.3. Agregados

Los agregados juegan un papel importante en la calidad del concreto, puesto que constituyen la mayor parte de la mezcla.

De los agregados dependen muchas de las propiedades mecánicas que desarrolla el concreto, además, desde el punto de vista económico juega un papel muy importante; por este motivo debe cuidarse que cumplan con las propiedades correspondientes [10] [9] [23].

• Propiedades de los agregados

Originalmente se pensó que los agregados eran materiales inertes que tenían como único fin servir de relleno económico a la masa de concreto. En realidad los agregados no son estrictamente inertes, sus propiedades químicas y algunas veces físicas, influyen en la calidad del concreto. El empleo de los agregados producen en el concreto una estabilidad volumétrica y una durabilidad mejor que la del cemento. En la tabla 1 muestran sus propiedades físicas.

Tabla 1. Propiedades de los agregados

Peso	Naturaleza	Forma de obtención	Tamaño	Forma	Textura
Ligero	Rocas ígneas	Naturales	Gravas	Esféricas	Vítrea
Normal	Rocas sedimentarias	Artificiales	Arenas	Redondas	Lisa
Denso	Rocas metamórficas	Mixtas		Irregulares	Granular
				Angular alargado	Áspero Cristalino Poroso

Fuente: los autores

Entre las propiedades de los agregados están:

- **Granulometría:** esta es la forma en que se encuentran distribuidos los diferentes tamaños de los agregados.
- **Sanidad:** es la propiedad que tienen los agregados para resistir el ataque de la intemperie.
- **Sustancias deletéreas:** son aquellas que contaminan a los agregados y que de alguna forma dañan el concreto.

Los agregados se clasifican en agregados finos y agregados gruesos. También se pueden clasificar según su naturaleza, forma de obtención, tamaño, forma, textura y peso. Es importante considerar una granulometría adecuada, pues esta afecta las proporciones relativas, como también al agua y al cemento, para conseguir la manejabilidad, porosidad economía y resistencia necesaria. El tamaño máximo del agregado grueso debe ser considerado de acuerdo con las dimensiones y especificaciones de la estructura [10] [14].

2.1.4. Proceso de fabricación del concreto

Para la realización correcta de este proceso la American Concrete Institute A.C.I, hace énfasis en tres actividades que se deben llevar a cabo para una buena elaboración del concreto, ellas son: caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, fraguado y curado [5] [36].

2.1.4.1. Caracterización de la materia prima

Esta primera etapa consta en una caracterización detallada de los granos finos y gruesos que se encuentran en la mezcla, conociendo así características como: módulo de finura, gravedad específica de ambos y el tamaño real.

El análisis granulométrico se realiza según las siguientes normas; NTC 77 [24] y NTC 78 [25]; las cuales se refieren a hacer pasar el agregado de cualquier tamaño

por una serie de tamices para que finalmente se pueda seleccionar el material cuya granulometría según la norma nos permitan clasificarlos como finos o gruesos. Después de todo esto se toma el material retenido en cada malla y se pesa al igual que el material q pasa cada una de ellas, para conocer el índice de finura.

2.1.2.2. Diseño de mezcla

Existen diversas maneras para hallar el diseño de mezcla para un buen concreto, la American Concrete Institute A.C.I se basa en tablas empíricas experimentales mediante las cuales se determinan los diferentes componentes de la mezcla.

2.1.2.3. Fraguado

El fraguado se puede definir como el tiempo necesario para que la mezcla pase de un estado fluido a un estado sólido, debido a las reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento, por tal razón su comportamiento depende estrictamente del tipo de cemento utilizado. Este proceso se pone en marcha una vez se ponen en contacto el cemento con el agua de mezclado causando endurecimiento pausado a la mezcla. El tiempo de fraguado a tener en cuenta se encuentra en un lapso de 10 horas aproximadamente expuestas al aire libre cuyo proceso será completado posteriormente con el curado [18] [20].

2.1.2.4. Curado

Se conoce como curado al proceso de endurecimiento normal de la mezcla desarrollando consigo propiedades mecánicas típicas en el estado endurecido bajo condiciones de temperatura y humedad.

El tiempo de curado del concreto se basa en una combinación de condiciones que promueven la hidratación del cemento, esto quiere decir, condiciones como tiempo temperatura y humedad.

Según la American Concrete Institute y la Portland Cement Association “el curado tiene una influencia significativa sobre las propiedades del concreto endurecido, tanto en el interior como en su superficie, tales como su resistencia, la permeabilidad resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen, resistencia al hielo-deshielo y sustancias anticongelantes. El desarrollo de resistencia superficial se puede reducir considerablemente cuando el curado es defectuoso” [16] [37].

2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión es la carga (o peso) por unidad de área a la que el material falla (se rompe) por fracturación por cizalla o extensional ver figura 2. Es expresada en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) y se designa con el símbolo $f'c$.

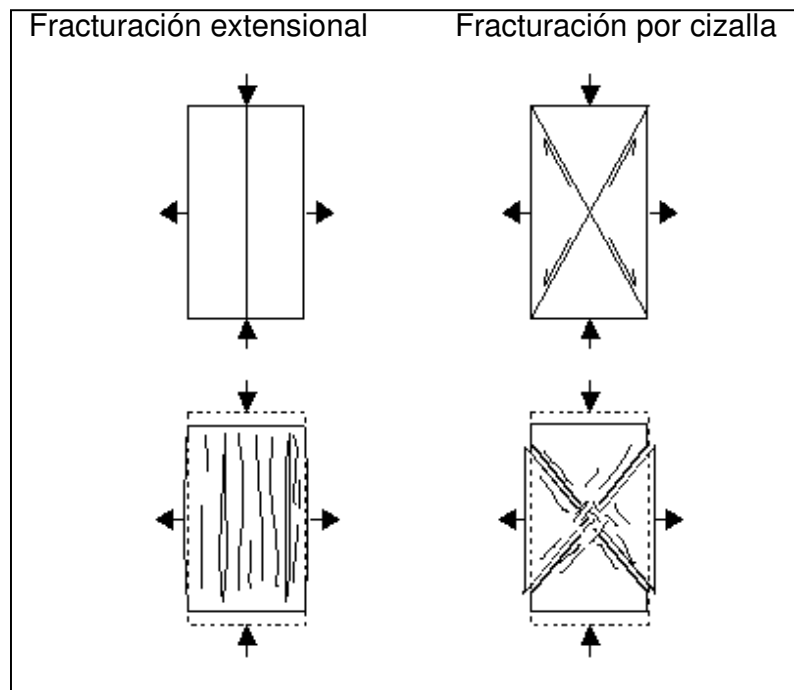
Es una propiedad física fundamental que mide la calidad del concreto de una manera sencilla, rápida y eficaz; y empleada con frecuencia en los cálculos para el diseño de las estructuras. Siendo esta la propiedad más importante del concreto, puesto que de ella se evalúan las demás propiedades mecánicas [22] [7].

El concreto, cuando es sometido a esfuerzos de compresión, puede presentar fisuras si el valor del esfuerzo es mayor que la resistencia. La dirección de las fisuras formadas es en general paralelas a la dirección del esfuerzo, mientras que la separación entre ellas es muy variable y su trazado es considerablemente irregular a causa de la heterogeneidad del concreto.

En las columnas, la aparición de fisuras de compresión es muy peligrosa, siendo síntoma precursor de un hundimiento inmediato de la zona afectada y consecuentemente, el colapso de la pieza.

En la figura 2, se muestra el desarrollo de una posible fisura en una estructura sea por fracturación extensional o por fracturación en cizalla.

Figura 2. Desarrollo de fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.



Fuente: <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

- **Curva esfuerzo-deformación**

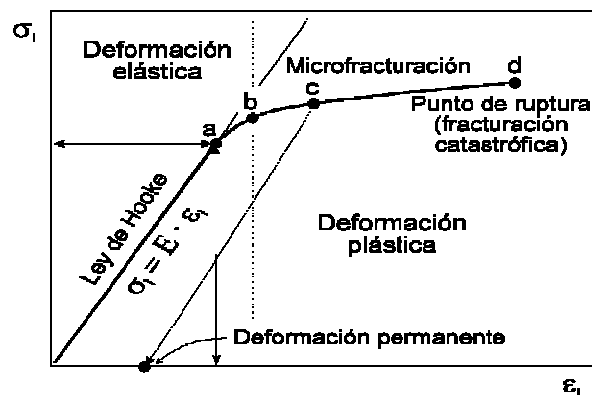
En la Figura 3 puede apreciarse un tramo de la curva $\sigma_f - \epsilon_f$, donde el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. Este comportamiento constituye la ley de Hooke, que aplica solo para pequeñas deformaciones, hasta un límite denominado límite de proporcionalidad, representado en la Figura 3 por el punto a. En este tramo, el comportamiento del material es elástico, esto es, si se disminuye el esfuerzo aplicado lentamente, se recorre el mismo tramo de la curva en sentido contrario, hasta alcanzar el punto de origen donde el esfuerzo y la deformación

son nulos. La proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación en el tramo de la ley de Hooke permite definir el módulo de Young o módulo de elasticidad (E). Este módulo es la constante de proporcionalidad, de manera que:

$$E = \frac{\sigma_l}{\epsilon_l}$$

Donde el módulo de elasticidad E es positivo (σ_l y ϵ_l son negativos) y presenta las mismas dimensiones que el esfuerzo ya que ϵ_l es adimensional. El valor del módulo de Young es característico para distintos materiales, por lo que puede utilizarse para comparar las características mecánicas de los mismos.

Figura 3 Curva esfuerzo-deformación para compresión, con ilustración de los tramos elástico y plástico.



Fuente: <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

Para deformaciones superiores al límite de proporcionalidad, existe un cierto tramo de la curva $\sigma_l - \epsilon_l$ donde el comportamiento del material es elástico, aunque no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. El límite en el que el comportamiento del material deja de ser elástico se denomina límite elástico, representado por el punto b de la curva en la Figura 3.

Al aumentar el esfuerzo y superarse el límite elástico (punto b), la deformación aumenta rápidamente y es en parte permanente. Así, si se disminuye el esfuerzo

aplicado lentamente a partir del punto c de la curva, se recorrerá el trayecto indicado por una flecha de puntos hasta alcanzar el punto donde el esfuerzo es nulo, pero existe una cierta deformación permanente (el cuerpo no recupera su longitud original). Al aumentar el esfuerzo se llega finalmente al punto d, denominado punto de ruptura, donde el cuerpo experimenta una fracturación catastrófica por cizalla o fisuración extensional. Este punto de ruptura define, en términos del esfuerzo compresivo, la resistencia a la compresión (R).

Teniendo en cuenta la resistencia a la compresión, que es la principal característica de las mezclas del cemento portland, los concretos se clasifican en resistencia normal alta resistencia y ultra resistencia (ver tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los concretos según su resistencia

Descripción	MPa	Resistencia a la compresión	
		Kg/cm ²	lb/pulg ²
Normal	7 – 420	70 – 420	1000 – 6000
Alta resistencia	42 – 100	420 – 1000	6000 – 14000
Resistencias elevadas	Más de 100	Más de 1000	Más de 14000

Fuente: Asoconcreto S.A

2.2.1. Factores que afectan la resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se ve afectada directamente por los siguientes factores:

- **Cemento:** la influencia en la resistencia a la compresión del cemento depende de cuales sean sus características físicas, así como la cantidad requerida dentro de la mezcla, esto se debe a que el cemento es el elemento más activo en la mezcla afectando de sobremanera esta propiedad. Por lo tanto, al aumentar la cantidad de cemento produce un incremento en la resistencia, cuyo contenido no debe exceder de 470 Kg/m³, de lo contrario esta propiedad disminuye [34].

- **Relación agua/cemento:** es el factor más importante en la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo las medidas de esta propiedad pueden variar según sea el tamaño de agregado y el cemento utilizado para una misma relación A/C [35].
- **Calidad de agregados:** la calidad de los agregados influye sobre la resistencia de un concreto a través de las siguientes propiedades: granulometría, forma y textura de los agregados, tamaño máximo del agregado grueso y la resistencia y la rigidez de las partículas de agregado [14] [11].
- **Tamaño máximo de agregado grueso:** este factor es importante debido a que la cantidad de cemento necesaria para conseguir determinada resistencia va a depender del tamaño máximo de agregado, pues se ha demostrado que se requiere de una mayor cantidad de cemento cuando se trabaja con agregado de tamaño máximo menor lo que produce un aumento en la resistencia.

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

- **Tiempo y tipo de curado del concreto:** en la etapa de curado se dan las reacciones de hidratación-cemento agua, las cuales presentan gran incidencia sobre la resistencia. Un curado donde el concreto se encuentre expuesto al aire producirá una hidratación incompleta causando una disminución en la resistencia. A diferencia con lo que ocurre con el concreto al realizar el curado por vía húmeda, ya que por este método se impide el secado de la muestra al mantener el concreto tan saturado como sea posible, logrando que las reacciones de hidratación se den completamente y por consiguiente se obtenga un aumento en la resistencia de forma continua que va a depender del tipo de cemento.

Pero la efectividad del tipo de curado va a depender directamente del tiempo durante el cual se permitan el desarrollo de estas reacciones de hidratación. Este tiempo se ha comprobado que es 28 días, dado que este es el tiempo necesario para conseguir la mayor resistencia a la compresión.

2.3. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Es un ensayo no destructivo y en la actualidad es muy utilizado para evaluar estructuras de concreto por su fácil empleo, ya que por medio de este se pueden localizar las zonas de mayor daño en el concreto y en las cuales se deben adoptar medidas de prevención, permitiendo también determinar la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto [17]. En la tabla 3, se puede observar la clasificación de la calidad del concreto según Leslie y Cheesman.

Tabla 3. Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman

Velocidad de la onda longitudinal m/s	Condición del concreto
Más de 4570	Excelente
De 3050 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

Fuente:<http://civilgeeks.com/2011/04/11/ensayos-no-destructivos-del-concreto-ultrasonido/>

La técnica cubre la velocidad de propagación de los pulsos de una onda longitudinal a través del material. Las ondas longitudinales normalmente usadas

tienen frecuencia entre 20 y 150 KHz, las cuales son bajas comparándolas con las de un acero, por la heterogeneidad del concreto. Para mayor información podemos ir a la norma ASTM C597 [3].

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico, consiste en determinar el tiempo durante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una dimensión conocida del elemento de concreto. Por lo tanto, la longitud de la trayectoria dividida por el tiempo que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la velocidad de pulso ultrasónico [17].

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Este ensayo se puede realizar de tres maneras:

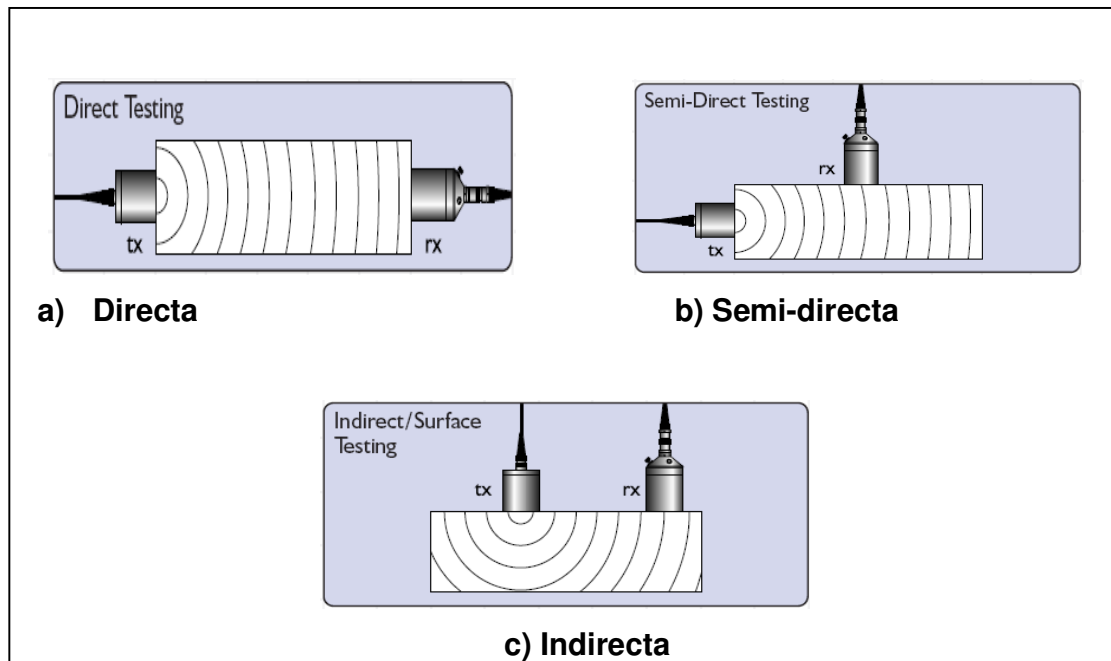
Transmisión directa, transmisión semi-directa y transmisión indirecta o superficial.

Transmisión directa. Los terminales del trasmisor y el receptor son colocados y enfrentados en superficies opuestas del concreto. Este método es de gran ventaja pues trae consigo mayor sensibilidad y una ruta de viaje más definida por esto es empleada en vigas y columnas. Ver figura.4a [13].

Transmisión semi-directa. Las terminales son colocadas adyacentemente formando generalmente un ángulo de 90°, este método se emplea en pilares, estribos o zapatas. Ver figura.4b [13].

Transmisión indirecta o superficial. En este caso las terminales son colocadas en la misma superficie del concreto. Este es el menos utilizado debido a la baja sensibilidad. Ver figura.4c [13].

Figura 4. Tipos de medición de velocidad de pulso ultrasónico



Fuente: <http://www.sensorcraft.com/pundit/punditplus.pdf>

2.3.1 Factores que afectan la velocidad de pulso ultrasónico

La efectividad como tal de la técnica de pulso ultrasónico en el estudio del concreto está basada en una serie de factores que alteran la velocidad de pulso, estos factores son:

- **Contenido de agua:** el valor de la velocidad de pulso puede aumentar o disminuir significativamente según su contenido de agua, es decir, puede aumentar en condiciones de saturación, pero la resistencia a la compresión no varía significativamente [13].
- **Relación agua/cemento:** el efecto presente es inversamente proporcional al que esta relación presta a las característica de la mezcla, ya que a medida de disminuye la relación, aumenta los valores de la velocidad de pulso, debido a que la cantidad de agua en la mezcla es menor, lo que disminuye el porcentaje de porosidad en el material, lo que evita la dispersión de las ondas ultrasónicas, lo que permite menos tiempo en el recorrido de la trayectoria [30].

- **Cantidad y tipo de agregados:** tanto la cantidad como el tamaño de agregado afectan considerablemente las reacciones de hidratación y la trayectoria de la onda, generando variaciones en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico para concretos con la misma relación A/C [13].
- **Tipo y tiempo de curado del concreto:** si el concreto es curado bajo condiciones de humedad del 100%, la velocidad de onda aumentará en un porcentaje mayor debido a las condiciones de saturación.
- Por otra parte, el aumento de la edad del concreto genera una disminución en la porosidad debido a las reacciones de hidratación, lo que conlleva a que las ondas se propaguen más rápido en este medio sólido [21].

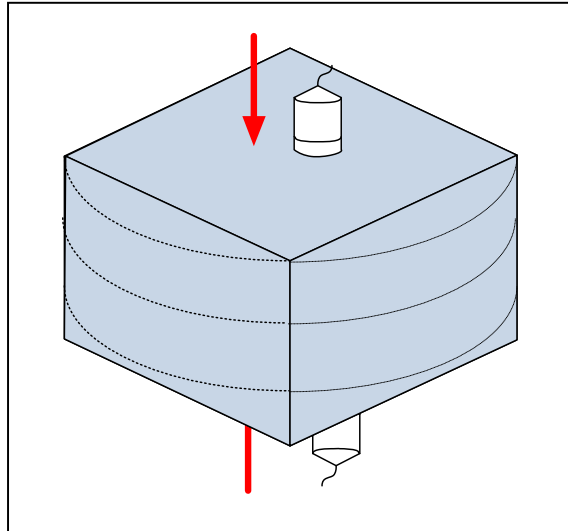
2.3.2. Lectura de VPU según la aplicación de la carga

La toma de lectura de velocidad de pulso ultrasónico puede variar de acuerdo a la carga aplicada, esta puede ser en forma perpendicular o paralela a la carga según sea el caso.

- **Lectura de VPU paralela a la carga aplicada**

En la figura 5, se observa una carga aplicada paralela a la toma de lectura de VPU. En caso dado que el material presente una grieta en dirección a la carga aplicada puede que esta no sea detectada si no está dentro de la línea de referencia establecida entre el palpador transmisor y el receptor, por eso se hace necesario una lectura perpendicular.

Figura 5. Lectura paralela a la aplicación de carga.

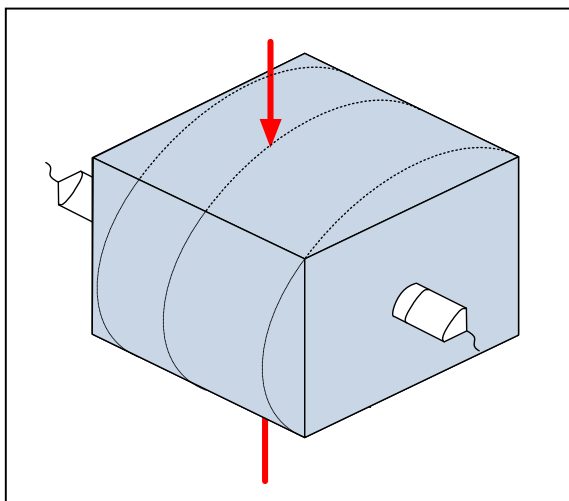


Fuente: los autores.

- **Lectura de VPU perpendicular a la carga aplicada**

Para la figura 6, la lectura de VPU es tomada perpendicular a la carga aplicada, en caso de formación de grietas y que esta sea paralela a la carga aplicada, esta forma de lectura la podría detectar sin problema.

Figura 6. Lectura perpendicular a la aplicación de carga.



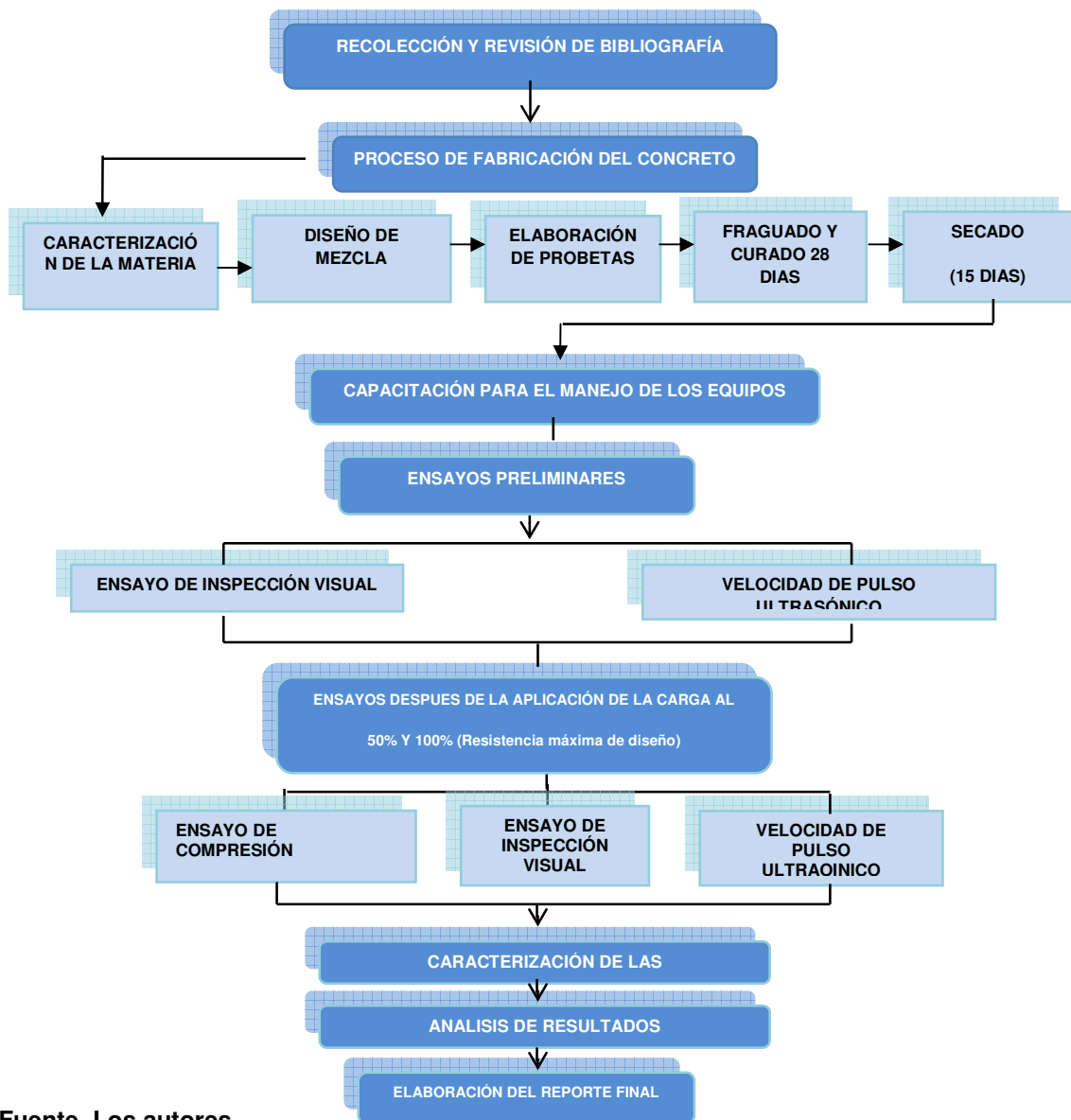
Fuente: los autores

Estos tipos de toma de lectura tanto el paralelo como el perpendicular me permiten una detección más precisa del daño o la discontinuidad en la estructura a analizar ofreciendo así datos capaces de revelar la magnitud de lo que ocurre dentro del material.

3. METODOLOGÍA

En la figura 7. Se muestra el esquema de la metodología que se llevó a cabo en la realización de la presente investigación.

Figura 7. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación.



Fuente. Los autores

3.1. RECOLECCIÓN Y REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

Esta etapa se llevó a cabo durante todo el desarrollo de la investigación. Se realizó una revisión y recopilación de información necesaria relacionada con el tema de investigación constituida por tesis, trabajos de grado, artículos, información en internet, libros y normas técnicas como la ASTM, NTC, ISO y las ICONTEC; donde se obtuvo información referente a la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasonido y técnicas destructivas como la resistencia a la compresión de concreto sin refuerzo y la caracterización de las grietas que se presentan en el mismo. Adicionalmente se estudió las variables que influyen en los resultados obtenidos.

3.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO

Para el proceso de fabricación de la mezcla de concreto se llevó a cabo las siguientes actividades:

- Caracterización de la materia prima.
- Diseño de la mezcla.
- Elaboración de probetas.
- Proceso de fraguado y curado.

3.2.1. Caracterización de la materia prima.


Los materiales utilizados en la fabricación de la mezcla de concreto fueron: cemento portland tipo I, agua potable, agregados fino y grueso. A continuación se indican las características básicas y los métodos de caracterización de cada uno.

Todos los ensayos y caracterización realizados se llevaron acabo en el Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

Cemento: el cemento Portland Tipo I, fue el cemento utilizado en esta investigación, el cual se rige por las especificaciones mecánicas y físicas establecidas en las normas NTC 121[27] y NTC 321[30].

Agua potable: se utilizó agua potable suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). El análisis fisicoquímico y microbiológico promedio mensual del agua, tratada en los laboratorios de control de calidad se presentan en la figura 8.

Figura 8. Análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

No Aplica F CC 507-006 Rev:0		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCIÓN																		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA		AÑO:		2011														
PARAMETROS MES	Parámetros Fisicoquímicos										Parámetros Microbiológicos						Σ IRCA MENSUAL			
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente UPC	pH Unidades	Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales		% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
Enero	90	0,95	0,80	4,1	7,19	0	0,05	48,1	65,5	3,4	26,7	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,95	0,70	3,5	7,27	0	0,05	51,7	69,5	3,8	26,8	N.D	1,2	N.D	169	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,00	5,9	7,15	0	0,06	44,9	69,1	4,0	27,6	N.D	1,1	N.D	196	0	100	0	100	0,00
PROMEDIO	89	0,95	0,83	4,5	7,20	0	0,05	47,6	68,0	3,7	27,0	N.D	1,2	N.D	178	0,0	100	0,0	100	0,00
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	0/día	0	100	0	100	0-5
Convenciones:	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 IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																			
Elaboró:	Leonor Chacon			Revisó y Aprobó:	CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas															

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

De acuerdo con la tabla anterior, se observa que el agua empleada cumple como los requerimientos fisicoquímicos de la norma NTC 3459 [31], presentando menos de un miligramo por litro de cloro residual (mgCl_2/l) y un pH inferior a 7.74, en el mes de elaboración de las probetas.

Agregados: en la realización de la mezcla de concreto se utilizó arena como agregado fino y grava como agregado grueso.

Se procedió a determinar el módulo de finura, gravedad específica, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos para cada uno de los agregados, a través de un análisis granulométrico basado en normas NTC 92[26], NTC 176[27] Y NTC 237[28]. Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo siguiente.

3.2.2. Diseño de la Mezcla.

El diseño de mezcla se realizó para una sola relación a/c 0.5, con un tamaño máximo de agregados de 3/8".

La dosificación utilizada en la mezcla de concreto, para un total de 10 probetas cúbicas con dimensiones $0.20 \times 0.20 \times 0.20 \text{ m}^3$ y un volumen de 0.008 m^3 se muestra en el capítulo de resultados.

3.2.3. Elaboración de las Probetas.

En esta etapa del proyecto una vez preparada la mezcla se procedió a fabricar las probetas para la relación de agua/cemento establecida y el tamaño de agregado, todo esto hecho en formaleas de madera tipo triplex, de 1 cm de grosor con dimensiones internas de $0.2 \times 0.2 \times 0.2 \text{ m}$, (ver figura 9), las cuales fueron limpiadas y adecuadas, impregnándolas de grasa para evitar que la mezcla de concreto se adhiera y facilitar su desmoldado o desencofrado.

Figura 9. Formaleta utilizada en la elaboración de las probetas



Fuente : los autores

Todas las actividades correspondientes se llevaron a cabo en 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.

Se elaboró la mezcla de concreto pesando cada uno de los materiales utilizados en una balanza analítica, según las proporciones obtenidas en el diseño de mezcla referenciado anteriormente. Al mezclar estos materiales se obtuvo la pasta de concreto.

Después de lo anterior se procedió al llenado de las formaletas con la mezcla homogénea, compactando cada 1/3 del volumen de la formaleta. La compactación se realizó manualmente utilizando una varilla metálica y dando 25 golpes en toda la mezcla buscando una mejor uniformidad de la probeta. Para eliminar el aire atrapado dentro de la probeta y ayudar a la homogenización de la mezcla, se golpeó la parte exterior de la formaleta con un martillo de caucho.

En total se elaboraron 10 probetas, tomando cada una de ellas como referencias para los ensayos preliminares, en este caso inspección visual y velocidad de pulso ultrasónico para determinar la homogeneidad. Para el ensayo a compresión se

trabajó con 8 probetas, donde a cuatro de ellas se les aplicó una carga del 50% de su resistencia de diseño y a las otras cuatro una carga de 100%. Las probetas restantes se les realizaron la caracterización de las grietas, que consiste en la aplicación de la carga sea paralela o perpendicular, el tamaño y grado de inclinación.

Todo el proceso de elaboración de las probetas se puede ver en la figura 10.

3.2.4. Fraguado y Curado.

Según lo establecido en la metodología después de fabricar las probetas, estas fueron sometidas a un periodo de fraguado durante 24 horas, para que estas una vez retiradas de los moldes tuvieran la dureza necesaria y luego ser transportadas a la piscina donde se llevaría a cabo el proceso de curado húmedo con duración de 28 días, bajo condiciones estándar de temperatura y humedad (23 °C y 100% de humedad) según la norma ICONTEC 1377 [19] (ver figura 10b y 10c).

3.2.5. Secado.

Después de terminada las etapas anteriores de fraguado y curado, las probetas se dejaron 15 días expuestas al aire a temperatura ambiente, para tener un completo proceso de secado y listas para la evaluación de pulso ultrasónico (ver figura 10d).

Figura 10. Proceso de elaboración de las probetas



Fuente: los autores

3.3. CAPACITACIÓN PARA EL MANEJO DE LOS EQUIPOS

Para la realización de los ensayos no destructivos y destructivos se recibió capacitación en el manejo de los equipos tales, como la máquina para la determinación de la resistencia a compresión del concreto cuya referencia DIR-Controls CT-1500; y el equipo de ultrasonido de baja frecuencia marca CNS FARNELL LIMITED tipo PUNDITplus modelo PC1006, con el que se determinó la velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

3.4. ENSAYOS PRELIMINARES

En esta etapa se muestran los ensayos experimentales previos a la aplicación de carga, ellos son inspección visual y velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

3.4.1. Inspección visual

Para este análisis se tuvo en cuenta varios factores los cuales serán referenciados en detalle: medida de dimensiones y estado superficial de las probetas.

- **Medida de dimensiones**

Una vez pasado el tiempo de secado (15 días), se procedió a tomar las dimensiones de las probetas, para ello se empleó un calibrador digital para obtener datos más precisos de las caras de cada una de las probetas.

- **Estado superficial**

Se llevó a cabo la observación del estado superficial de las probetas y se tomaron los registros y las medidas necesarias para mejores resultados. En el capítulo siguiente se muestran los resultados obtenidos.

3.4.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico

En esta fase se tomó medida de pulso ultrasónico utilizando el equipo CNS FARNELL LIMITED tipo PUNDITplus modelo PC1006 (ver figura 11), a 10 probetas que previamente fueron pulidas para mayor uniformidad en la superficie y mejor acople de los transductores para obtener resultados más precisos.

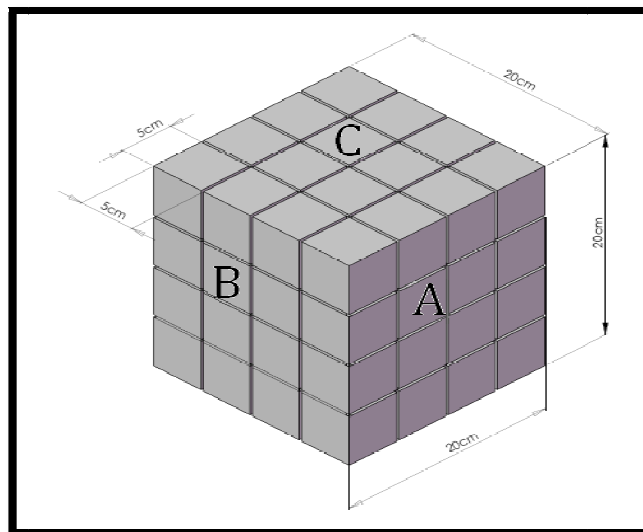
Figura 11. Equipo de ultrasonido



Fuente: www.jroma.pt/cns_farnell.htm

Fue necesario trazar cuadrículas de 5x5 centímetros para facilitar la ubicación de los transductores a lado y lado de la probeta en cada una de las caras como se muestra en la figura 12, puesto que el transmisor y receptor del equipo de ultrasonido necesitan estar en la misma línea de referencia.

Figura 12. Cuadrícula empleada para la medición de pulso en probetas.

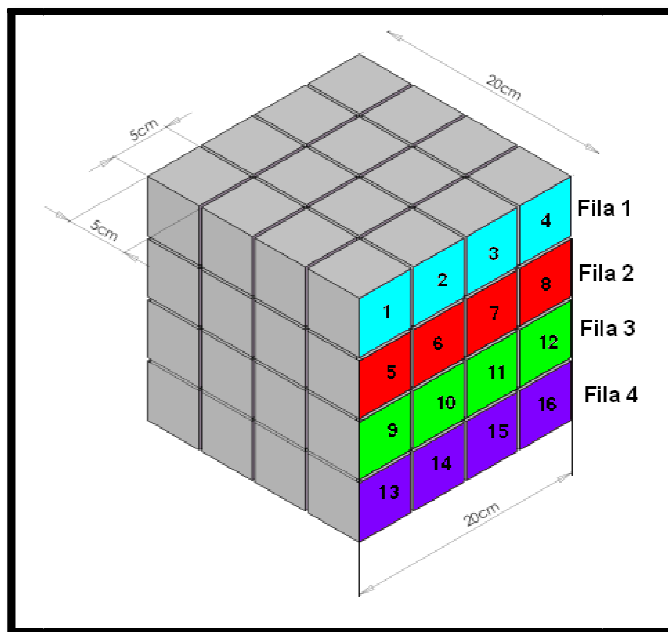


Fuente: los autores

En la figura 13, se muestran los puntos de referencia de cada fila en las caras de las probetas, a los cuales se les realizó dos tomas de medición de velocidad de pulso

Los resultados obtenidos a partir de las lecturas de velocidad de pulso se presentaran en el siguiente capítulo.

Figura 13. Filas correspondientes de cada cara de las probetas



Fuente: los autores

Para llevar a cabo las mediciones del tiempo de vuelo se procedió a la calibración del equipo la cual consistió en los siguientes pasos:

- Conectar los cables al equipo previamente cargado y después a los palpadores respectivamente (transmisor y receptor).
- Se encendió el equipo y se unieron los transductores los cuales tenían vaselina pura como acoplante para su calibración, dando como resultado un tiempo de vuelo de la onda de 0 microsegundos (μs).

Una vez calibrado el equipo con los parámetros establecidos (ver tabla 4) se colocaron los palpadores a lado y lado de la probeta que debía estar impregnada de vaselina para mejorar el acople, posteriormente se procedió a tomar los tiempos de vuelo para determinar la velocidad de pulso ultrasónico previo al ensayo de compresión.

Tabla 4. Parámetros utilizados en el equipo de ultrasonido

Voltaje	500V
Unidades	Métricas
Modo de pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	apagado
Distancia entre transductores	0.20 metros
Pulso de referencia	10 segundos
Límite superior	9999
Límite inferior	1

Fuente: los autores

3.5. ENSAYOS DESPUES DE LA APLICACIÓN DE LA CARGA al 50% Y 100% DE SU RESISTENCIA DE DISEÑO.

A continuación se indica la metodología seguida para la realización de esta etapa.

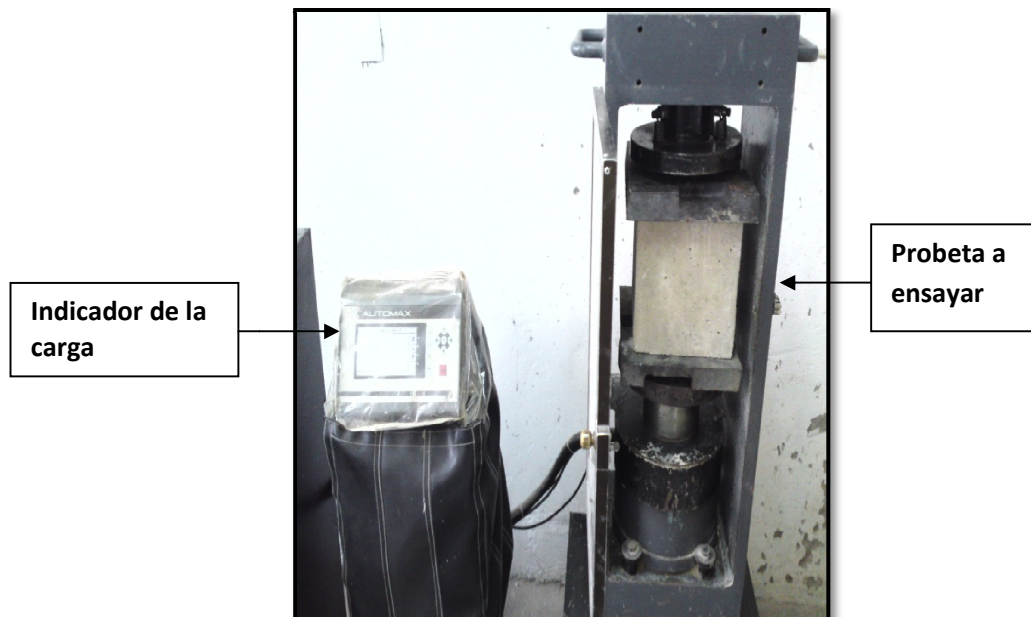
Inicialmente se llevó a cabo el ensayo de compresión, luego la inspección visual, seguida de la lectura de VPU y finalmente la caracterización de las discontinuidades a cada una de las probetas tanto en dirección paralela a la carga como a 90° de ella.

Se presentan a continuación detalles de estas actividades.

3.5.1. Ensayo de compresión

Este ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de CEMEX, concretera. El equipo utilizado para esta prueba fue la máquina de compresión DIR-Controls CT-1500; los rangos de velocidad y carga permitidas, bajo la norma ASTM C39/C39M-04 [4] (ver figura14). La carga máxima de la máquina es de 120000 Kgf.

Figura 14. Máquina de compresión



Fuente: autores

La prueba de resistencia a la compresión se realizó teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La toma de medidas de la superficie de la probeta para determinar la carga máxima que cada una podía soportar.

- Para que la distribución de la carga fuera uniforme sobre toda la probeta, se utilizaron dos placas de metal una en la cara superior y la otra en la cara inferior.
- Se aplicó la carga respectiva a cada probeta, cuatro de ellas al 50% de su resistencia de diseño, y las cuatro restantes al 100%. Esta se hizo a una velocidad uniforme y continua hasta que se produjo la falla.

En el próximo capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos.

3.5.2. Inspección visual.

Después de la aplicación de la carga del 50 % y 100% de la resistencia de diseño se hace un análisis del estado superficial de las probetas, se observan y se detallan los posibles cambios que estas hayan sufrido tras la carga aplicada. Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo siguiente.

3.5.3. Velocidad de pulso ultrasónico

Una vez concluida la inspección visual de cada probeta sometida al 50 y 100% de la carga respectiva, se continuó con la lectura del tiempo de vuelo de la onda para la velocidad de pulso ultrasónico después del ensayo a compresión.

Para dichas medidas se procedió de igual manera como se indicó en este capítulo (numeral 3.4.2.) antes de la aplicación de la carga; en aquellos puntos donde la lectura era posible se aplicó vaselina y una vez realizado el procedimiento de calibración respectiva, se colocaron los transductores en la misma línea de referencia y se leyó el tiempo de vuelo (ver figura 15).

Se analizaron las lecturas tomadas en la dirección paralela y perpendicular a la aplicación de la carga, teniendo en cuenta la influencia sobre la VPU con relación a la presencia de grietas.

Los resultados que se obtuvieron son presentados en el capítulo 4.

Figura 15. Ensayo de pulso ultrasónico



Fuente: autores

3.6. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Con el fin de hacer una caracterización adecuada de las discontinuidades presentes en el concreto después de la aplicación de la carga se llevaron a cabo dos actividades: evaluación de la matriz y caracterización de las grietas.

3.6.1. Evaluación de la matriz

Con el fin de evaluar el daño sufrido en la matriz del concreto se realizaron cortes paralelos y transversales a la aplicación de carga. A través de la inspección visual se caracterizaran las discontinuidades.

3.6.2. Caracterización de las grietas

Según lo establecido en la norma técnica colombiana NTC 4325 un estimativo de la profundidad de una grieta puede hacerse utilizando el método indirecto, donde se mide los tiempos de tránsito a través de la grieta para dos posiciones de los transductores sobre la superficie. Un esquema apropiado se muestra en la figura 16, en la cual los transductores emisor y receptor se colocan a una distancia X a ambos lados de la grieta y equidistante de ella. Se escogen dos valores de X , uno que es dos veces el valor del otro, y se miden los tiempos de tránsito correspondientes [32].

Para dichos valores la profundidad de la grieta (cm) es:

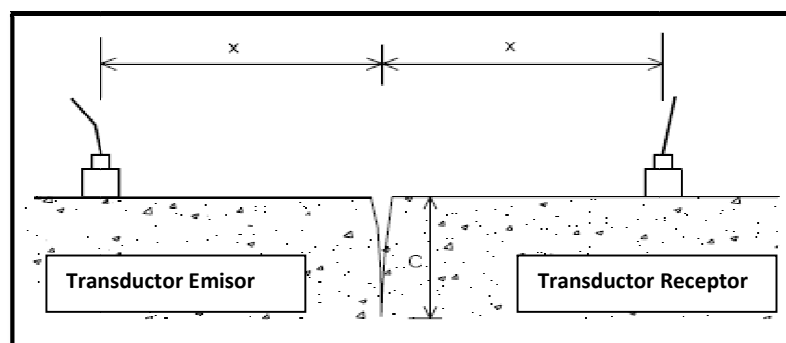
$$C = X \sqrt{\frac{(4t_1^2 - t_2^2)}{(t_2^2 - t_1^2)}}$$

Donde:

T_1 = tiempo de tránsito de la distancia inicial(X_1)

T_2 = tiempo de tránsito del doble de la distancia ($2X_1$)

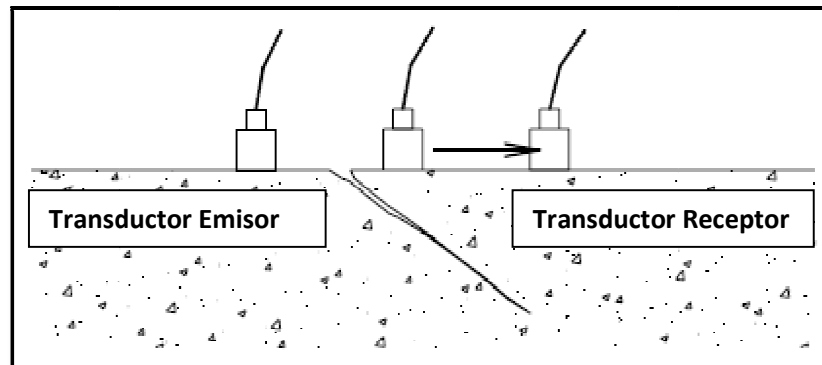
Figura 16 .Estimación de la profundidad de la grieta. Grieta perpendicular a la superficie del concreto



Fuente: NTC 4325[35]

Para evaluar si la grieta no esta en el plano perpendicular de la superficie del concreto, se hace colocando los transductores a los lados de la fisura y después se mueve uno de ellos alejándolo de la fisura como en la figura 17. Si al efectuar esta operación la lectura del tiempo de propagación disminuye, significa que la fisura presenta inclinación hacia ese lado [32].

Figura 17. Estimación de una grieta inclinada a la superficie del concreto



Fuente: NTC 4325[35]

Los resultados que se obtuvieron son presentados en el capítulo siguiente.

3.7. Análisis de resultados.

Durante el desarrollo de la investigación se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos en cada etapa.

3.8. Preparación del reporte final.

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

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a través del desarrollo de la investigación en curso, presentándose en su respectivo orden lo relacionado al proceso de fabricación, ensayos preliminares y ensayos después de la aplicación de la carga.

4.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO

Según la metodología planteada, se presenta a continuación los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima y el diseño de mezcla.

4.1.1. Caracterización de la materia prima.

La caracterización tanto para el agregado fino como para el agregado grueso se muestra en la tabla 5, donde se dan a conocer sus principales propiedades físicas.

Tabla 5. Caracterización de los agregados fino y grueso

Características	Agregado Fino	Agregado Grueso 3/8"
Gravedad Especifica Aparente S.S.S	2,63	2,6
Peso Unitario Suelto	1391	1381,51
Peso Unitario Compactado	1650	1465,34
Porcentaje de Absorción%	1,87	1,58
Porcentaje de Vacíos%	37,26	44,64

Fuentes: Los autores

La clasificación de los agregados por tamaño se realizó siguiendo las normas NTC 77[14] Y NTC 78[15].

Para la clasificación del agregado fino se utilizó una serie de tamices 4,8,16,30,50 y 100, el cual fue pesado el material retenido en cada tamiz con el fin de obtener el análisis granulométrico (ver tabla 6). Esta arena fue la empleada para la mezcla utilizada en cada una de las probetas.

Tabla 6. Análisis granulométrico del agregado fino

TAMIZ	PESO RETENIDO	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	%QUE PASA
4	26,3	2,63	2,63	97,37
8	53	5,3	7,93	92,07
16	109,3	10,93	18,87	81,13
30	220,5	22,06	40,93	59,07
50	33,9	3,38	44,31	55,69
100	482,7	48,29	92,61	7,39
Fondo	73,9	7,39	100	0
Total	999,5		Peso Muestra	
Módulo de Finura=2,073				

Fuente: Los autores

4.1.2. Diseño de mezcla.

En la tabla 7, se presenta la dosificación empleada en la fabricación de 10 probetas para la mezcla. Se tomó como base de cálculo 1m³ de concreto. Ver ANEXO A.

Tabla 7. Dosificación de la mezcla de concreto.

Materiales (Kg)	Dosificación (Kg) (1 Probeta)	Dosificación (%) (1 Probeta)	Dosificación (kg) (10Probeta)	Dosificación (%) (10 Probeta)
Agregado grueso	6.6	35.5	66	35.5
Agregado fino	6.57	35.4	65.7	35.4
Cemento	3.6	19.4	36	19.4
Agua	1.8	9.7	18	9.7

Fuente: los autores

4.2. ENSAYOS PRELIMINARES

A continuación se presentan los resultados a partir de los ensayos preliminares de: inspección visual y velocidad de pulso ultrasónico.

4.2.1. Inspección visual.

Se observó que el estado superficial de las probetas se encontraba en óptimas condiciones para el desarrollo de la investigación (ver figura 18). Para lograr mayor uniformidad se lijó cada una de las caras de las probetas que presentaban pequeñas porosidades y rugosidades, para obtener de esta manera lecturas más precisas de VPU.

Figura 18. Porosidades



Fuente: los autores

4.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

En la tabla 8 y 9 se presentan los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico realizadas a las probetas 1 y 2 en las caras A respectivamente, antes de la aplicación de la carga.

En el ANEXO B se presentan las tablas de velocidad de pulso antes de la aplicación de la carga, para las demás probetas.

Tabla 8 Resultado de velocidad de pulso ultrasónico en la cara A de la probeta 1.

Probeta 1 cara A					
Número de puntos en la cara A	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2 (μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	%ERROR <1 T
1	50	50,2	0,0000501	3852,30	0,40
2	50,2	50,6	0,0000504	3829,37	0,79
3	50,7	50,3	0,0000505	3821,78	0,79
4	51,1	50,7	0,0000509	3791,75	0,78
5	51,1	50,8	0,00005095	3788,03	0,59
6	51,2	50,9	0,00005105	3780,61	0,59
7	51,4	51,3	0,00005135	3758,52	0,19
8	51,9	51,7	0,0000518	3725,87	0,39
9	52	51,8	0,0000519	3718,69	0,38
10	51,2	51,4	0,0000513	3762,18	0,39
11	51,9	51,8	0,00005185	3722,28	0,19
12	52	51,9	0,00005195	3715,11	0,19
13	51,6	51,4	0,0000515	3766,99	0,39
14	51,7	51,6	0,00005165	3756,05	0,19
15	51,9	52	0,00005195	3734,36	0,19
16	51,8	51,4	0,0000516	3759,69	0,77

Fuente: los autores

Tabla 9. Resultado de velocidad de pulso ultrasónico en la cara A de la probeta 2.

Probeta 2 cara A					
Número de puntos en la cara A	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	%ERROR <1 T
1	52,7	52,8	0,00005275	3829,38	0,19
2	52,4	52,6	0,0000525	3847,62	0,38
3	52,7	52,8	0,00005275	3829,38	0,19
4	52,2	52,6	0,0000524	3854,96	0,76
5	52,5	52,3	0,0000524	3854,96	0,38
6	52,5	52,6	0,00005255	3843,96	0,19
7	52,3	52,7	0,0000525	3847,62	0,76
8	52,6	52,7	0,00005265	3836,66	0,19
9	51,6	51,8	0,0000517	3907,16	0,39
10	51,8	51,7	0,00005175	3903,38	0,19
11	51,9	52,2	0,00005205	3880,88	0,57
12	52,3	52,2	0,00005225	3866,03	0,19
13	50,5	50,9	0,0000507	4003,94	0,79
14	51,2	51,2	0,0000512	3964,84	0,00
15	51,3	51,2	0,00005125	3960,98	0,19
16	50,9	51,1	0,000051	3980,39	0,39

Fuente: los autores

A partir de los datos obtenidos de velocidad de pulso en la cara A de las probetas 1 y 2 como se observa en las tablas 8 y 9 presenta una pequeña variación de los valores de la velocidad de pulso en toda la superficie de la cara.

En la tabla 10 se puede observar los valores de la velocidad promedio de las filas de cada cara de las probetas antes de la aplicación de la carga.

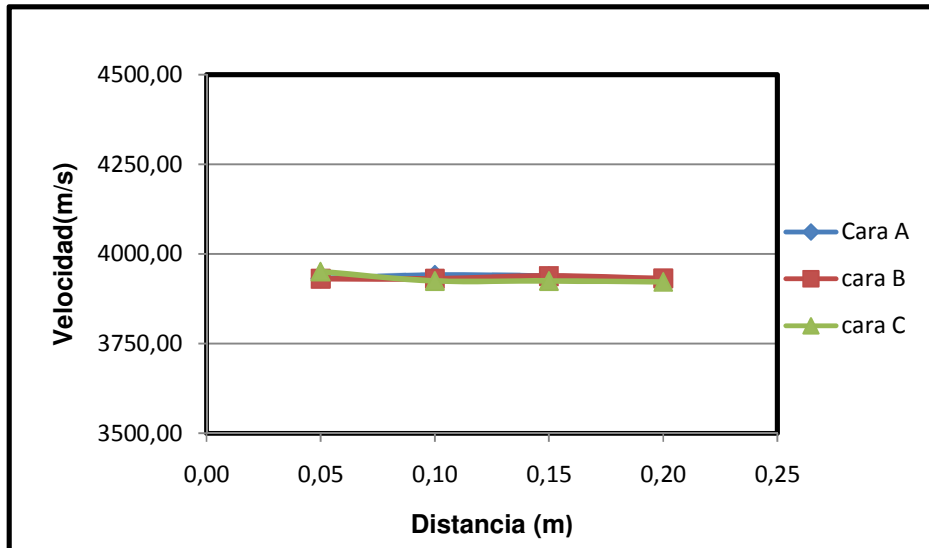
Tabla 10. Velocidad de pulso promedio de las filas de cada cara de las probetas antes de la aplicación de la carga.

Número de filas	Distancia en (m)	Velocidad promedio(m/s) de las filas de la cara A	Velocidad promedio(m/s) de las filas de la cara B	Velocidad promedio(m/s) de las filas de la cara C
1	0,05	3932,42	3931,62	3951,57
2	0,1	3941,35	3931,47	3925,31
3	0,15	3938,30	3938,79	3925,56
4	0,2	3927,61	3932,56	3922,65

Fuente: los autores

En la tabla anterior y en la gráfica 1, se presentan los valores promedio de velocidad de pulso ultrasónico en las probetas antes de la aplicación de la carga, los cuales no presentan gran variación.

Gráfica 1. Velocidad de pulso promedio de todas las caras de las probetas antes de la aplicación de la carga.



Fuente: los autores

Como se puede apreciar en la gráfica 1 la velocidad de pulso ultrasónico en las 10 probetas antes de ser sometidas al daño, tienen un comportamiento muy similar. Se obtuvieron lecturas en un rango de 3750 a 4000 m/s. Esto indica una buena homogeneidad y calidad en las probetas de acuerdo con la clasificación de calidad del hormigón según Leslie y Cheesman, como se indicó en el capítulo 2 numeral 2.3.

4.3. ENSAYOS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LA CARGA DE 50% Y 100% DE SU RESISTENCIA DE DISEÑO.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la aplicación de la carga a las probetas, luego se presenta su inspección visual y finalmente la velocidad de pulso ultrasónico.

4.3.1. Resistencia a la compresión

En esta etapa primero se llevó a cabo el cálculo de la carga máxima que podían soportar las probetas para el ensayo de compresión, para esto se procedió de la siguiente forma:

La fórmula utilizada fue:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

f_c= resistencia a lo compresión.

P= fuerza aplicada.

A= área de la sección donde se aplica la fuerza.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión se procedió de la siguiente manera:

- Se calcula el área donde se va a aplicar la fuerza en este caso para todas las probetas fue de 400 cm².
- Tenemos que la resistencia de a la compresión de diseño es de 245 kg/cm².
Sabiendo que 1 Kgf → 9,8067 N

Partiendo de estos datos podemos despejar la carga máxima que puede resistir la probeta.

$$245 \frac{Kgf}{cm^2} \times 400cm^2 = P$$

$$P = 98000Kgf$$

El valor de 98000 Kgf corresponde a la carga máxima aplicada para una probeta, es decir, 100% de su resistencia de diseño.

1 Kgf corresponde a 0.00980665 KN por lo tanto 98000Kgf equivalen a 961.0517 KN.

Para una probeta que se le aplique el 50 % de la carga aplicada el valor esta aproximadamente en 480 KN.

Los resultados obtenidos para la aplicación de la carga de 50% de la resistencia de diseño se muestran en la siguiente tabla 11.

Tabla 11. Probetas al 50% de la carga aplicada.

Probeta	50% de la carga aplicada (KN)
6	450,09
7	433,48
8	454,15
9	465,77

Fuente: los autores

Los valores obtenidos se aproximan al valor promedio teórico calculado.

Para la aplicación de la carga del 100% de su resistencia de diseño los datos obtenidos por el ensayo de compresión se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Probetas al 100% de la carga aplicada.

Probeta	100% de la carga aplicada (KN)
2	949,49
3	926.90
4	910,04
5	930,54

Fuente: los autores

Para las probetas de la 2 a la 5 a las cuales se les aplicó una carga correspondiente al 100% de su resistencia de diseño, no hubo gran variación entre el valor teórico y la carga que se aplicó en la experiencia.

4.3.2. Inspección visual

Para el desarrollo de la inspección se tomaron las probetas del 50% y las probetas del 100% y se hizo el respectivo análisis.

- **50% de la carga aplicada.**

Después de la aplicación de la carga no se observó alteración alguna sobre la superficie de la probeta, es decir, no se detectó daño, ni grietas, descascaramiento o ruptura como se puede observar en la figura 19.

Figura 19 Probeta al 50% de la carga aplicada



Fuente: autores

- **100% de la carga aplicada.**

Las probetas sometidas la carga máxima de diseño, presentaron daños considerables en la superficie tales como grietas, rupturas y descascaramiento en una de sus caras como se observa en la figura 20.

Figura 20. Probetas al 100% de la carga aplicada



Fuente: autores

4.3.3. Velocidad de pulso ultrasónico

En esta etapa los resultados obtenidos son con base en la forma de cómo se aplicó la carga sobre las probetas, ya sea en forma paralela o perpendicular, siendo más sobresaliente estos cambios en las probetas que se les aplicó una carga del 100% de su resistencia de diseño.

- **Aplicación de carga: 50% de su resistencia de diseño.**

En la tabla 13, se presenta los valores promedios de la velocidad de pulso ultrasónico en cada fila de las probetas, las cuales se les aplicó una carga máxima de 50% de su resistencia de diseño.

Tabla 13. Velocidad de pulso promedio de las filas de cada cara de las probetas después de la aplicación de la carga al 50% de su resistencia de diseño.

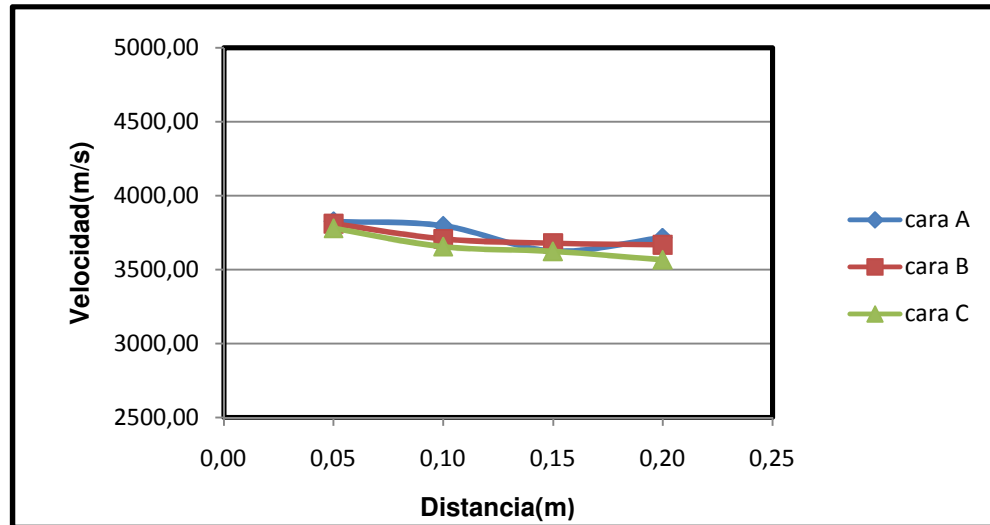
numero de filas	Distancia (m)	Velocidad promedio(m/s) de las filas de la cara A	Velocidad promedio(m/s) de las filas de la cara B	Velocidad promedio(m/s) de las filas de la cara C
1	0,05	3825,99	3811,33	3780,14
2	0,1	3797,04	3708,48	3656,56
3	0,15	3626,55	3678,57	3625,21
4	0,2	3717,24	3669,04	3567,04

Fuente: los autores

Como se observa en la tabla anterior, la velocidad de pulso ultrasónico promedio en las filas de las probetas después de la aplicación de la carga al 50%, no presentó grandes diferencias entre los valores obtenidos debido a que estuvo en un rango de 3600 a 3900m/s.

En el ANEXO C se presentan tablas de velocidad de pulso de algunas probetas, con aplicación del 50% de la carga máxima de diseño.

Gráfica 2. Velocidad de pulso ultrasónico promedio a probetas después de la aplicación de la carga al 50% de su resistencia de diseño



Fuente: los autores

En la gráfica 2, se observa la variación de la velocidad de pulso promedio a las probetas al 50% de la carga máxima de diseño el según su resistencia. Como se puede observar no hubo cambios considerables en la superficie, a causa de una deformación elástica, lo que le permitió al cuerpo recuperar su forma y volumen iniciales una vez cesada la acción de las fuerzas externas. Este comportamiento cumple la ley de Hooke, que aplica solo para pequeñas deformaciones, hasta un límite denominado límite de proporcionalidad, representado por el punto **a** como se muestra en la figura 3 del capítulo 2 numeral 2.2.

Sin embargo se destacan pequeñas variaciones en las medidas de pulso ultrasónico con relación a estas mismas probetas antes de la aplicación de la carga. Estas variaciones son debidas probablemente, a la heterogeneidad y/o la formación de microfisuras en el interior del material.

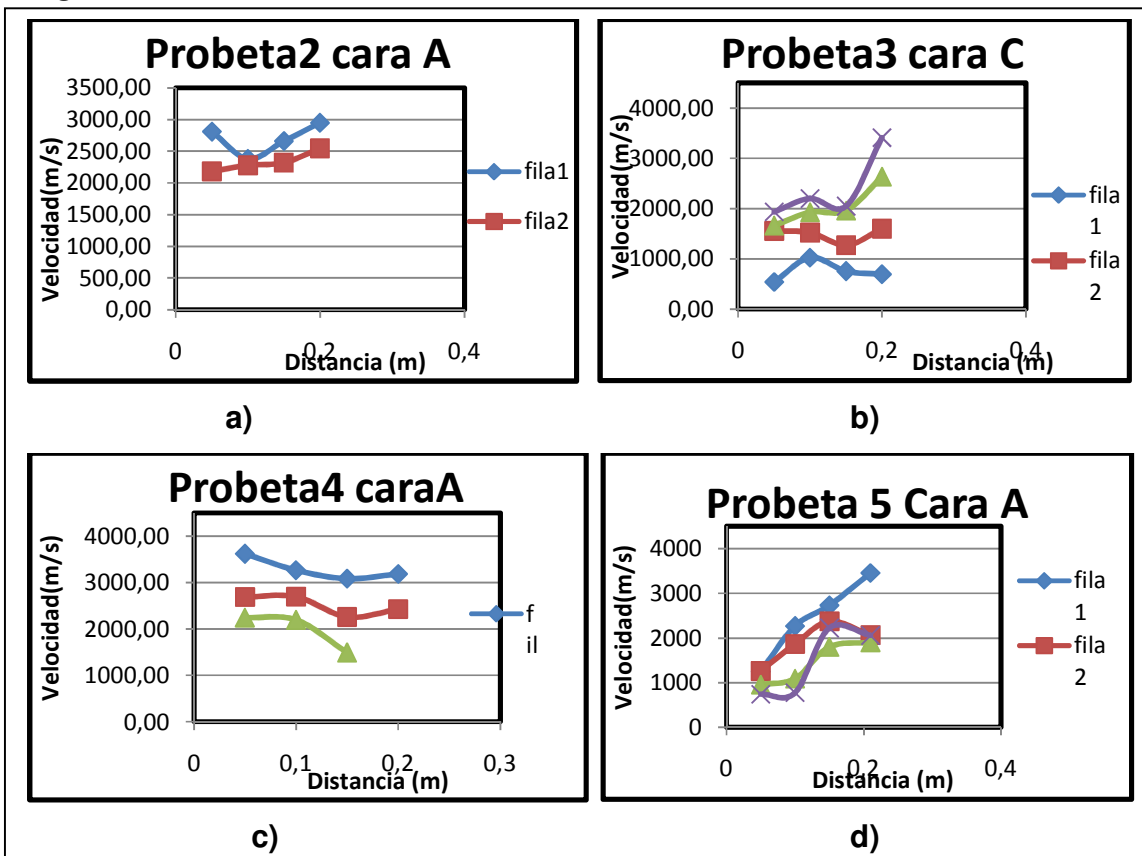
La velocidad de pulso ultrasónico tuvo el mismo efecto para una aplicación de carga paralela o perpendicular a las probetas, debido que esta estuvo en un rango

de 3500 a 4000 m/s; esto se debe a que el daño no fue de mayor magnitud para tener una variación considerable en la velocidad de pulso ultrasónico.

- **Aplicación de carga: 100% de su resistencia de diseño.**

En las gráficas 3 y 4 se muestran la velocidad de pulso ultrasónico de cada una de las caras de las probetas para una carga aplicada de 100% de su resistencia de diseño, de forma perpendicular y paralela a la aplicación de carga. En el ANEXO D se muestran las tablas de velocidad de pulso para la carga aplicada.

Gráfica 3. Velocidad de pulso ultrasónico perpendicular a la dirección de la carga



fuente: los autores

En la gráfica 3 se presenta la velocidad de pulso ultrasónico perpendicular a la dirección de la carga en las probetas 2 cara A, probeta 3 cara C, probeta 4 cara A y la probeta 5 cara A; donde se observa una disminución de la VPU en todas las filas debido a la presencia de daño.

Las gráficas 3b y 3d en el intervalo de 0.05 a 0.1m la VPU se encuentra en su punto más bajo, esta variación de la VPU se debe a la presencia de daño en mayor magnitud en esta parte de la probeta; mientras que las gráficas 3a y 3c para ese mismo intervalo presenta un ligero aumento en comparación con las gráficas 3b y 3d.

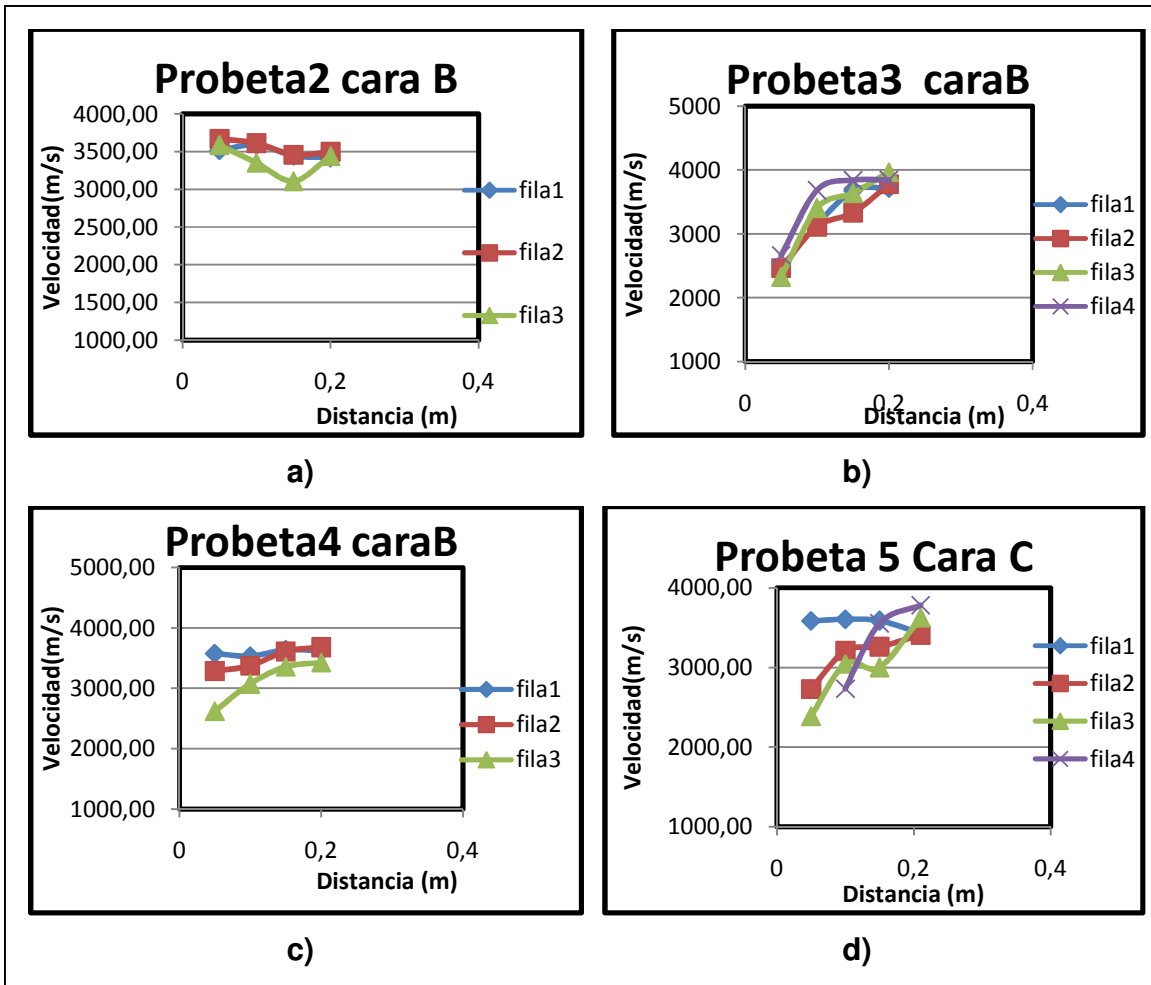
Debido al daño causado por la aplicación de la carga las filas 3 y 4 de la gráfica 3a así como la fila 4 de la gráfica 3c no pudieron ser leídas por VPU.

En la gráfica 4 se presenta la velocidad de pulso ultrasónico paralelo a la dirección de la carga en las probetas 2 cara B, probeta 3 cara B, probeta 4 cara B y la probeta 5 cara C.

En la gráfica 4b se observa una disminución considerable de la VPU en todas las filas de la probeta en el intervalo 0.05 a 0.1m debido a que el daño es mayor en esta zona, en comparación con el intervalo de 0.1 a 0.2m en el que se aprecia un aumento de la VPU.

La gráfica 4d se observa que la VPU en las filas 2, 3 y 4 en el intervalo 0.05 a 0.1m estuvo entre los 2000 y 3000 m/s, zona en la cual se presenta mayor daño en la probeta por la disminución de la velocidad, mientras que VPU de la fila 1 se mantuvo constante entre 3500 y 4000m/s, siendo esta la zona menos afectada por las grietas. La cara B no permitió la toma de datos por exceso de daño.

Gráfica 4. Velocidad de pulso ultrasónico paralela a la dirección de la carga



fuelle: los autores

Para la gráfica 4c en el intervalo 0.05 a 0.1, la fila 3 presenta una disminución de la VPU entre 2000 y 3000 m/s, de esta manera solo en este punto se presenta un daño considerable. La fila 4 no permitió la toma de datos al igual que la cara C por el exceso de daño.

Como se pudo observar, las gráficas 3 y 4 muestran los resultados obtenidos de la velocidad de pulso ultrasónico versus la distancia, en las diferentes filas realizadas a las probetas sometidas a una carga del 100% de su resistencia de diseño. Se aprecia una variación considerable en la velocidad de pulso en comparación con las probetas sometidas a una carga del 50%, debido a las presencias de grietas en la superficie como en el interior.

Estas variaciones de velocidad nos indica la presencia de grietas y el estado de la probeta, entre más baja sea la velocidad nos indica la magnitud del daño en este caso la mayor cantidad de grietas.

Este cambio de la velocidad se debe a que la onda de pulso ultrasónico viaja a través del concreto y al encontrar una interface aire-concreto, se presenta una transmisión de energía nula a través de dicha interface. Por esta razón, cualquier grieta o vacío llenos con aire, localizados entre dos transductores obstruye la señal ultrasónica directa haciendo que el pulso sea difractado alrededor de la periferia del defecto y el tiempo de tránsito es mayor que en un concreto similar sin defectos.

Las lecturas de velocidad de pulso tomadas paralelas a la dirección de la carga, como en la gráfica 4, se observó menor disminución de la VPU con relación a la VPU tomada perpendicular a la dirección de la carga como se muestra en la gráfica 3. Esto nos indica que la toma de lecturas perpendicular a la aplicación de la carga arroja mejores resultados para la detección de daños en muestras de concreto.

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

En esta etapa por medio de la inspección de la matriz y de la caracterización de las grietas se corroboró lo expuestos en el numeral 4.3.3 que respecta a la formación de grietas después de la aplicación de la carga.

4.4.1. Inspección de la matriz de concreto para comprobar el comportamiento ante la carga aplicada

El análisis debido para la aplicación de una carga de 50% y 100% de la resistencia de diseño se muestra a continuación.

- **Carga aplicada: 50% de la carga de diseño.**

En la figura 21 se muestra el corte hecho a una de las probetas que se le aplicó una carga de 50%, para observar el interior.

Figura 21. Inspección para una probeta al 50% de carga aplicada



Fuente: los autores

En estas imágenes se puede corroborar lo expuesto anteriormente, la carga no causó un daño trascendental en la probeta, es decir, no hubo formación de grietas que alteraran considerablemente la toma del tiempo de vuelo de la onda de pulso ultrasónico.

- **Carga aplicada: 100% de la carga de diseño.**

En la figura 22, se observa el corte realizado en una de las probetas después de la aplicación de la carga del 100%, para observar el posible daño en su interior.

Figura 22. Inspección para una probeta al 100% de carga aplicada.



Fuente: los autores

En la figura anterior se puede detallar claramente la formación de la grieta en el interior de la probeta al ser sometida a una carga de 100%, como esta se va desplazando hacia el centro de la probeta y hacia un costado ocasionando un gran daño en el material. Esto hace que la lectura de tiempo de vuelo sea mayor que cuando no se le había aplicado carga o cuando se le aplicó una carga de 50%.

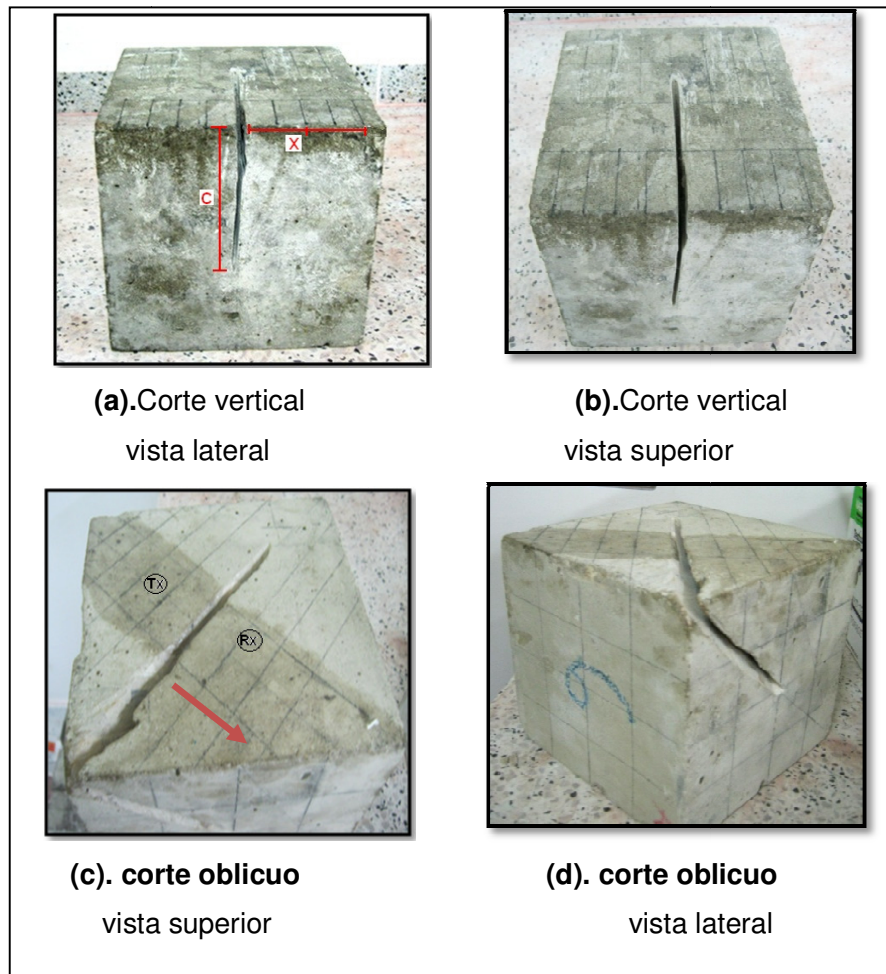
En las figura 22, la aplicación del 100% de la carga máxima de diseño, se puede corroborar la formación de grietas en forma extensional, observándose así los aumentos de velocidad de pulso para aquellas probetas cuya carga aplicada era perpendicular, mientras que aquellas donde la carga aplicada era paralela la VPU disminuía notablemente por lo tanto había gran presencia de daño y al

inspeccionar la matriz de concreto se puede comprobar con toda certeza que las grietas están presentes.

4.4.2. Caracterización de las grietas

Se tomaron dos probetas patrón, a una de ella se le realizó un corte perpendicular a la superficie con el objetivo de simular la grieta ver figura 23(a), (b) y a la otra un corte oblicuo con una inclinación de 45° ver figura 23(c), (d). Empleando el método indirecto por velocidad pulso ultrasónico se estimó la profundidad y la inclinación de la grieta en cada probeta respectivamente.

Figura 23. Caracterización de las grietas



Fuente: los autores

El corte realizado perpendicular a la superficie fue de dimensiones 12 cm de largo por 10cm de profundo. Se trazó una guía de 2cm en la superficie de la probeta para hacer las respectivas lecturas. Se colocaron los transductores uno a cada lado de la fisura a una distancia $X_1 = 4\text{cm}$ y repitiendo la lectura al doble de la distancia inicial $X_2 = 8\text{cm}$ (ver tabla 14) [35].

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$t_1 (\mu s) \rightarrow X_1 = 4 \text{ cm}$$

$$t_2 (\mu s) \rightarrow X_2 = 8 \text{ cm}$$

Tabla 14. Medida de profundidad de la grieta

Tiempo (μs)	Distancia (cm)
$t_1 = 54.3$	$X_1 = 4$
$t_2 = 62.4$	$X_2 = 8$

Fuente: los autores

$$C = X_1 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}}$$

C: profundidad

X: distancia (cm)

t: tiempo (μs)

$$C = 4 \sqrt{\frac{4(54.3)^2 - (62.4)^2}{(62.4)^2 - (54.3)^2}}$$

$$C = 4 \sqrt{\frac{7900.2}{945.27}}$$

$$C = 11.56 \text{ (cm)}$$

Para determinar la inclinación se colocaron los transductores a los lados de la grieta, luego se realizó tres lecturas del tiempo de tránsito de la onda alejando el transductor receptor a unas distancias de 2 cm, 4cm y 6 cm a partir del centro de la grieta [35].

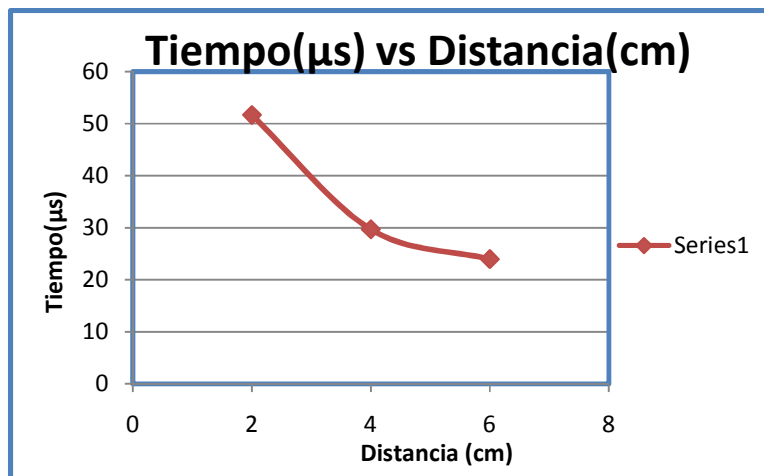
Se presentó una reducción en el tiempo de transito del pulso cuando el transductor fue movido hacia la derecha de la grieta como se observa en la tabla 15, estos nos indica que la pendiente de la grieta se dirige hacia dicho transductor receptor (ver grafica 5).

Tabla 15. Medida de la inclinación de la grieta

	$X_1=2\text{cm}$	$X_2=4\text{cm}$	$X_3=6\text{cm}$
T(μs)	52.8	29.9	24.6
	50.6	29.5	23.3
T(μs) promedio	51,7	29,7	23,95

Fuente: los autores

Gráfica 5. Inclinación de la grieta.



Fuente: los autores

5. CONCLUSIONES

Partiendo de los resultados obtenidos experimentalmente antes y después de la aplicación de la carga en un concreto sin refuerzo de relación agua/cemento 0.5, curado en condiciones estándar de temperatura y secado al aire se puede concluir que:

Para las probetas que no se le aplicó carga y para aquellas donde la carga aplicada era del 50% de su resistencia de diseño, la inspección visual permitió corroborar la ausencia de daño al momento de realizar el corte; mientras que para las probetas a las que se le aplicó una carga del 100% de la resistencia de diseño permitió el análisis de la defectología, presentándose en su mayoría grietas extensionales como lo reporta la literatura.

La VPU medida en probetas sin aplicación de carga se mantuvo relativamente constante en el intervalo de 3750 y 4000 m/s, lo cual indica que se trata de un concreto homogéneo y de buena calidad según la bibliografía consultada.

Los valores de VPU obtenidos para las probetas con el 50% de carga aplicada, se encontraran en el intervalo entre 3500 y 4000 m/s mostrando solo ligeros cambios, debido probablemente a la presencia de microfisuras en la matriz del concreto.

Las probetas a las cuales se les aplicó carga del 100% de su resistencia de diseño, presentaron variaciones significativas en la VPU, asociado a la presencia de daño (grieta). Esto se pudo verificar por inspección visual a las probetas tanto en la superficie como en su interior, gracias a los cortes transversales ejecutados.

En cuanto al efecto de la aplicación de la carga sobre la VPU, la investigación permitió determinar que las medidas de VPU tomadas en dirección perpendicular a la carga aplicada son más sensibles que aquellas tomadas en dirección paralela, lo cual está asociado a la orientación de la defectología.

La profundidad de la grieta simulada (corte vertical) se determinó con un porcentaje de error del 3.8%, y se encontró la correcta orientación de la grieta inclinada (corte oblicuo).

Se dispone de un método preliminar para evaluar posibles daños en estructuras de concreto, utilizando las relaciones estudiadas.

6. RECOMENDACIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación se hacen las siguientes recomendaciones:

Desarrollar proyectos en los cuales se pueda relacionar los ensayos destructivos (como resistencia a la compresión, extracción de núcleos) con los ensayos no destructivos VPU) para un concreto con refuerzo y así ampliar el campo de aplicación de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.

Cambiar las dimensiones de las probetas y el tipo de daño mecánico (flexión, torsión, etc.), con el fin de estudiar el comportamiento de la VPU frente a las discontinuidades generadas.

Hacer una buena preparación de las superficies de las probetas para la toma de datos, debido a que superficies irregulares no permiten un buen acople entre los palpadores y el material a evaluar; lo anterior causa una obtención de datos erróneos al momento de hacer el análisis.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** Standard Specification for Portland Cement. ASTM C150-04. USA, 2004.
- [2]. _____. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM C 94/C 94M – 09. USA.
- [3]. _____. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM C597-02. USA, 2003.
- [4]. _____. Standard Test Method for Compressive Strength for Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39-09. USA, 2009.
- [5]. ARIZA D., Diana Marcela; ATUESTA E., Javier Andrés. “Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo”. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Bucaramanga. 2010, p 33.
- [6]. ARIZA D., Diana Marcela; ATUESTA E., Javier Andrés. “Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo”. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Bucaramanga. 2010, p 40.
- [7]. ARQUYS. Architects site. [En línea] Página Web. República Dominicana. <Disponible en: www.arqhys.com>. Visitado en marzo de 2011.
- [8]. Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000, p 11-12.
- [9]. Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000, p 67.
- [10]. Asocreto. Concreto Arquitectónico Como Obtener un Buen Acabado. Primera reimpresión de la tercera edición 2007, p 35.
- [11]. Características del Concreto. Resistencia. [En línea] Página Web. <Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/características%20-resistencia>>. Visitado en mayo de 2011.

- [12]. CORZO P., Laura Angélica; GARCIA D., Johana Ximena. “Relación entre la resistencia a la compresión, porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento”. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2008, p 25.
- [13]. CORZO P., Laura Angélica; GARCIA D., Johana Ximena. “Relación entre la resistencia a la compresión, porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento”. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2008, p 27-29.
- [14]. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. 1ª Edición, 2004, capítulo 5, p 103-134.
- [15]. EL AGUA DEL CONCRETO. <Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/El%20agua%20del%20concreto>>. Visitada en abril de 2011.
- [16]. El curado en la práctica. <Disponible en: www.hormigonerospr.org>. Visitado en mayo de 2011.
- [17]. EQUIPO ULTRASONIDO. Ensayos No Destructivos del Hormigón. <Disponible en: <http://icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.doc>>. Visitado en marzo de 2011.
- [18]. FRAGUADO DEL CONCRETO. <Disponible en: <http://www.arghys.com/construcción/concreto-fraguado.html>>. Visitado en marzo de 2011.
- [19]. ICONTEC 1377(1995).Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [20]. ICA. Curso-Taller de concreto. <Disponible en: www.monografias.com/.../concreto>. Visitado en abril de 2011.
- [21]. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRÁULICO. <Disponible en: http://www.ingeniería.uady.mx/revista/volumen11/influencia_de_la_temperatura.pdf>. Visitado en febrero de 2011.

- [22]. KUMAR MEHTA P; MONTEIRO Paulo J.M, Concrete. Microestructure, properties and materials, Tercera edición. McGraw-Hill. 2006, p 10-15.
- [23]. MALHOTRA V. M. (1985). "Non-destructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources, ottawa, Canada. Septiembre, 2002, p 110.
- [24]. Norma Técnica Colombiana. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis granulométrico. NTC 77 (1995).
- [25]. _____. Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC 78 (1995).
- [26]. _____. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre las partículas de agregado compacto. NTC 92 (1995).
- [27]. _____. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC 121 (1995).
- [28]. _____. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. NTC 176 (1995).
- [29]. _____. Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC 237 (1995).
- [30]. _____. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicos. NTC 321 (1995).
- [31]. _____. Agua para la elaboración de concretos. NTC 3459 (1995).
- [32]. _____. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto. NTC 4325 (1997).
- [33]. SANCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 1996, p 19-24.
- [34]. SANCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 1996, p 131.

- [35]. SANCHEZ de GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 1996, p 133-134.
- [36]. SANCHEZ de GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 1996, p 138.
- [37]. SIKA INFORMACIONES TÉCNICAS. Curado del Concreto. <Disponible en: www.sika.com.co/co-curado_concreto.pdf>. Visitado en abril de 2011.
- [38]. SOLÍS R; MORENO Erick. R William. Predicción de la Resistencia de concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Universidad Autónoma de Yucatán, México. Revista Técnica de ingeniería. Vol. 8, no. 002. (2004), p 41-42.

8. ANEXOS

ANEXO A. Pasos para el diseño de mezcla.

Paso I: SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO: si el asentamiento no se encuentra especificado en la tabla 1 puede escogerse un valor apropiado para la obra. Los valores del asentamiento indicados se aplican cuando la vibración se utiliza en la compactación del concreto. Deben usarse las mezclas con la mínima consistencia que permite una colocación eficiente. Los datos de la tabla deben aumentarse en 2.5 cm cuando se empleen otros métodos de compactación diferentes a la valoración [6].

Tabla 1. Selección de asentamiento

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (Cm)	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
Muy seca	0 – 2.0	Pilotes o vigas prefabricadas de alta resistencia, con vibradores de formaleta.
Seca	2.0 – 3.5	Pavimentos con maquina terminadora vibratoria.
Semi-seca	3.5 – 5.0	Pavimentos, fundaciones de concreto simple y losas poco reforzadas. Colocación con máquinas operadas manualmente.
Media	5.0 – 10.0	Pavimentos compactados a manos, losas medianamente reforzadas, con mediana compactación, columnas, vigas, fundaciones y muros reforzados con vibración.
Húmeda	10.0 – 15.0	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzos. Trabajos donde la colocación sea difícil.

Fuente: asoconcreto s.a

Paso II: SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO

Los agregados bien gradados con mayor tamaño máximo tienen menos vacíos que los de mayor tamaño máximo; por consiguiente, si el tamaño máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta, para un asentamiento dado, los contenidos de cemento y agua disminuirán. En general, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.

En la tabla 2 se dan recomendaciones para la escogencia del tamaño máximo de acuerdo con el tipo de construcción.

La cantidad de cemento requerida para producir una resistencia a la compresión máxima a una edad dada con un determinado agregado variará según sea el tamaño máximo de agregado de la mezcla. Resistencias altas pueden ser obtenidas con altos contenidos de cemento para todos los tamaños de agregado hasta que se alcanza la resistencia máxima, más allá de la cual, la adición de cemento no produce incremento en la resistencia, siendo este valor máximo más alto para agregados de tamaño menor que para los de mayor tamaño [6] [11].

Tabla 2. Tamaños máximos de agregado según el tipo de construcción.

Dimensión mínima de la sección (cm)	Muros reforzados, vigas y columnas. Plg (mm)	Muros sin refuerzos. plg	Losas muy reforzadas. plg	Losas sin refuerzo o poco reforzadas. plg
6 – 15	1/2''(12)–3/4''(19)	3/4''(19)	3/4''(19)-11/2''(38)	3/4''(19)-11/2''(38)
19 – 29	3/4''(19)-11/2''(38)	11/2''(38)	11/2''(38)	11/2''(38)-3''(76)
30 – 74	11/2''(38)-3''(76)	3''(76)	11/2''(38)-3''(76)	3''(76)
75 o más	11/2''(38)-3''(76)	6''(152)	11/2''(38)-3''(76)	3''(76)- 6''(152)

Fuente: asoconcreto s.a

Paso III

ESTIMACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE AGUA (A) Y AIRE

La cantidad de agua (por volumen unitario de concreto) que se requiere para producir un asentamiento dado, depende del tamaño máximo de agregado, de la forma de las partículas y la gradación de los agregados y de la cantidad de aire incluido. La tabla 3 proporciona estimaciones de la cantidad de agua requerida en la mezcla de concreto en función del tamaño máximo de agregado y del asentamiento con aire incluido y sin él.

Para efectos prácticos, se desperdiciará el volumen de aire atrapado; por consiguiente este procedimiento no puede usarse para dosificar mezclas con aire incorporado [6] [9] [11] [14].

Tabla 3. Agua en kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados. Concreto sin aire incluido.

ASOCONCRETO S.A

Asentamiento (cm)	10 mm	13 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	75 mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
8 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire, %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3

Fuente: los autores

Paso IV

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

El concreto debe dosificarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión promedio lo suficientemente alta para minimizar la frecuencia de los resultados de pruebas de resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del concreto, etc.

En la figura 2 aparecen resumidos gráficamente las recomendaciones del código ACI 318-71 para la selección de la resistencia de diseño de la mezcla (f_{cr}) en función de la resistencia estructural (f'_c) y del coeficiente de variación (V) que indica el grado de control de calidad del concreto en la obra para la cual se va a dosificar la mezcla [6].

Tabla 4. Coeficiente de variación para diferentes controles. ASOCONCRETO S.A

CLASE DE OPERACIÓN	GRADO DE CONTROL			
	EXCELENTE	BUENO	REGULAR	POBRE
CONSTRUCCIÓN EN GENERAL	10	10 – 15	15 – 20	20
LABORATORIO	5	5 - 7	7 - 10	10

Fuente: los autores

Paso V

SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO

Tabla 5. Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y la relación agua/cemento.

Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm ²	Relación agua/cemento máxima permisible			
	Concreto sin inclusión de aire		Concreto con inclusión de aire	
	Relación absoluta por peso	litros por saco de cemento de 50 kg	Relación absoluta por peso	litros por saco de cemento de 50 kg
175	0,65	324	0,54	270
210	0,58	293	0,46	230
245	0,51	257	0,40	200
280	0,44	222	0,35	177
315	0,38	191	0,30	151
350	0,31	151	-	-

Fuente: los autores

La relación agua/cemento requerida se determina no solo por los requisitos de resistencia, sino también por los factores con la durabilidad y propiedades para el acabado. Puesto que distintos agregados y cementos producen generalmente resistencias diferentes con la misma relación agua/cemento, es muy conveniente conocer o desarrollar la relación entre la resistencia y la relación agua/cemento de los materiales que se usarán realmente. En ausencia de estos datos, se pueden tomar los valores de la tabla 5, que, aunque aproximados, son relativamente seguros para concretos que contengan cemento portland Tipo I [6] [11].

Paso VI

CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones hechas en los pasos 3 y 4: el contenido de cemento requerido es igual al contenido estimado de agua en la mezcla (paso 3), dividido por la relación agua/cemento (paso 5) [6].

$$CONTENIDO DE CEMENTO C = \frac{A}{A/C}$$

Paso VII

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DEL AGREGADO GRUESO

Los agregados que tengan esencialmente la misma granulometría y tamaño máximo, producirán un concreto de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen determinado de agregado grueso seco y compactado, por un volumen unitario de concreto. Los valores apropiados de este volumen de agregados se dan en la tabla 6. Se puede observar que para igual manejabilidad, el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto depende solamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino [6] [11] [14].

El volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto se obtiene multiplicando el volumen seco y compactado obtenido de la tabla, por la relación entre la masa unitaria compactada y la densidad aparente seca del agregado.

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

En donde:

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

$\left(\frac{b}{b_0}\right)$ = volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto (se obtiene de la tabla 6)

b_0 = relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado [6] [11].

Tabla 6. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. ASOCONCRETO S.A.

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.			
	2,40	2,60	2,80	3.00
10	0,50	0,48	0,46	0,44
13	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,81	0,79	0,77	0,75
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: los autores

Paso VIII

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGREGADO FINO

Al terminar el paso anterior, todos los ingredientes del concreto están estimados, a excepción del agregado fino. Esta cantidad se determina por la diferencia entre el volumen total de la mezcla (1m^3) y la suma de los volúmenes de cemento, agua y agregado grueso. Para facilitar el cálculo de las proporciones y los ajustes

posteriores, el contenido de agregado fino se expresa en porcentaje con respecto al volumen total de agregados:

$$P = \frac{CK - 1000b}{CK} \times 100$$

En donde:

P = % de agregado fino

CK = 1000 – 0,318C – A : volumen total de agregados [6] [11].

ANEXO B. Gráficas correspondientes de las caras de cada probeta antes de la aplicación de la carga.

A continuación se muestran las tablas de las caras A de las probetas 1, 2 y 3 donde se calcula el promedio de la velocidad para cada una y se toman como ejemplo para el cálculo de las demás probetas.

Tabla 1. Cara A de la probeta 1.

Probeta 1					
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s	%ERROR <1 T
1	50	50,2	0,0000501	3852,30	0,40
2	50,2	50,6	0,0000504	3829,37	0,79
3	50,7	50,3	0,0000505	3821,78	0,79
4	51,1	50,7	0,0000509	3791,75	0,78
5	51,1	50,8	0,00005095	3788,03	0,59
6	51,2	50,9	0,00005105	3780,61	0,59
7	51,4	51,3	0,00005135	3758,52	0,19
8	51,9	51,7	0,0000518	3725,87	0,39
9	52	51,8	0,0000519	3718,69	0,38
10	51,2	51,4	0,0000513	3762,18	0,39
11	51,9	51,8	0,00005185	3722,28	0,19
12	52	51,9	0,00005195	3715,11	0,19
13	51,6	51,4	0,0000515	3766,99	0,39
14	51,7	51,6	0,00005165	3756,05	0,19
15	51,9	52	0,00005195	3734,36	0,19
16	51,8	51,4	0,0000516	3759,69	0,77

Tabla 2. Cara A de la probeta 2.

Probeta 2					
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s	%ERROR <1 T
1	52,7	52,8	0,00005275	3829,38	0,19
2	52,4	52,6	0,0000525	3847,62	0,38
3	52,7	52,8	0,00005275	3829,38	0,19
4	52,2	52,6	0,0000524	3854,96	0,76
5	52,5	52,3	0,0000524	3854,96	0,38
6	52,5	52,6	0,00005255	3843,96	0,19
7	52,3	52,7	0,0000525	3847,62	0,76
8	52,6	52,7	0,00005265	3836,66	0,19
9	51,6	51,8	0,0000517	3907,16	0,39
10	51,8	51,7	0,00005175	3903,38	0,19
11	51,9	52,2	0,00005205	3880,88	0,57
12	52,3	52,2	0,00005225	3866,03	0,19
13	50,5	50,9	0,0000507	4003,94	0,79
14	51,2	51,2	0,0000512	3964,84	0,00
15	51,3	51,2	0,00005125	3960,98	0,19
16	50,9	51,1	0,000051	3980,39	0,39

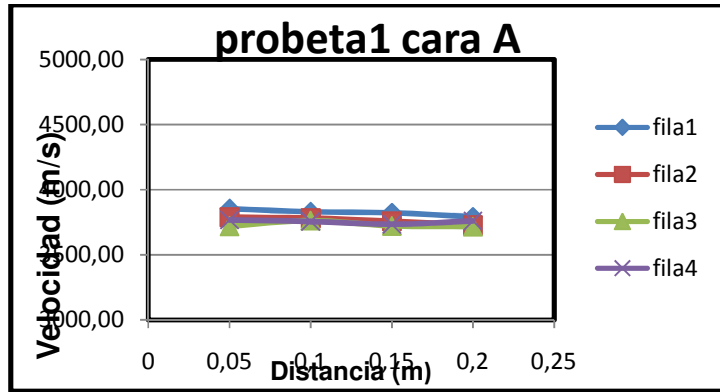
Fuente: los autores

Tabla 3. Cara A de la probeta 3.

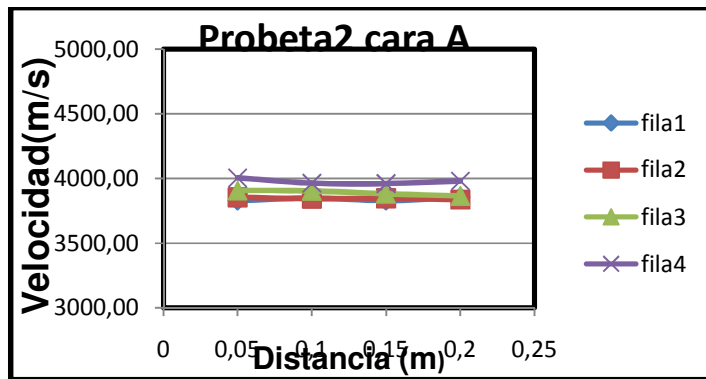
Probeta 3					
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s	%ERROR <1 T
1	49,3	49,4	0,00004935	4072,95	0,20
2	49,9	49,7	0,0000498	4036,14	0,40
3	50	49,9	0,00004995	4024,02	0,20
4	49,7	49,8	0,00004975	4040,20	0,20
5	49,9	50,2	0,00005005	4015,98	0,60
6	49,6	49,8	0,0000497	4044,27	0,40
7	50,3	50,1	0,0000502	4003,98	0,40
8	49,1	49,2	0,00004915	4089,52	0,20
9	50,2	49,9	0,00005005	3996,00	0,60
10	49,9	49,6	0,00004975	4020,10	0,60
11	49,3	49,4	0,00004935	4052,68	0,20
12	49,1	49,2	0,00004915	4069,18	0,20
13	49,6	49,7	0,00004965	4008,06	0,20
14	50	49,9	0,00004995	3983,98	0,20
15	50	49,9	0,00004995	3983,98	0,20
16	49,1	49,4	0,00004925	4040,61	0,61

Fuente: los autores

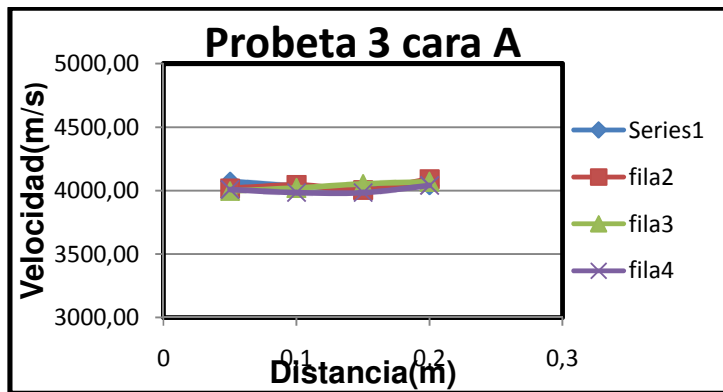
Gráfica 1. Velocidad de pulso ultrasónico promedio



a)



b)



c)

Fuente: los autores

ANEXO C. Tablas y gráficas de velocidad de pulso ultrasónico a probetas después de la aplicación de la carga al 50% de su resistencia de diseño.

A continuación se muestran las tablas de las caras A de las probetas 6, 7 y 8, a las cuales se les aplicó una carga de 50% de su resistencia de diseño donde se calcula el promedio de la velocidad para cada una y se toman como ejemplo para el cálculo de las demás probetas.

Tabla 1. Cara A de la probeta 6

Probeta 6				
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s
1	51,2	51,7	0,00005145	3867,83
2	51,4	51,1	0,00005125	3882,93
3	51,3	50,9	0,0000511	3894,32
4	51,4	51,2	0,0000513	3879,14
5	52	51,9	0,00005195	3849,86
6	50,5	50,6	0,00005055	3956,48
7	50,3	50,2	0,00005025	3980,10
8	52,1	51,8	0,00005195	3849,86
9	52	51,9	0,00005195	3830,61
10	52,6	52	0,0000523	3804,97
11	52,9	52,3	0,0000526	3783,27
12	51,9	52,3	0,0000521	3819,58
13	51,3	51,1	0,0000512	3886,72
14	50,8	51,2	0,000051	3901,96
15	52,9	53,2	0,00005305	3751,18
16	49,7	49,9	0,0000498	3995,98

Fuente: los autores

Tabla 2. Cara A de la probeta 7

Probeta 7				
Cara A- A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s
1	52,2	52,2	0,0000522	3831,42
2	53	52,9	0,00005295	3777,15
3	53,3	53,5	0,0000534	3745,32
4	53,8	53,9	0,00005385	3714,02
5	53,7	53,4	0,00005355	3734,83
6	53,6	53,8	0,0000537	3724,39
7	54,1	54	0,00005405	3700,28
8	55,5	54,6	0,00005505	3633,06
9	55,3	54,9	0,0000551	3611,62
10	54,1	54	0,00005405	3681,78
11	53,5	53,7	0,0000536	3712,69
12	54,5	54,5	0,0000545	3651,38
13	54,9	55,2	0,00005505	3614,90
14	54,4	54,1	0,00005425	3668,20
15	54,1	53,9	0,000054	3685,19
16	53,6	53,7	0,00005365	3709,23

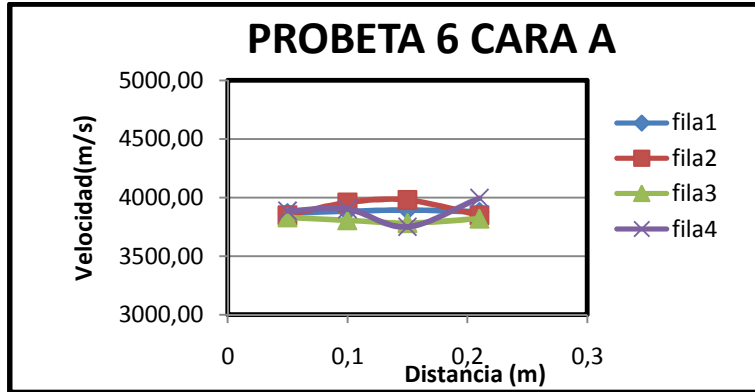
Fuente: los autores

Tabla 3. Cara A de la probeta 8

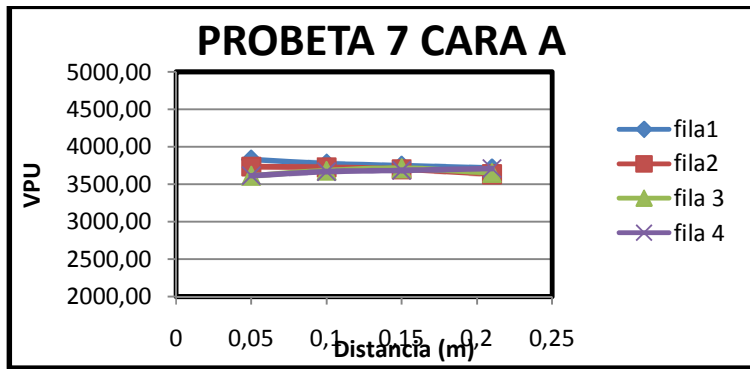
Probeta 8				
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s
1	50,2	50,5	0,00005035	3912,61
2	50	50,7	0,00005035	3912,61
3	51,8	51,9	0,00005185	3799,42
4	52,7	52,5	0,0000526	3745,25
5	58,8	58,2	0,0000585	3384,62
6	52	51,9	0,00005195	3811,36
7	51,5	50,8	0,00005115	3870,97
8	53,4	53,5	0,00005345	3704,40
9	64,1	63,4	0,00006375	3105,88
10	68,7	68,2	0,00006845	2892,62
11	66,1	65,4	0,00006575	3011,41
12	60,6	59,5	0,00006005	3297,25
13	54,5	56,6	0,00005555	3600,36
14	54,7	54,5	0,0000546	3663,00
15	55,7	54,7	0,0000552	3623,19
16	61,3	61,7	0,0000615	3252,03

Fuente: los autores

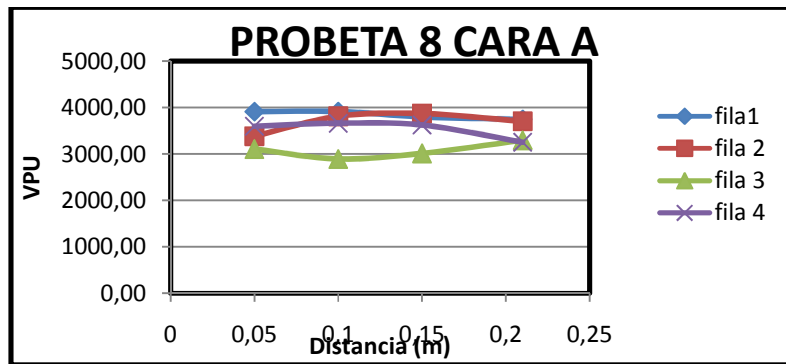
Gráfica 1. Velocidad de pulso ultrasónico



a)



b)



c)

Fuente: los autores

ANEXO D. Tablas de velocidad de pulso ultrasónico a probetas después de la aplicación de la carga al 100% de su resistencia de diseño.

A continuación se muestran las tablas de las caras A de las probetas 2, 4 y 5, a las cuales se les aplicó una carga de 100% de su resistencia de diseño donde se calcula el promedio de la velocidad para cada una y se toman como ejemplo para el cálculo de las demás probetas.

Tabla 1. Cara A de la probeta 2

Probeta 2				
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s
1	71,9	72	0,00007195	2807,51
2	85,4	84,6	0,000085	2376,47
3	75,7	76,3	0,000076	2657,89
4	67,9	69,2	0,00006855	2946,75
5	92,2	93	0,0000926	2181,43
6	89,1	88,3	0,0000887	2277,34
7	85,8	88,5	0,00008715	2317,84
8	78,8	80	0,0000794	2544,08
9	0	0	0	0,00
10	0	0	0	0,00
11	0	0	0	0,00
12	0	0	0	0,00
13	0	0	0	0,00
14	0	0	0	0,00
15	0	0	0	0,00
16	0	0	0	0,00

Fuente: los autores

Tabla 2. Cara A de la probeta 4

Probeta 4				
Cara A- A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s
1	54,5	54,9	0,0000547	3619,74
2	60,8	60,5	0,00006065	3264,63
3	63,3	65	0,00006415	3086,52
4	61,9	62,3	0,0000621	3188,41
5	73,8	73,3	0,00007355	2692,05
6	73,6	73,2	0,0000734	2697,55
7	87,3	87,9	0,0000876	2260,27
8	81,8	81,3	0,00008155	2427,96
9	89	88,2	0,0000886	2246,05
10	89,9	91,2	0,00009055	2197,68
11	134,2	132,5	0,00013335	1492,31
12	0	0	0	0,00
13	0	0	0	0,00
14	0	0	0	0,00
15	0	0	0	0,00
16	0	0	0	0,00

Fuente: los autores

Tabla 3. Cara A de la probeta 5

Probeta 5				
Cara A-A'	Tiempo 1 (μs)	Tiempo2(μs)	Tiempo promedio(s)	Velocidad Promedio m/s
1	162,6	163,1	0,00016285	1246,55
2	89,3	89,7	0,0000895	2268,16
3	73,8	75,2	0,0000745	2724,83
4	59,6	57,9	0,00005875	3455,32
5	160,2	162,1	0,00016115	1259,70
6	108,9	109,2	0,00010905	1861,53
7	84,1	87,1	0,0000856	2371,50
8	99,2	97,1	0,00009815	2068,26
9	209,8	213,5	0,00021165	954,41
10	183,3	188,2	0,00018575	1087,48
11	113,2	111,4	0,0001123	1798,75
12	103,4	109,2	0,0001063	1900,28
13	269,2	272,4	0,0002708	742,25
14	261,8	257,6	0,0002597	773,97
15	89,6	91,2	0,0000904	2223,45
16	98,6	97	0,0000978	2055,21

Fuente: los autores