

**DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN
ARMADO POR MEDIO DEL SOFTWARE DE TOMOGRAFÍA**

**PEDRO ANDRÉS PACHÓN MURCIA
FREDY ALEXANDER VILLAMIL DÍAZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN
ARMADO POR MEDIO DEL SOFTWARE DE TOMOGRAFÍA**

**PEDRO ANDRÉS PACHÓN MURCIA
FREDY ALEXANDER VILLAMIL DÍAZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

**Director:
PhD. LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

A Dios por su fuerza creadora que me permitía día a día continuar, por ser la luz que me ilumina y me señala el camino correcto, fuente de todo conocimiento que me permitió la sapiencia para afrontar los retos de este proceso.

A mi madre Victoria por tener siempre fe en mí y brindarme su apoyo, enseñándome a poner buena cara a las dificultades y sabiendo encontrar en esos momentos de adversidad la felicidad.

A mis hermanos Yovanny, Doris y Nayda por motivarme en cada proyecto emprendido.

A mis sobrinos por ser ese incentivo de salir adelante demostrándoles que todo con esfuerzo dedicación y trabajo se puede lograr.

A mis cuñados Daniel y Alejandro por estar ahí en esos momentos difíciles, cuyos consejos fueron de gran ayuda en mi proceso como persona y profesional

A mi compañero Fredy Alexánder por su gran amistad, apoyo y esfuerzo realizado para la culminación exitosa de esta gran meta.

A USTEDES MI FAMILIA, MIL GRACIAS POR CREER EN MI Y BRINDARME SU APOYO INCONDICIONAL.

PEDRO ANDRÉS PACHÓN MURCIA

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme conseguir este logro y haberme dado la sabiduría para cumplir mis objetivos, además de ser mi apoyo y fortaleza en cada momento.

A mis padres Giraldo Villamil y Martha Díaz, por su apoyo total e incondicional que me ha permitido alcanzar propósitos y metas, entre ellas la de lograr el título de Ingeniero Civil, por sus consejos, esfuerzos, por creer en mí, por la motivación constante que me ha permitido ser una mejor persona, pero más que nada, por su infinito amor.

A mis apreciados hermanos Diego y Dayana, por enseñarme lo importante y valiosa que es la familia, por estar siempre a mi lado apoyándome, por la felicidad que me brindan cada día y por haber depositado en mí tanta confianza.

A mi familia en general, por estar no solo en esta etapa tan importante de mi vida sino en todo momento compartiendo momentos inolvidable, a mi abuelo Ulpiano por sus sabios consejos y porque siempre creyó en mí.

A mi compañero Pedro Andrés por su gran amistad, apoyo y esfuerzo realizado para la culminación exitosa del proyecto.

A mis amigos, en especial a Luis Forero, Jeison Blanco, Jeffer Gualteros, Andersson Salinas, Sandra Caro, Silhi Pineda, Fernando Araque, Iván Cañón, Wilson Peñarete, Derly Gamba, Wilson Torres, Leonardo Jiménez, Rolando González, y Joaquín Villamil, por acompañarme en distintas etapas de mi vida, por permitirme compartir con personas tan valiosas, les doy las gracias por su amistad y afecto. A mi amigo Jonathan Gualteros que aunque ya no está con nosotros sé que desde el cielo me brindó su apoyo.

Finalmente, a todas y cada una de las personas que han hecho parte en mi formación en todos estos años y creen en mí y mis capacidades.

FREDY ALEXÁNDER VILLAMIL DÍAZ.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se logró gracias a la participación y colaboración de personas y entidades como KER INGENIERÍA, quienes estuvieron dispuestos a brindarnos su apoyo y acompañamiento durante las diferentes etapas de este proceso.

A Dios quien hizo posible la culminación de uno de nuestros primeros éxitos.

A Nuestro director y codirector ingenieros, Carlos Ruiz y Luis Eduardo Zapata por la confianza depositada en nosotros, por su apoyo y dirección en este proyecto.

A nuestros docentes, gracias por su tiempo, apoyo y sabiduría que nos transmitieron en el desarrollo de nuestra formación profesional.

A nuestra escuela de Ingeniería Civil y a la Universidad Industrial de Santander.

A nuestras familias por su amor, compañía y comprensión durante toda la experiencia de obtener con gratitud el título de Ingenieros Civiles.

A ustedes MUCHAS GRACIAS.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	22
2. MATERIALES Y EQUIPOS.	30
3. METODOLOGÍA	32
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS	36
4.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	37
4.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA RESPECTO A LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (A/C).	38
4.4 RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD Y LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA DE LAS DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO (A/C).	40
4.5 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EXPERIMENTAL Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN TEÓRICA DE LOS ENSAYOS NDT.	42
4.6 CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA UPV E I.E PARA CADA RELACIONES A/C.	45
4.6.1 Correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de UPV para las diferentes relaciones A/C	47
4.6.2 Correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de I.E para las diferentes relaciones A/C	48
4.6.3 Discusión de resultados	50
4.7 APLICACIONES DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE PROPAGACIÓN DE ONDA.	51

4.7.1 Detección de defectos y uniformidad del concreto en probetas	52
4.7.2 Detección de defectos en el concreto reforzado mediante procesamiento de datos de velocidad de pulso en software de tomografía	54
4.8 DIAGNÓSTICO O EVALUACIÓN DE EDIFICACIONES CONSTRUIDAS ANTES DE LA VIGENCIA DE LA PRESENTE VERSIÓN DEL REGLAMENTO NSR-10.	59
5. CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS.	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama simplificado del sistema de operación del UPV.	25
Figura 2. Diagrama simplificado del sistema de operación del I.E.	26
Figura 3. Dimensiones de vigas fundidas en laboratorio e inducción de defectos	35
Figura 4. Comportamiento de la velocidad de onda UPV en función de la relación A/C	39
Figura 5. Comportamiento de la velocidad de onda I.E en función de la relación A/C	39
Figura 6. Comportamiento de la velocidad de onda UPV e I.E en función de la densidad (ρ) para cada relación A/C	41
Figura 7. Valores resistencia a la compresión experimental y teórica de UPV e I.E para relación A/C=0.58	43
Figura 8. Valores resistencia a la compresión experimental y teórica de UPV e I.E para relación A/C=0.52	43
Figura 9. Valores resistencia a la compresión experimental y teórica de UPV e I.E para relación A/C=0.47	44
Figura 10. Comportamiento de la velocidad de onda UPV e I.E en función de la resistencia a la compresión ($f'c$) para cada relación A/C.	46
Figura 11. Correlación entre resistencia a la compresión y la velocidad de onda UPV para cada relación A/C.	48
Figura 12. Correlación entre resistencia a la compresión y la velocidad de onda de I.E para cada relación A/C.	49
Figura 13. Comportamiento de onda UPV	53

Figura 14. Representación tomográfica de sección de la viga y detección defecto de vacío.	55
Figura 15. Representación tomográfica de sección de la viga sin defectos.	55
Figura 16. Representación tomográfica de sección de la viga y detección defecto cavidad con agua.	55
Figura 17. Influencia de las barras de acero en la velocidad de pulsos de ultrasonido.	58

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros del sistema eléctrico a compensar	23
Tabla 2. Caracterización de materiales.	30
Tabla 3. Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.	33
Tabla 4. Tamaño de muestra día 28, resistencia de $f'c = 21$ MPa.	33
Tabla 5. Tamaño de muestra de probetas en el día 28 para las resistencias de 21MPa, 24MPa y 28MPa.	34
Tabla 6. Resistencia a la compresión promedio de las probetas de concreto ensayadas.	37
Tabla 7. Velocidad de onda promedio de las probetas de concreto ensayadas.	38
Tabla 8. Densidad promedio de las probetas de concreto ensayadas para cada relación A/C	41
Tabla 9. Porcentajes de error de Resistencia a la compresión experimental y teóricas de la NSR-10 a partir de ensayos no destructivos.	42
Tabla 10. Resistencia a la compresión promedio de las probetas de concreto ensayadas y velocidad de UPV e I.E para cada relación A/C.	45
Tabla 11. Ecuación de resistencia a la compresión teórica en función de la velocidad de UPV para cada relación A/C.	47
Tabla 12. Ecuación de resistencia a la compresión teórica en función de la velocidad de I.E para cada relación A/C.	49
Tabla 13. Porcentajes de error de resistencia a la compresión experimental y teóricas. A partir de ensayos no destructivos.	50

Tabla 14. Velocidad de onda UPV, densidad y resistencia a la compresión de probetas defectuosas inducidas en laboratorio.	52
Tabla 15. Incrementos de velocidad UPV con la presencia de acero de refuerzo.	57
Tabla 16. Ventajas y desventajas de la Velocidad de Pulso de Ultrasonido	61

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Caracterización de materiales suministrados por la empresa CEMEX COLOMBIA S.A, seccional Bucaramanga, para ejecución de proyecto. Datos para diseño de mezcla ACI 211.	75
ANEXO B. Diseños de mezcla siguiendo el método de volumen absoluto especificado en la ACI 211 para cada relación A/C: 0.47, 0.52, 0.58.	76
ANEXO C. Valores de resistencia, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.	77
ANEXO D. Valores de resistencia, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado.	78
ANEXO E. Valores de resistencia, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.	79
ANEXO F. Valore de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de UPV para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	80
ANEXO G. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de UPV para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	81
ANEXO H. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de UPV para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	82
ANEXO I. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de I.E para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	83

ANEXO J. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de I.E para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	84
ANEXO K. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de I.E para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	85
ANEXO L. Valores de resistencia a la compresión teórica de UPV, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.	86
ANEXO M. Valores de resistencia a la compresión teórica de UPV, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado.	87
ANEXO N. Valores de resistencia a la compresión teórica de UPV, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.	88
ANEXO O. Valores de resistencia a la compresión teórica de I.E, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.	89
ANEXO P. Valores de resistencia a la compresión teórica de I.E, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado.	90
ANEXO Q. Valores de resistencia a la compresión teórica de I.E, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.	91
ANEXO R. Valores de velocidad UPV, resistencia a la compresión y densidad en probetas defectuosas inducidas en laboratorio para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.	92
ANEXO S. Valores de velocidad UPV, resistencia a la compresión y densidad en probetas defectuosas inducidas en laboratorio para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.	93

ANEXO T. Valores de velocidad UPV en vigas con y sin refuerzo y porcentaje de incremento de velocidad debido a la presencia de refuerzo. Datos tomados en dirección perpendicular a las barras de acero. 94

ANEXO U. Valores de velocidad UPV en vigas con y sin refuerzo y porcentaje de incremento de velocidad debido a la presencia de refuerzo. Datos tomados en dirección perpendicular a las barras de acero. 95

RESUMEN

TÍTULO: Detección de defectos internos en elementos de hormigón armado por medio del software de tomografía.

AUTORES: PEDRO ANDRÉS PACHÓN MURCIA.**
FREDY ALEXANDER VILLAMIL DÍAZ.

PALABRAS CLAVE: Tomografía del concreto, técnicas no destructivas, velocidad de pulso ultrasónico, Impact echo, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, atenuación, anisotropía.

DESCRIPCIÓN

El objetivo de esta investigación es evaluar la estructura interna de elementos de hormigón en busca de defectos que puedan alterar la resistencia a compresión, esto mediante técnicas no destructivas (NDT) e implementación del software de tomografía GEOTOM CG y así visualizar estas atenuaciones en imágenes espectrales 2D, además determinar la importancia de este tipo de técnicas y herramientas en la evaluación y diagnóstico estructural de edificaciones tanto antiguas como nuevas. La porosidad depende directamente de la relación agua/cemento (A/C) y es el factor que más influye en la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso de ultrasonido. Para la investigación se elaboraron probetas de concreto con distintas relaciones A/C (0,47; 0,52; 0,58) ensayadas a los 28 días de fraguado tiempo en el que alcanza la resistencia de diseño, las velocidades de propagación de onda se obtienen por medio los ensayos de velocidad de pulso de ultrasonido (UPV) e Impact Echo (I.E) y de esta forma hallar la correlación entre estos ensayos y la resistencia a compresión axial. Además se elaboraron vigas con y sin refuerzo bajo las mismas condiciones de laboratorio y diseños de mezcla de las probetas, induciendo defectos para toma de datos de UPV e interpretación de los mismos en el software en 2D, luego de identificar la presencia de acero de refuerzo en la toma de datos de pulso de ultrasonido.

El estudio logró determinar que los ensayos no destructivos de ultrasonido en el concreto dan resultados importantes, principalmente acerca de las condiciones de las estructuras de concreto y obtener un indicio de la resistencia fue también parte de ellos, la interpretación de resultados es una herramienta importante en la evaluación y diagnóstico de estructuras.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. LUIS Eduardo Zapata Orduz

ABSTRACT

TITLE: Detection of internal defects in reinforced concrete using software scan.*

AUTHORS: PEDRO ANDRÉS PACHÓN MURCIA.**
FREDY ALEXANDER VILLAMIL DÍAZ.

KEYWORDS: Positron concrete, non-destructive techniques, ultrasonic pulse velocity, impact fact, elastic modulus, compressive strength, attenuation, anisotropy.

DESCRIPTION

The objective of this research is to evaluate the internal structure of concrete products for defects that could alter the compressive strength, this means non-destructive techniques (NDT) and implementation of software GEOTOM tomography CG and them visualize these relaxations in spectral images 2D also determine the importance of these techniques and tools in the assessment and diagnosis of structural buildings both old and new. Porosity depends directly on the water / cement (A/C) ratio and is the factor that most influences the compressive strength and ultrasonic pulse velocity. For research were prepared concrete test tube with different ratios A / C (0.47; 0.52; 0.58) assayed at 28 days curing time when it reaches the design strength, the wave propagation velocities are obtained by testing ultrasound pulse rate (UPV) and Impact Echo (IE) and thus find the correlation between these tests and the resistance to axial compression. Moreover were prepared beams with and without reinforcement under the same laboratory conditions and mix designs test tube, inducing defects for data collection and interpretation of UPV thereof in 2D software, after identifying the presence of reinforcing steel in making ultrasound pulse data.

The study was able to determine that non-destructive testing of Ultrasound in particular give significant results, mainly about the conditions of concrete structures and get an indication of resistance was also part of them, interpretation of results is an important tool in assessment and diagnosis of structures.

* Work degree

** School of Physics and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: PhD. Luis Eduardo Zapata Orduz

INTRODUCCIÓN

Las estructuras y elementos en concreto tienen una importancia significativa en los avances constructivos a nivel mundial y en el país sin duda el concreto es el material más empleado en proyectos de ingeniería desde pequeñas edificaciones hasta mega construcciones ^[1]. Siendo tanta su importancia, es necesario garantizar que el concreto satisfaga con los aspectos que se especifican en los proyectos y así prolongar su vida de servicio. La calidad del concreto está condicionada a variables como el origen, tipo y tamaño de los agregados, la humedad, el tipo y origen del cemento, la relación agua/cemento y los aditivos adicionados a las mezclas si su uso lo requiere ^[2]. Una de las maneras de verificar estos aspectos, es mediante el estudio de su estructura interna una vez fraguado el concreto, para verificar que estas variables no afecten su resistencia a compresión causadas por defectos que se originan en el interior del concreto.

Para localizar los defectos o atenuaciones en el interior del concreto como son vacíos, fisuras, hormigueos entre otros, se recomienda un análisis sin dañar la estructura, contrario a algunas técnicas como ensayos de laboratorio destructivos o a la extracción de núcleos que alteren la estructura. Por esta razón se acude a las llamadas

Técnicas No Destructivas (NDT) para determinar la resistencia y calidad del concreto, entre las que se destacan inspección visual, el esclerómetro, la pistola de Windsor entre otros ^[3]. Entre las más novedosas NDT se encuentran las pruebas con ondas ultrasónicas y otros sistemas especializados que usan como base la misma tecnología como el software de tomografía ^[4]. En la actualidad las NDT basadas en la propagación de ondas ultrasónicas sirven de apoyo importante en la evaluación e intervención de edificaciones construidas antes de la vigencia

de la Norma Sismo resistente colombiana (NSR-10) ^[6], ya que además de realizar un análisis sin afectar la estructura, con estos ensayos se obtiene mediciones de velocidad de onda la cual es una variable importante correlacionada con la resistencia y módulo de elasticidad de la estructura, de este modo ayuda en gran parte a evaluar la vulnerabilidad sísmica y rehabilitar el sistema estructural de edificaciones existentes si se requiere.^[5,6]

De los estudios realizados anteriormente se encontró que la relación A/C fue la principal fuente de varianza, tanto en la velocidad como en la resistencia, por encima de otros factores que también influyen en los resultados como son del tipo de agregado y cemento, por lo tanto a ella se puede atribuir la correlación entre estas variables.^[7]

Partiendo de lo anterior, para la presente investigación se priorizó en la relación A/C como principal factor que influye en las velocidades obtenidas en el concreto y su resistencia a compresión por estar relacionada directamente en la porosidad de la mezcla.

El software de tomografía es una herramienta que tiene como principio la interpretación de los datos de pulso de velocidad obtenidos en los ensayos no destructivos de UPV, conociendo el tiempo de viaje y las distancias recorridas (trayectorias de ondas) se calculan las velocidades de propagación de las ondas (V_p) y se obtienen los modelos de distribución. El software permite obtener imágenes espectrales 2D de la distribución de (V_p) del interior del elemento estructural para de esta manera localizar defectos internos como vacíos, hormigueros u objetos ajenos a la mezcla representados mediante espectros de velocidad ^[8]. Brindando una herramienta de apoyo en la evaluación y diagnóstico estructural de edificaciones tanto antiguas como nuevas para el control de calidad de las mismas durante su construcción.

1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Las pruebas basadas en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico son una alternativa para evaluar la calidad del concreto y obtener de una forma simple información veraz de este material. En 1949 Leslie y Cheesman desarrollaron la técnica de medición de pulso ultrasónico como medio de diagnóstico para conocer las condiciones del concreto, siendo utilizadas hace aproximadamente 60 años ^[9]. Pocos años después en 1953 Parker encontró la dependencia de la velocidad de pulso con las propiedades elásticas del medio, sugiriendo que partiendo del conocimiento de la velocidad del sonido y la masa del sólido, se puede estimar las propiedades elásticas del medio, permitiendo así relacionar las mismas con los parámetros de calidad del material. Así mismo Parker determino:

'Una relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a compresión en el concreto'^[10].

A partir de los estudios, Malhotra en 1985 ^[11] publicó un criterio de aceptación del concreto basándose en la medida de la velocidad de pulso ultrasónico, clasificando la calidad del mismo como excelente, bueno, cuestionable, pobre y muy pobre en intervalos de velocidad como se muestra en la Tabla 1, haciendo de su aplicación un medio de evaluación preliminar y de este modo dar un punto de comparación con las técnicas destructivas de resistencia a la compresión uniaxial, llevada a cabo después de este procedimiento.

Tabla 1. Parámetros del sistema eléctrico a compensar

Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman	
Velocidad de la onda (m/s)	Condición del concreto
Más de 4570	Excelente
De 3050 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Dudosa o Regular
De 2130 a 3050	Pobre
Menos 2130	Muy pobre

Alrededor de la misma época Anderson y Seals (1981) y Sturup (1984) y durante los años siguientes otros investigadores han intentado desarrollar modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión uniaxial del concreto con base a la velocidad de pulso de ultrasonido obteniendo como resultado *modelos diferentes entre sí*, pero con una tendencia de velocidades cercana lo cual se cree se debe al carácter heterogéneo del material y la gran cantidad de factores que intervienen en el diseño de mezcla. Una conclusión a la que se ha llegado en todos los modelos desarrollados, es que el factor que más influye en la velocidad de pulso y la resistencia es la relación A/C que define las proporciones de la mezcla y la resistencia de diseño del concreto y está directamente relacionada con la porosidad. ^[11]

Todos los estudios han encontrado una relación existente entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto, lo cual permite considerar a esta técnica no destructiva como una buena alternativa en el estudio del comportamiento de este material y poder ser una herramienta útil en la evaluación y diagnóstico de estructuras en la actualidad. ^[7]

Actualmente, las técnicas no destructivas están evolucionando y la investigación de los mismos continúa para mejorar los métodos existentes y desarrollar nuevos métodos. El *método de onda de tensión para el análisis de estructuras* es el fundamento de técnicas como el UPV y el I.E los cuales se encuentran estandarizados y avalados por el Instituto Americano de Concreto (ACI) dentro de sus normativas mediante el ACI 228 [12].

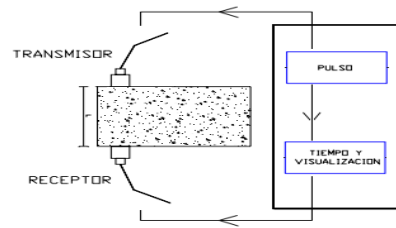
La técnica del UPV y el I.E permiten conocer la velocidad de propagación (C_p) de la onda en un material o medio sólido. Estos ensayos calculan de forma distinta estos valores de velocidad.

Así mismo estas velocidades están directamente relacionadas a las propiedades del material o medio de propagación tales como el coeficiente de poisson (ν), el módulo de elasticidad (E) y la densidad (ρ), partiendo de esto la ACI 228 propone la Ec. (1)

$$C_p = \frac{E}{\rho} * \frac{(1-\nu)}{(1-\nu)(1+2\nu)} \quad (1)$$

En los ensayos UPV, se sitúan sobre el elemento a analizar dos transductores, un transductor emisor, y otro transductor receptor como se observa en la figura1, el primero produce las vibraciones, que atraviesan el material como impulsos ultrasónicos, que luego son detectados por el transductor receptor, que convierte dichos impulsos de vibraciones en señales eléctricas, que son amplificadas y registradas en un instrumento que contabiliza el tiempo [13].

Figura 1. Diagrama simplificado del sistema de operación del UPV.



Conocida la longitud del elemento de ensayo, se puede calcular la velocidad del pulso ultrasónico a través del material haciendo uso de la Ec. (2).

$$C_p = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Dónde:

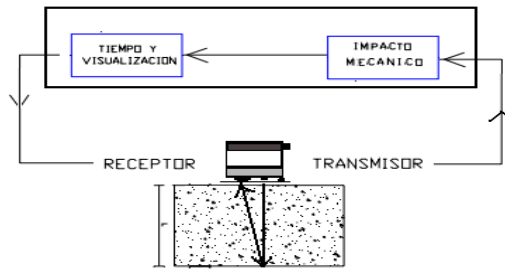
C_p = Velocidad pulso (m/s)

L = Distancia entre transductores $\text{cm} * 10^4$

t = Lectura del tiempo microseg .

Por otra parte para el ensayo de I.E es una técnica muy reciente y se basa en el uso de ondas de tensión transitorios generados por impacto elástico. Un impacto mecánico de corta duración, producido tocando una pequeña esfera de acero contra una superficie de hormigón o mampostería, se utiliza para generar ondas de tensión de baja frecuencia con valores de entre 20 a 25 kHz que se propagan en la estructura y se reflejan como se observa en la figura 2 esto por defectos y/o superficies externas ^[14].

Figura 2. Diagrama simplificado del sistema de operación del I.E.



Conocido el espesor del elemento, la trayectoria de la onda está dada por el fenómeno de reflexión así que la velocidad de propagación a través del material se calcula haciendo uso de la Ec. (3).

$$C_p = \frac{2 \cdot L}{t} \quad (3)$$

Dónde:

C_p = Velocidad pulso (m/s)

L = Espesor elemento cm $\cdot 10^4$

t = Lectura del tiempo microseg .

Estudios recientes como el de Ariza y Col. (2010) y Bogas y Col. (2013) ^[9,15] se han realizado en busca de estudiar cuales variables tienen mayor influencia en el valor de la velocidad de onda en el concreto. Estas investigaciones permitieron confirmar que la relación existente entre la velocidad y la A/C; al aumentar el valor de A/C, los valores de velocidad disminuyen sin importar el tamaño de agregado de la mezcla, que para este caso en particular de Ariza y Col era de 19,05mm y 9,5mm. En relación a la edad se comprobó que a partir del día 7 existe un aumento significativo en los valores de velocidad, llegando a su valor mayor en el día 28. Finalmente se concluyó que la A/C es la que mayor efecto tiene sobre la velocidad.

Por otra parte Bogas y Col ^[15], desarrollaron una investigación en la que se analizó la influencia de factores tales como tamaño de agregado, edad del concreto, tipo de agregado y A/C. y se realizó un análisis individual de cada variable con el fin de ver su influencia en los resultados finales de resistencia a la compresión (f_c); éste estudio permitió mostrar que la relación entre la velocidad de pulso y el f_c es menos afectada por el volumen de agregado en concreto de peso ligero. Adicionalmente se notó el aumento de la velocidad y la f_c con la edad y su disminución a medida que se aumentaba la relación A/C, siendo esta la variable más influyente.

Estudios realizados del I.E son escasos debido a que este ensayo es una tecnología reciente en comparación a la técnica de UPV. Un estudio a resaltar en relación al I.E., es el de Lu y Col. (2013) ^[16], esta investigación se encuentra enfocada a encontrar el valor de módulo de elasticidad dinámico (E_d) del concreto utilizando el ensayo de I.E. Se comprobó que el tipo de agregado tiene una gran influencia en el valor de módulo de elasticidad tanto dinámico como estático, contrario a lo que ocurre con el valor de resistencia a la compresión, el cual no se ve muy influenciado por esta variable como si lo hace la relación A/C.

A pesar de los muchos estudios realizados con los ensayos no destructivos, estos siguen siendo materia de investigación, debido a que los resultados obtenidos no son definitivos para casos generalizados, pero si con resultados que siguen una misma tendencia, que ayudan cada día a dar más confiabilidad a estas técnicas y a incluirlos como una rápida y practica herramienta de evaluación y diagnóstico de estructuras.

Con la gran acogida a nivel mundial de los ensayos no destructivos surgió la necesidad de implementar herramientas como los software de tomografía ^[17], que ayuden a procesar los datos de velocidad o tiempos de trayectoria obtenidos en

ensayos como el UPV y poder representarlo mediante imágenes espectrales 2D o 3D que faciliten el entendimiento de los resultados arrojados.

Empresas como GeoTom, LLC que se formó en 1996 por el Dr. Daryl Tweeton son pioneras en la creación de este tipo de software de procesamiento de vectores de velocidad obtenidos por ensayos no destructivos. Él fue un físico de investigación con el US Bureau of Mines hasta su cierre en 1996. Trabajó en la tomografía a partir de 1986, y publicado por primera vez el software tomográfica BOMTOM, en 1988. Él ha estado trabajando con el software de tomografía sísmica 3D desde 1995 ^[4].

En el 2012 GeoTom LLC saca al mercado el GeoTomCG software de análisis tomográfico utilizado en el presente proyecto, el cual es una herramienta de procesamiento de tiempos de viaje o velocidad de propagación de onda de ultrasonido con aplicación en ingeniería civil y geología. Mediante los tiempos de viaje de fuente a receptor calculados por los ensayos no destructivos pueden ser analizados para calcular velocidades, o las amplitudes pueden ser analizadas para calcular coeficientes de atenuación.

El análisis tomográfico calcula la velocidad y/o atenuación en alguna zona debido al material o presencia de discontinuidades y lo representa mediante imágenes espectrales similares a las imágenes térmicas pero en vez de analizar cambio de temperatura interpreta cambios de velocidad. La anisotropía puede ser especificada para cada análisis dependiendo del tipo de material en estudio en el caso del concreto se sugiere considerarlo un medio isotrópico. La trayectoria del rayo o frente de onda puede ser directo o indirecto.

GeoTomCG realiza inversiones con la técnica de reconstrucción simultánea iterativa o SIRT, Lehmann ^[18] en el 2007, comparó varios métodos de inversión incluyendo SIRT, la técnica de reconstrucción algebraica (el ARTE), el gradiente

conjugado (CG) y la menor parte de cuadrado (LSQ) métodos. Él concluyó que SIRT es el mejor método para datos de campo porque el algoritmo SIRT obtiene lo mejor y los resultados más estables.

GeoTomCG proporciona las demostraciones gráficas de velocidades, trayectoria de rayos, y otros parámetros para inspeccionar resultados y preparar informes preliminares. Esto también proporciona resultados numéricos de rebanadas de 2-D que pueden ser leídos según programas comerciales de 2-D de gráficos para preparar informes formales y presentaciones, objetivo primordial que se buscó con la implementación de este software en la presente investigación, así poder brindar una mejor interpretación de los ensayos no destructivos y ser considerada una herramienta en el apoyo de la evaluación y diagnóstico de edificaciones ^[19].

2. MATERIALES Y EQUIPOS

Es importante resaltar que el presente proyecto se emplearon materiales suministrados por la empresa CEMEX Colombia S.A., estos materiales son provenientes del río Chicamocha ubicado en Santander, además para el diseño de mezcla se utilizó cemento Portland de uso general tipo I marca CEMEX. La caracterización de estos materiales se llevó a cabo por medio de pruebas de laboratorio para determinar el tamaño nominal del agregado grueso, la presencia de impurezas orgánicas en el agregado fino, así como la densidad, absorción y el peso específico para los agregados fino y grueso como se muestran la Tabla 2, todos estos resultados obtenidos conforme a las normas técnicas colombianas (NTC 77^[21], NTC 92^[22], NTC 127^[23], NTC 176^[24], NTC 237^[25])

Tabla 2. Caracterización de materiales.

AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
TMN	25.40 mm (1")	M.F	2.70
Absorción (%)	0.44	Absorción (%)	1.35
% de vacíos	0.59	% de vacíos	34.73
Gravedad específica	2.64	Gravedad específica	2.60

El diseño de mezcla que se realizó para llevar a cabo esta investigación es el ACI (American Concrete Institute), siguiendo el método de volumen absoluto especificado en la ACI 211^[26,27].

También se tuvo en cuenta un adecuado proceso de curado húmedo durante 28 días ya que se ha comprobado que este tiene las condiciones más favorables para el proceso y tiene una influencia significativa sobre las propiedades del concreto endurecido, tanto en el interior como en su superficie, tales como la resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión y estabilidad de volumen. El desarrollo de resistencia superficial se puede reducir significativamente cuando el curado es defectuoso ^[28].

Los ensayos utilizados en la investigación para la medición de velocidad de propagación de onda son el UPV y el de I.E. conforme a las especificaciones de la NTC 4325 ^[34] y la ASTM C1383 ^[35], además se utilizó el equipo desarrollado por Olson Instruments, modelo NDE360 IE-1 NDE 1206188 para la medición de estos datos. Para el ensayo de compresión simple de las probetas se utilizó la prensa hidráulica de capacidad máxima de 200 Ton con referencia Alfred J. Ansler y CIA. Schaffhausen/suiza 79-191, la cual aplica carga continua y sin impactos, correspondiente a una velocidad de carga sobre el espécimen de 0.34 MPa/s, proporcionada por la Universidad Industrial de Santander.

3. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la investigación se realizaron probetas de concreto cilíndricas o especímenes de 20 mm de altura y 10 mm de diámetro, estas probetas fueron desencofradas pasadas 24 horas desde su fundición y fueron curadas en agua y bajo techo durante 28 días, los ensayos fueron realizados a los días 28 de edad. Posteriormente, les fueron realizados los ensayos de UPV, ensayo de I.E. y finalmente el ensayo de compresión simple. Esto con el fin de analizar la correlación entre la velocidad obtenida con los ensayos no destructivos y la resistencia a la compresión uniaxial. Además de la fabricación de probetas en adecuadas condiciones se fundieron probetas induciendo defectos como, porosidad alta y baja, y elementos de madera, para medir la variación de la velocidad en las distintas probetas.

Se elaboraron las probetas con tres resistencias de diseño distintas, para la realización de las mezclas se emplean relaciones A/C de 0.47, 0.52 y 0.58, utilizando para estas un número diferente de probetas; para el día 28 se elaboran 12, 17 y 21 respectivamente, con el fin de escoger un tamaño de muestra adecuado para cada caso, se hace un análisis estadístico por medio de varianzas, lo que se busca es encontrar un valor de desviación estándar para la resistencia del concreto. Teniendo en cuenta esto Rivera ^[29], planteo la Tabla 3, donde muestra los valores típicos de desviación estándar y grado de uniformidad del concreto, dependiendo del tipo de condiciones en el que este concreto ha sido producido.

Tabla 3. Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.

V (%)	UNIFORMIDAD	CONDICIÓN EN QUE SE OBTIENE
0 - 5	Excelente	Condiciones de laboratorio
0 - 5	Muy bueno	Preciso control de materiales y dosificación por masa
0 - 5	Bueno	Buen control de materiales y dosificación por masa
0 - 5	Mediano	Algún control de materiales y dosificación por masa
0 - 5	Malo	Algún control de materiales y dosificación por volumen
0 - 5	Muy malo	Ningún control de materiales y dosificación por volumen

Fuente: Concreto Simple, Gerardo Rivera ^[29]

Partiendo de la hipótesis planteada por Rivera ^[29] se encontraron los tamaños muestrales para cada relación A/C dependiendo del valor de resistencia esperada en el día 28, considerando esto se puede dar un número de probetas mínimas necesarias para mantener el valor de desviación establecido ajustado a una distribución normal^[20].

Tabla 4. Tamaño de muestra día 28, resistencia de $f'c = 21$ MPa.

Relación A/C = 0.58	
$f'c$ (MPa)	21
$f'c$ (Psi)	3000
Desviación (σ)	150
Alfa (α)	5%
Beta (β)	0.1
$Z_{\alpha/2}$	1.64
Z_{β}	1.28
Delta (Δ)	150
Potencia	0.9
N° min Probetas	9.0

Fuente: Ref. [20]

Del mismo modo fue realizado el análisis estadístico para el tamaño de muestra del día 28 para las demás relaciones A/C, los valores correspondientes son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Tamaño de muestra de probetas en el día 28 para las resistencias de 21MPa, 24MPa y 28MPa.

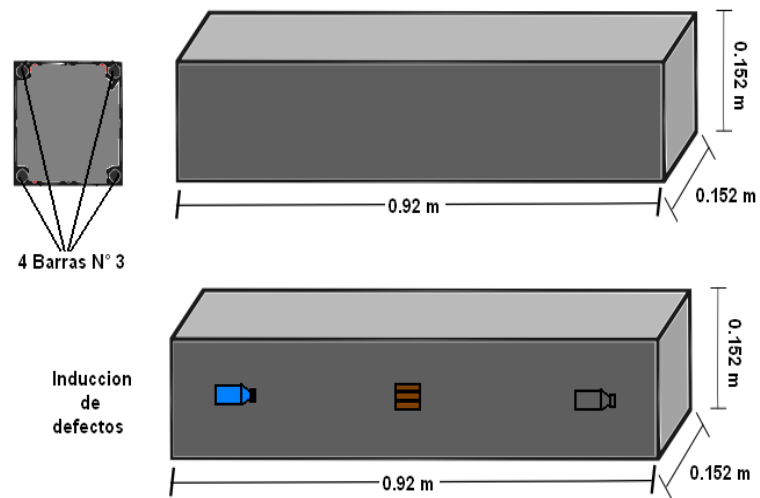
Relación (A/C)	Resistencia [MPa]	Desviación (σ)	N° mínimo Probetas
0.58	21	150'	9
0.52	24	175	14
0.47	28	200	19

Para la investigación se amplió el tamaño muestra para obtener más confiabilidad en los resultados, partiendo de los datos de velocidad, se realizó un análisis estadístico, con el fin de ver el efecto que la relación A/C tiene sobre la resistencia a compresión del concreto y la velocidad de ultrasonido y realizar las correlaciones entre las mismas.

Simultáneamente se procedió a fundir dos vigas bajo las mismas condiciones de laboratorio de las probetas y los mismos diseños de mezcla, una con refuerzo y otra induciendo diferentes defectos entre ellos plástico, madera, vacíos y agua como se representa en la Figura 3. Lo anterior para tomar mediciones de velocidad de pulso de ultrasonido y de esta forma observar cómo afecta el refuerzo y los defectos estas velocidades de propagación y al procesar los datos en el software de tomografía observar como representa estas alteraciones.

Las vigas tienen una longitud de 920 mm y una sección cuadrada de 0.153m reforzadas longitudinalmente con 4 barras N° 3 (d= 9.5mm) y estribos N° 2 (d= 6.4mm) cada 10 mm.

Figura 3. Dimensiones de vigas fundidas en laboratorio e inducción de defectos



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron en los procesos de diseños de probetas o especímenes, diseño de vigas, ensayos de resistencia a compresión, ensayos no destructivos y software de tomografía; y sus correspondientes análisis.

La resistencia real o experimental del concreto (f'_c) se obtiene del ensayo a compresión suministrado por la prensa hidráulica. De manera alterna se halla un valor de resistencia a la compresión teórica $(f'_c)_t$, el cual obtiene mediante velocidad de onda de los ensayos no destructivos de UPV e I.E, por medio de la Ec. (1) se calcula el módulo de elasticidad teórico que luego utilizamos en la Ec. (4) tomada de la NSR-10 numeral C.8.5.1 y de este modo se obtiene el valor de resistencia a la compresión teórico.

$$E = \rho^{1,5} * 0.043 * \overline{f'_c} \quad (4)$$

4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS

Para los diferentes diseños de mezclas se calculó la densidad, por medio de cilindros de concreto que se secaron al horno a una temperatura de 110 °C durante aproximadamente 90 min. Posteriormente se procedió a tomar las dimensiones y registrar los pesos de las probetas y utilizando la Ec. (5) se calculó la densidad (ρ) para espécimen.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5)$$

La metodología de prueba ultrasónica en el concreto se basa en el hecho que el tiempo de propagación o velocidad de onda expresa la densidad del material, que puede ser correlacionada con las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Debido a que velocidad depende de la resistencia por esto se hace énfasis en analizar cada relación A/C por separado y observar las variaciones de velocidad.

4.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la Tabla 6 se presentan los resultados promedio obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión ($f'c$) para cada relación A/C en el día 28 de curado. En los anexos C-D se encuentran registrados los valores de resistencia en cada probeta ensayada.

Tabla 6. Resistencia a la compresión promedio de las probetas de concreto ensayadas.

Relación (A/C)	Resistencia de Diseño $f'c$ [MPa]	Resistencia experimental $f'c$ exp [MPa]	% Error
0.58	21	21.24	0.18
0.52	24	23.91	0.93
0.47	28	27.63	2.62

Partiendo de los resultados obtenidos en la Tabla 6 se observó que a medida que se aumenta la relación A/C disminuye la resistencia a la compresión. Además se demuestra que el diseño de mezcla realizado por método de volumen absoluto

especificado en la ACI 211 se ajusta con gran precisión a los resultados esperados con tan solo un error máximo promedio del 2.62 %.

4.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA RESPECTO A LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (A/C).

Existe una clara dependencia entre la relación A/C y velocidad de propagación de onda la cual se espera que descienda cuando se aumente la relación A/C, lo anterior puede deberse al peso unitario del material que afecta directamente la velocidad. Un diseño de mezcla con relación A/C menor tiene menos porosidad, esto genera más homogeneidad en el concreto que hace que el viaje de la onda no se vea afectado y recorra las probetas a mayor velocidad.

A continuación se presentan en la Tabla 7 los resultados de velocidades promedio de UPV e I.E de las probetas de concreto para cada relación A/C y en la Figura 4 y 5 se representa su respectivo comportamiento.

Los resultados promedio son tomados de las muestras presentadas en los anexos F-K obtenidos en la presente investigación.

Tabla 7. Velocidad de onda promedio de las probetas de concreto ensayadas.

Relación (A/C)	Resistencia f_c [MPa]	Velocidad UPV [m/s]	Velocidad I.E [m/s]
0.58	21	3202.86	3385.08
0.52	24	3557.69	3402.42
0.47	28	3625.01	3423.32

Figura 4. Comportamiento de la velocidad de onda UPV en función de la relación A/C

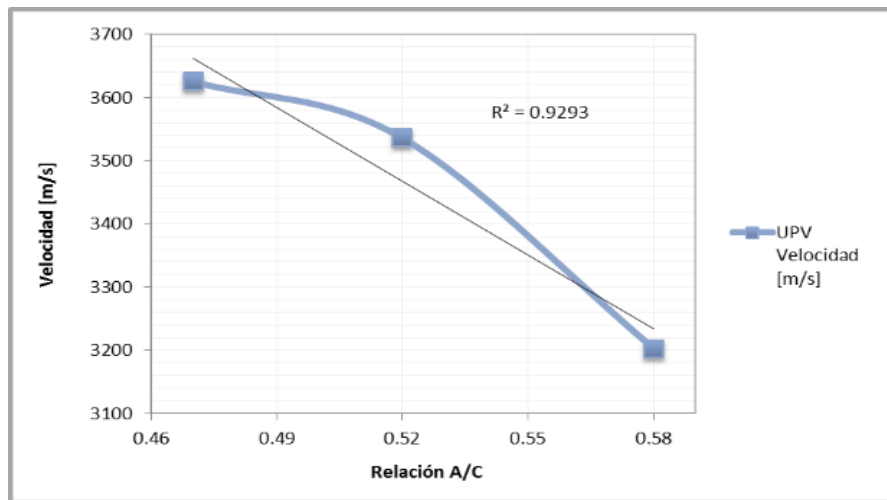
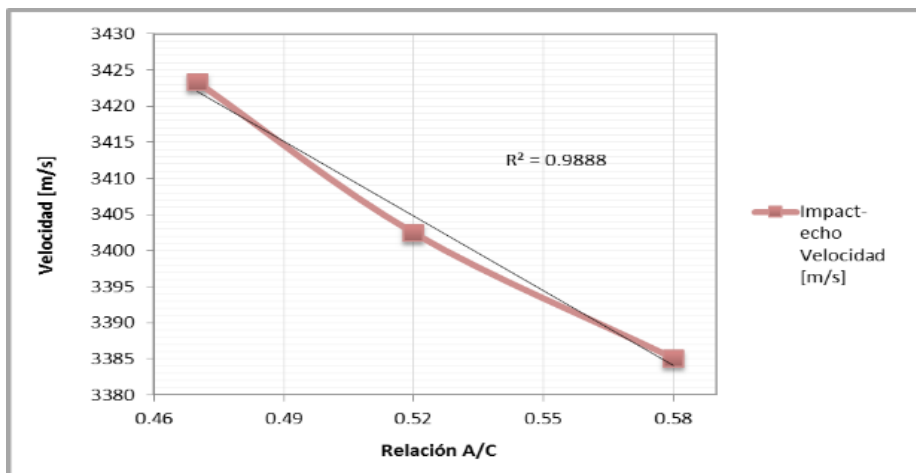


Figura 5. Comportamiento de la velocidad de onda I.E en función de la relación A/C



En los resultados presentados en la Figura 4 y 5 se aprecia que tanto para el ensayo de UPV como el de I.E hay un comportamiento decreciente de la velocidad a medida que aumenta la relación A/C, esto debido a que son dos ensayos no destructivos que tienen el mismo fundamento teórico. Se observa que la velocidad

del UPV es más susceptible a estos cambios y los valores de velocidad varían notablemente entre cada relación A/C, mientras que el ensayo de I.E aunque tienen un comportamiento similar los valores velocidades son más cercanos entre sí para las mismas relaciones A/C. Este fenómeno se podría explicar porque cada ensayo posee una forma distinta en la generación de onda. En el caso del UPV son ondas vibratorias de impulso eléctrico que genera un transductor emisor y recibidas por un receptor ubicado al otro lado del objeto en estudio. Por el contrario para el I.E no es necesario acceder al otro lado del elemento ya que cuenta con su receptor a pocos centímetros del emisor y por medio de reflexión calcula la velocidad de propagación de la onda mecánica producida por un golpe.

Es importante resaltar que la variabilidad de los resultados obtenidos en las probetas, es probablemente ocasionada por factores como la alta heterogeneidad del concreto.

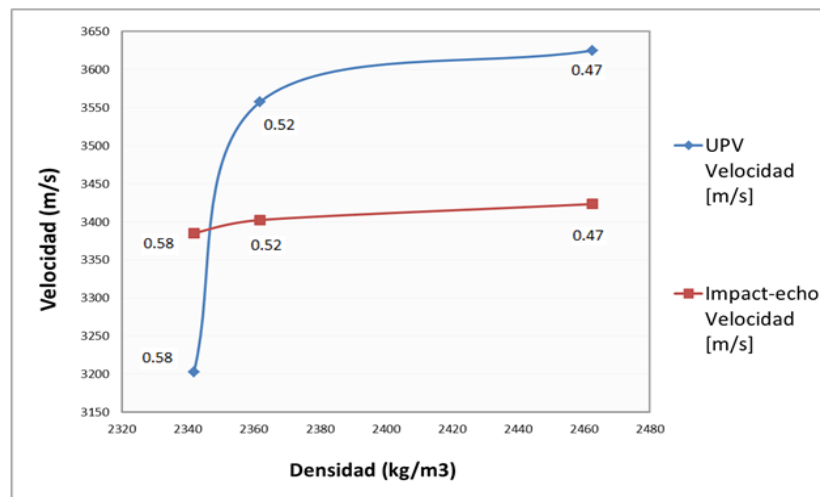
4.4 RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD Y LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA DE LAS DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO (A/C).

En la tabla 8 se presentan los valores de densidad promedio obtenidos en las probetas ensayadas y las velocidades de propagación tanto de UPV como de I.E para cada relación A/C y en la Figura 6 se puede observar su comportamiento o tendencia. Los resultados promedio son tomados de las muestras presentadas en los anexos F-K obtenidos en la presente investigación.

Tabla 8. Densidad promedio de las probetas de concreto ensayadas para cada relación A/C

Relación (A/C)	Densidad (kg/m ³)	UPV Velocidad [m/s]	I.E Velocidad [m/s]
0.58	2341.82	3202.86	3385.08
0.52	2361.93	3557.69	3402.42
0.47	2462.63	3625.01	3423.32

Figura 6. Comportamiento de la velocidad de onda UPV e I.E en función de la densidad (ρ) para cada relación A/C



En con base en la Figura 6 se puede observar un comportamiento ascendente en la velocidad tanto en UPV como I.E a medida que aumenta la densidad, demostrando que la densidad es uno de los principales factores que influyen en la velocidad de propagación, la relación es directa, es decir, a mayor densidad del medio, mayor será la velocidad de transmisión de los ultrasonidos. Se apreció que la velocidad de UPV se ve más afectada a estos cambios y los valores de velocidad varían notablemente con pequeños cambios de densidad, del mismo

modo en el ensayo de I.E al aumentar la densidad aumenta la velocidad pero en menor grado obteniendo valores de velocidad más cercanos entre sí.

4.5 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EXPERIMENTAL Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN TEÓRICA DE LOS ENSAYOS NDT.

En las Figuras 7-9 se presentan los valores de resistencia a la compresión para cada uno de los ensayos realizados a las probetas, donde se observa la relación entre los valores de $(f'c)$ experimental y $(f'c)_t$ teórica registrados, además en la Tabla 9 se presentan el porcentaje de error obtenidos entre los datos. La resistencia a la compresión experimental $(f'c)$ es obtenida directamente por prensa hidráulica y la resistencia teórica $(f'c)_t$ se calcula por medio de la ecuación Ec. (4) tomada del numeral C.8.5.1 de la NSR-10 luego de calcular un módulo de elasticidad teórico (E_t) por medio de la Ec. (1) tomada del ACI 228^[12].

Tabla 9. Porcentajes de error de Resistencia a la compresión experimental y teóricas de la NSR-10 a partir de ensayos no destructivos.

Relación (A/C)	NDT	% Error max.	% Error prom.	% Error min.
0.58	UPV	25.10	11.14	1.26
	I.E	30.31	12.28	2.88
0.52	UPV	26.98	19.55	1.36
	I.E	9.65	7.01	1.14
0.47	UPV	21.27	8.19	0.06
	I.E	24.96	15.47	5.4

Figura 7. Valores resistencia a la compresión experimental y teórica de UPV e I.E para relación A/C=0.58

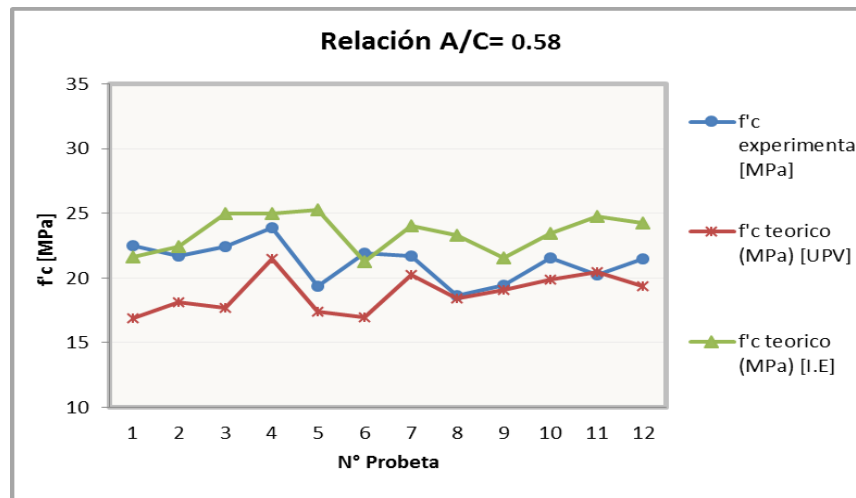


Figura 8. Valores resistencia a la compresión experimental y teórica de UPV e I.E para relación A/C=0.52

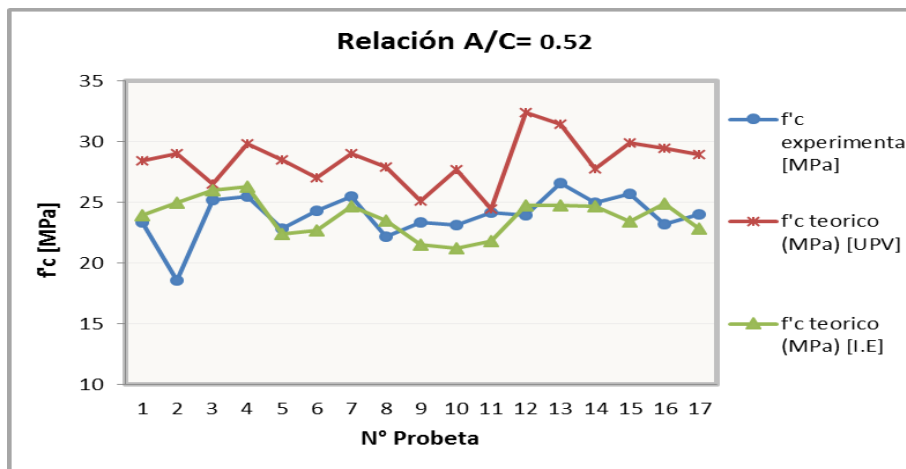
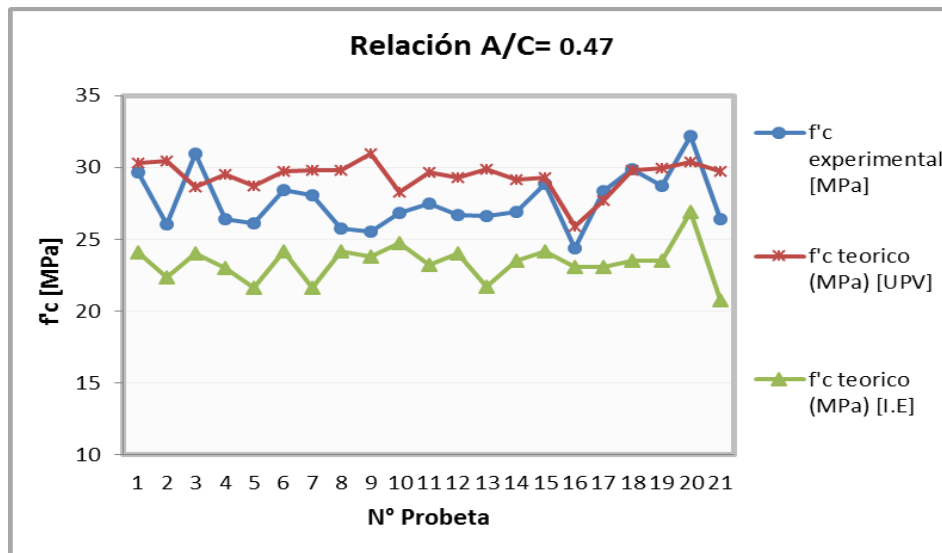


Figura 9. Valores resistencia a la compresión experimental y teórica de UPV e I.E para relación A/C=0.47



En las Figuras 7-9 se observa un comportamiento similar entre la resistencia a la compresión experimental y las teóricas UPV e I.E con una dispersión aceptable como se refleja en la tendencia de los resultados graficados y el porcentaje de error obtenido entre datos (Tabla 9).

En la Ec. (1) planteada en la ACI 228 se muestra que la velocidad es significativa en la determinación del módulo de elasticidad como también lo es la densidad y a su vez se observa una gran correlación entre estas dos variables. También es importante mencionar que para la presente investigación se utilizó un valor constante de coeficiente de Poisson de 0.2 para todas probetas, puesto que no se percibe gran variación cuando este factor cambia [2].

Con el fin de disminuir la dispersión entre los resultados se debe realizar un análisis para el planteamiento de ecuaciones propias obtenidas a partir de las mediciones de los ensayos no destructivos de UPV e I.E que se ajusten a los datos experimentales o reales de resistencia.

4.6 CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA UPV E I.E PARA CADA RELACIONES A/C.

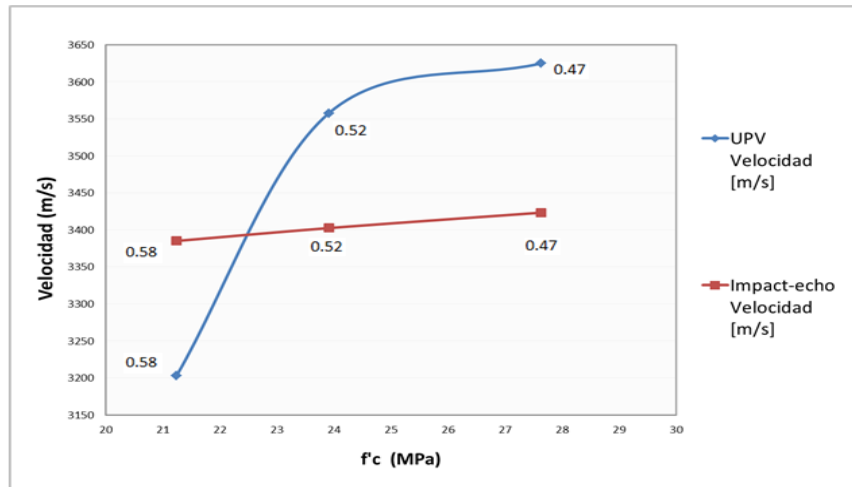
Como los ensayos no destructivos ofrecen un valor directo de velocidad se quiso realizar un análisis que determinara el grado de relación entre esta variable y el ensayo de resistencia a compresión realizado a las probetas.

Los resultados en los ensayos de resistencia a la compresión y la velocidad de UPV e I.E se presentan en la Tabla 10, posteriormente en la Figura10 se muestra el comportamiento de estos parámetros para cada relación A/C en el día 28.

Tabla 10. Resistencia a la compresión promedio de las probetas de concreto ensayadas y velocidad de UPV e I.E para cada relación A/C.

Relación (A/C)	UPV Velocidad [m/s]	I.E Velocidad [m/s]	f'c exp [MPa]
0.58	3202.86	3385.08	21.24
0.52	3557.69	3402.42	23.91
0.47	3625.01	3423.32	27.63

Figura 10. Comportamiento de la velocidad de onda UPV e I.E en función de la resistencia a la compresión ($f'c$) para cada relación A/C.



En los resultados de la Figura 10 se observa una dependencia directa entre estas dos variables, como se evidencia a medida que se aumenta la resistencia a la compresión aumenta la velocidad de propagación de onda tanto en UPV como en I.E en cada relación A/C. Se observa además que la velocidad del UPV es más susceptible a registrar los cambios de resistencia y los valores de velocidad varían notablemente con el aumento de resistencia, mientras que el ensayo de I.E aunque tienen un comportamiento similar los valores de velocidad son más cercanos entre sí con el aumento o disminución de resistencia.

Con el fin de realizar un análisis más detallado de la correlación entre la velocidad de propagación de onda y la resistencia a la compresión, fue necesario analizar los resultados de cada ensayo por separado y a su vez observar el comportamiento de estas variables para cada uno de las relaciones A/C. También plantear ecuaciones que expresen la resistencia del concreto en función de la velocidad de propagación de onda o la tendencia de los datos registrados en cada ensayo y así obtener mejores resultados.

4.6.1 Correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de UPV para las diferentes relaciones A/C. Partiendo del planteamiento mencionado anteriormente, se llegó a una serie de ecuaciones que son presentadas en la Tabla 11 las cuales expresan el valor de la resistencia a la compresión en función de la velocidad obtenida a partir del UPV, así mismo en Figura 11 se muestra la correlación existente entre estas dos variables y el comportamiento de las mismas mostrando una tendencia muy definida para cada relación A/C.

Tabla 11. Ecuación de resistencia a la compresión teórica en función de la velocidad de UPV para cada relación A/C.

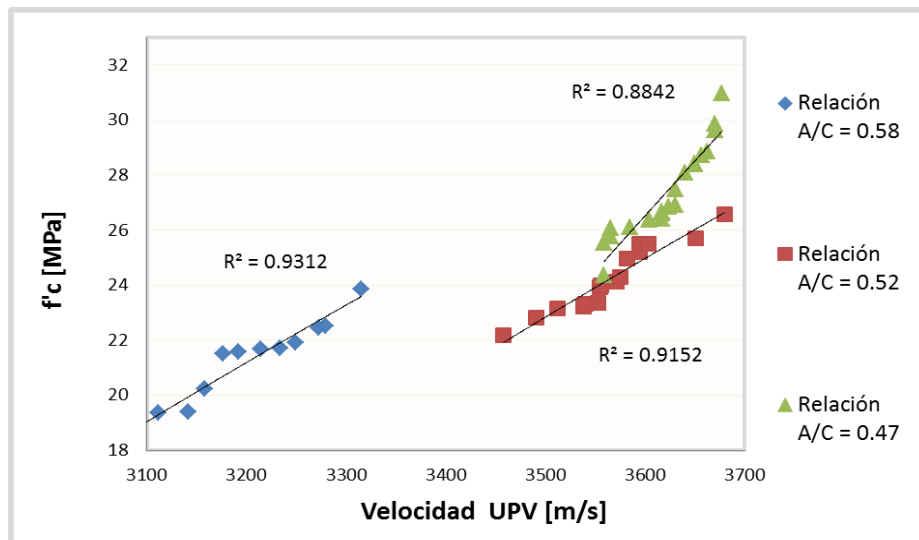
Relación (A/C)	f'c teórica ajustado [UPV]
0.58	$f'_{c_{teórica}} = (67,751 * \ln(C_p)) - 525,61$
0,52	$f'_{c_{teórica}} = (75,792 * \ln(C_p)) - 595,66$
0,47	$f'_{c_{teórica}} = (144,46 * \ln(C_p)) - 1156,4$

Dónde:

C_p = Velocidad de propagación de onda (m/s)

$f'_{c_{teórica}}$ = Resistencia a la compresión MPa

Figura 11. Correlación entre resistencia a la compresión y la velocidad de onda UPV para cada relación A/C.



4.6.2 Correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de I.E para las diferentes relaciones A/C. De igual manera se realiza el análisis para establecer la resistencia a la compresión por medio de la velocidad obtenida por I.E. En la Tabla 12 se muestran las ecuaciones planteadas que expresan el valor de la resistencia a la compresión en función de la velocidad obtenida a partir del I.E. Así mismo en Figura 12 se muestra la correlación existente entre estas dos variables y el comportamiento de las mismas mostrando una tendencia similar en cada relación A/C.

Tabla 12. Ecuación de resistencia a la compresión teórica en función de la velocidad de I.E para cada relación A/C.

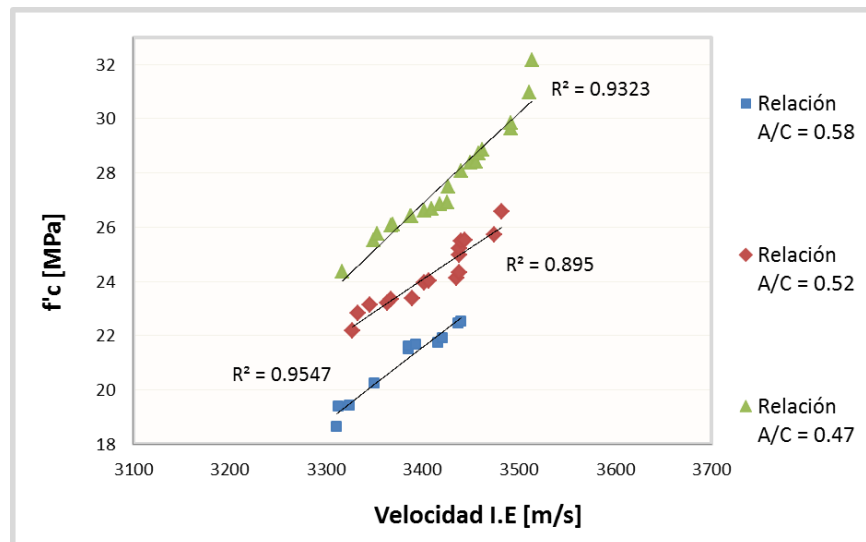
Relación (A/C)	f'c teórica ajustado [I.E]
0.58	$f'c_{teórica} = (92,544 * \ln(C_p)) - 730,97$
0,52	$f'c_{teórica} = (80,687 * \ln(C_p)) - 632,05$
0,47	$f'c_{teórica} = (115,38 * \ln(C_p)) - 911,37$

Dónde:

C_p = Velocidad de propagación de onda (m/s)

$f'c_{teórica}$ = Resistencia a la compresión MPa

Figura 12. Correlación entre resistencia a la compresión y la velocidad de onda de I.E para cada relación A/C.



Por ultimo en la Tabla 13 se presentan el porcentaje de error obtenidos entre los datos. La resistencia a la compresión experimental (f'_c) es obtenida directamente por prensa hidráulica y la resistencia teórica (f'_c)_t teórica se calcula por medio de las ecuaciones de las Tablas 11 y 12 que se encuentran en función de la velocidad de propagación de los ensayos no destructivos.

Tabla 13. Porcentajes de error de resistencia a la compresión experimental y teóricas. A partir de ensayos no destructivos.

Relación (A/C)	NDT	% Error max.	% Error prom.	% Error min.
0.58	UPV	10.79	5.09	1.16
	I.E	11.43	4.99	0.79
0.52	UPV	11.28	5.09	1.79
	I.E	7.34	5.79	0.24
0.47	UPV	11.09	4.49	1.00
	I.E	8.11	4.99	2.03

4.6.3 Discusión de resultados. De acuerdo a los análisis realizados anteriormente se puede notar que los datos de resistencia a la compresión teórica calculados solo en función de la velocidad de los ensayos no destructivos se ajustan mejor a los valores experimentales que los obtenidos por medio de la Ec. (4) como se observa en los porcentajes de error registrados en la Tabla 13. Además los coeficientes de correlación (R^2) con valores de hasta 0.912 en UPV y de 0.955 en I.E demuestra la gran dependencia que existe entre la velocidad de propagación de onda y la resistencia a la compresión.

Se observa además que en los ensayo de UPV e I.E para cada relación A/C las velocidades registradas son cercanas entre sí. Pero los resultados obtenidos también demuestran que en el ensayo de UPV la velocidad de onda aumenta

notablemente a medida que aumenta la resistencia a la compresión, mientras en el caso del I.E se pueden observar que la velocidad aumenta en menor medida al aumentar la resistencia, por esta razón se hace más complejo.

La correlación entre los ensayos no destructivos y de la resistencia a la compresión puede ser establecida como se muestra en las ecuaciones deducidas en las Tablas 11 y 12. Es importante tener en cuenta que las correlaciones halladas son particulares para este determinado tipo de concreto y deben utilizarse con precaución ya que por ser un material heterogéneo la interpretación de la relación entre la resistencia y el pulso de velocidad ultrasónica de las NDT se convierte en algo complejo. Pero que juegan un papel importante en cuanto implica el desarrollo de métodos para control de calidad y evaluación de las condición del concreto como detectar regiones heterogéneas, presencia de vacíos y/o defectos internos.

4.7 APLICACIONES DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE PROPAGACIÓN DE ONDA.

Las pruebas basadas en técnicas no destructivas de velocidad de propagación de onda pueden ser empleadas para ensayar concreto simple y reforzado tanto en laboratorio o fundido in situ. Para el caso del análisis de concreto reforzado es recomendable apoyarse de otras técnicas no destructivas como el escáner, localizando el acero. Por medio de la medición de la velocidad de propagación de onda se puede determinar la homogeneidad del concreto, presencia de vacíos, grietas, otras imperfecciones, medición de los cambios en las propiedades del concreto a través del tiempo y además control calidad del concreto en lo referente a los requisitos estándares especificados, que refieren generalmente a su correlación con resistencia ^[31].

4.7.1 Detección de defectos y uniformidad del concreto en probetas. La velocidad de un pulso ultrasónico se ve influenciada por aquellas propiedades del concreto que determinan su comportamiento elástico y su resistencia mecánica. Cuando se presenta en el concreto bajo ensayo una zona mal compactada, hormigueros o material ajenos a la mezcla, se reduce la velocidad del pulso notoriamente, ver Figura 13.

Los resultados promedios realizados a las probetas defectuosas inducidas en laboratorio se presentan en la Tabla 14, además en la Figura 13 se puede observar el comportamiento de la onda UPV obtenido para cada una de las condiciones analizadas.

Tabla 14. Velocidad de onda UPV, densidad y resistencia a la compresión de probetas defectuosas inducidas en laboratorio.

Relación A/C	Buen Estado	Porosidad baja	Porosidad alta	Inclusión trozos de madera
0,47	Cp= 3106.67 (m/s)	Cp= 2968.23 (m/s)	Cp= 2271.25 (m/s)	Cp= 2795.47 (m/s)
	ρ = 2324.87 (kg/m ³)	ρ = 2314.74 (kg/m ³)	ρ = 2255.12 (kg/m ³)	ρ = 2301.95 (kg/m ³)
	f _c = 22.53 (Mpa)	f _c = 21.85 (Mpa)	f _c = 14.18 (Mpa)	f _c = 20.77 (Mpa)
0,58	Cp= 3764.35 (m/s)	Cp= 2962.79 (m/s)	Cp= 2741.24 (m/s)	Cp= 3576.45 (m/s)
	ρ = 2452.99 (kg/m ³)	ρ = 2429.86 (kg/m ³)	ρ = 2295.21 (kg/m ³)	ρ = 2373.50 (kg/m ³)
	f _c = 29.79 (Mpa)	f _c = 24.83 (Mpa)	f _c = 18.45 (Mpa)	f _c = 22.07 (Mpa)

cuando estos tengan un área proyectada más grande que el área de las caras de los transductores ^[31].

4.7.2 Detección de defectos en el concreto reforzado mediante procesamiento de datos de velocidad de pulso en software de tomografía.

Con la implementación del software de tomografía se adquiere una herramienta adicional de apoyo a la hora de interpretar resultados de velocidad de propagación de onda registrados en el estudio de un determinado elemento estructural de concreto. Generando imágenes espectrales 2D en el caso de la presente investigación, que ayuden a evaluar la condición interna del mismo en busca de defectos, vacíos u otras imperfecciones que puedan afectar su durabilidad y/o resistencia.

La metodología para obtener estas imágenes espectrales 2D se basa en el hecho que las medidas de la velocidad del pulso corresponden a la calidad media del concreto a lo largo de la línea del camino del pulso generando un vector de información, de este modo si se toma un número n de mediciones suficientes para generar una matriz de distribución de pulsos que represente el comportamiento de la velocidad de onda a lo largo de un tramo del elemento de concreto en estudio y al ingresar esta matriz de pulsos al software de tomografía GeoTomCG este mediante la técnica de reconstrucción simultanea iterativa SIRT, proporciona las demostraciones gráficas o tomograma que es la representación en 2D de las velocidades calculadas.

GeoTomCG proporciona tomogramas en forma de pequeños rectángulos coloreados que representan el comportamiento de la velocidad en los distintos puntos de la sección de la viga analizada.

En las Figuras 14-16 se presentan las imágenes espectrales 2D de la sección de la viga en los distintos lugares donde se indujeron los diferentes defectos.

Figura 14. Representación tomográfica de sección de la viga y detección defecto de vacío.

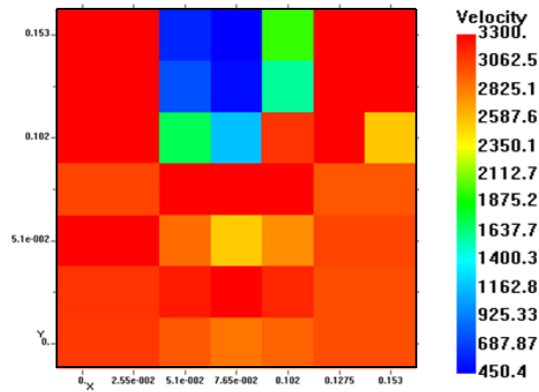


Figura 15. Representación tomográfica de sección de la viga sin defectos.

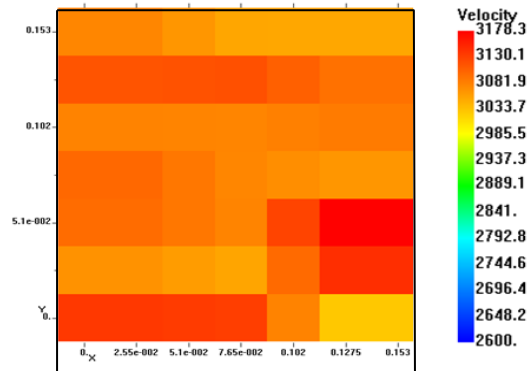
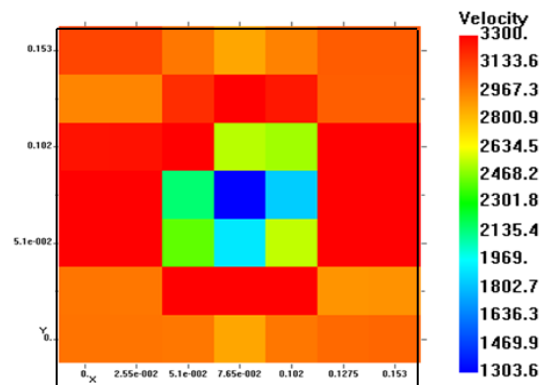


Figura 16. Representación tomográfica de sección de la viga y detección defecto cavidad con agua.



Con base en las figuras 14-16 se puede observar los resultados del procesamiento de las matrices de velocidad obtenida en el software y como se ven representados los defectos encontrados. El análisis tomográfico calcula la velocidad o atenuación por pérdida de energía en puntos dentro de la rejilla o cuadrículas. La anisotropía puede ser especificada para cada punto de la rejilla en el caso del concreto se utilizó un coeficiente igual a cero por considerarse un material isotrópico.

En la Figura 14 se presentan los resultados del análisis de velocidad realizado al tramo de la viga con la presencia de vacío o contenido de aire, donde se aprecia cambio de interfase muy marcado en la parte superior de la sección transversal de la viga y caídas de velocidad en algunas rejillas de hasta 450 m/s. En la Figura 15 se puede observar los resultados del análisis de los valores de velocidad de UPV tomados en un tramo de la viga en buen estado se puede notar el alto grado de homogeneidad del concreto y valores de velocidad entre 3000 y 3200 m/s acorde a los valores de velocidad esperados para un diseño de mezcla de relación A/C de 0.58 utilizado en la fundición de las vigas.

Por último en la figura 16 se presenta los resultados del análisis de las velocidades realizado en el software tomográfico al tramo de la viga afectado por la presencia de agua donde se observa un cambio de interfase en el centro de la sección transversal de la viga y caídas de velocidades en algunas rejillas de hasta 1300 m/s siendo la velocidad del ultrasonido en este medio.

Por medio del software de tomografía es posible localizar defectos, vacíos, etc. Los defectos pequeños presentan poca influencia en el análisis de cambios de velocidad de UPV por esta razón si el área proyectada del defecto es más pequeña que el diámetro de los transductores, la discontinuidad no se puede detectar solamente por la medida del tiempo de tránsito.

4.7.2.1 Influencia de la presencia de acero de refuerzo: Se ha establecido a lo largo de la investigación que este tipo de ensayos no destructivos son una herramienta ideal, muy simple y versátil, para determinar la uniformidad en el concreto, tanto a nivel de laboratorio como a nivel de campo. A la hora de realizar las pruebas en campo se utiliza un escáner para localizar el refuerzo y evitar que el pulso viaje a través de este mismo. Simultáneamente se tomaron datos de velocidad de pulso a través del refuerzo para observar la variabilidad de los datos.

En la Tabla 15 se presentan los porcentajes de incrementos de velocidad de pulso de ultrasonido máximo, mínimo y promedio obtenido en la viga reforzada respecto a la viga sin refuerzo. Los resultados son tomados de las muestras presentadas en los anexos T-U obtenidos en la presente investigación.

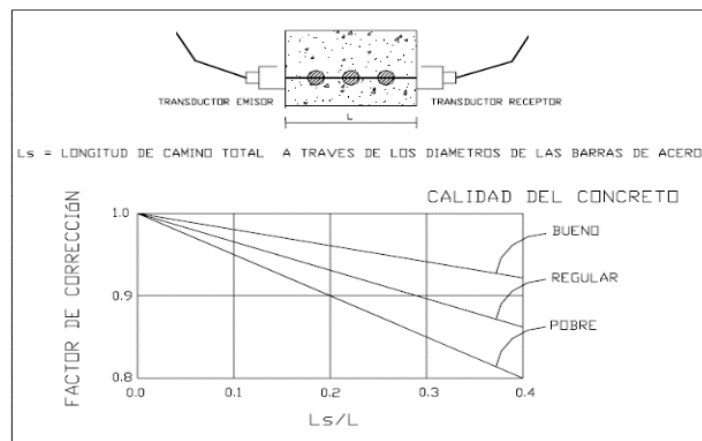
Tabla 15. Incrementos de velocidad UPV con la presencia de acero de refuerzo.

Disposición del Refuerzo	Incremento máximo de velocidad UPV	Incremento promedio de velocidad UPV	Incremento mínimo de velocidad UPV
Barras perpendiculares al pulso	5.80%	3.62%	0.46%
Barras paralelas al pulso	14.88%	13.79%	13.18%

Partiendo de los resultados obtenidos se observa en la Tabla 15 que la influencia del refuerzo es generalmente muy pequeña si las barras se encuentran en una dirección perpendicular al camino del pulso y la cantidad de acero es pequeña en lo referente a la longitud, como en el caso de la presente investigación con un incremento promedio de velocidad de apenas 3.62%. Sin embargo, así la influencia sea mínima, algunos fabricantes de equipos medidores de velocidad de pulso de ultrasonido como el V-Meter Mk sugieren en sus manuales realizar una

corrección de velocidad en caso de tomar datos a través o en vecindad del acero de refuerzo. Conociendo la relación de transformación L_s/L (donde L es la distancia entre transductores y L_s es la suma de los diámetros de las barras de refuerzo) la velocidad del pulso medida puede ser corregida, multiplicándola por el factor de corrección y en concordancia con las curvas de calidad del concreto que aparecen en la Figura 17. Los resultados obtenidos en la investigación se ajustan en gran medida a los valores teóricos obtenidos por el factor de corrección.

Figura 17. Influencia de las barras de acero en la velocidad de pulsos de ultrasonido.



Por otro lado, se observa también en los resultados presentados en la Tabla 15 que cuando las barras de acero están en una dirección paralela al camino del pulso, la influencia del acero es notable incrementando las velocidades en gran medida y haciendo más difícil y poco confiable hacer las correcciones de velocidad como se realiza cuando el refuerzo se encuentra perpendicular al camino del pulso. Sin embargo, se concluye que es recomendable elegir los caminos del pulso que evitan la influencia del acero y más cuando el refuerzo se encuentra paralelo al camino del pulso y pueda arrojar datos poco o nada representativos del concreto.

4.8 DIAGNÓSTICO O EVALUACIÓN DE EDIFICACIONES CONSTRUIDAS ANTES DE LA VIGENCIA DE LA PRESENTE VERSIÓN DEL REGLAMENTO NSR-10.

Una de las misiones del ingeniero es proyectar y construir estructuras para que cumplan una determinada misión, durante un tiempo y con el menor costo posible [4].

Al igual que ocurre con los seres vivos, en los que cualquier enfermedad o lesión se manifiesta mediante una serie de síntomas, en las estructuras los fallos se ponen de manifiesto, en general, con la aparición de una serie de señales o de cambios de aspecto, que se engloban dentro de la sintomatología [32]. Ante estos síntomas el técnico especialista, o patólogo, debe establecer un diagnóstico de la enfermedad que sufren las columnas y vigas estructurales. Las causas que pueden provocar lesiones en una estructura de hormigón armado pueden ser muchas y muy variadas que pueden estar relacionadas con el propio proyecto, con los materiales, con la ejecución y con el uso o explotación de la estructura. Analizando las causas se puede ver que distribuye en un 42% de fallos debidos a deficiencias en proyecto, un 22% a deficiencias en ejecución, un 15% a materiales, un 10% a fallos en explotación y un 5% a causas varias diferentes de las anteriores [32].

El uso de ensayos destructivos y no destructivos está dirigido al diagnóstico preliminar del elemento de concreto, sobre todo en estructuras de dudosa calidad. Esta es la razón por la que puede afirmarse que los ensayos no destructivos constituyen una etapa previa del estudio. Las técnicas tradicionales basadas en ensayar a compresión o a flexión muestras del concreto empleado en la estructura en estudio, tienen algunas desventajas; el hecho de que existan diferencias en la resistencia del concreto entre las muestras y la estructura real, a causa

principalmente de las diferentes condiciones de colocación y curado, además de las obvias diferencias de forma y tamaño, y de la no inmediatez en la obtención de resultados, son algunas de las desventajas de estas técnicas.

Estas y algunas otras, han propiciado que en las dos últimas décadas se haya generalizado el empleo del método de la Velocidad de Pulso Ultrasónico entre los ensayos no destructivos, como una vía para determinar la calidad del concreto endurecido. Por razón de accesibilidad in situ, el método más utilizado en las obras es el método por transmisión directa. Pues se debe hacer hipótesis cuando a la trayectoria y a la velocidad de propagación de la onda; eso puede perjudicar el nivel de confianza en los resultados. Además, la presencia de agua en el hormigón no permite detectar vacíos o grietas, y la humedad desconocida del material complica las correlaciones que se pueden establecer entre la resistencia de probetas testigos, y la resistencia real del elemento de hormigón que se ensaya [17].

Entre las ventajas del uso del método se pueden mencionar: simplicidad de utilización, bajo costo, repetitividad y versatilidad; además de lo que significa, el hecho de formar parte de los ensayos no destructivos in situ aplicados a la evaluación del concreto.

En la Tabla 16 se resumen las ventajas e inconvenientes del método ultrasónico; estos puntos son variables para cualquier propiedad evaluada.

Tabla 16. Ventajas y desventajas de la Velocidad de Pulso de Ultrasonido

APLICACIÓN	PRINCIPIO
Evaluación de la uniformidad del concreto, presencia de grietas y vacíos. Permitiendo establecer correlaciones con la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad	La velocidad de un haz de onda ultrasónica al atravesar un material depende de la densidad y de sus propiedades elásticas
VENTAJAS	DESVENTAJAS
No destructivo Ahorro económico con un equipo de bajo costo y vida útil prolongada Poca interacción con el proceso constructivo Dispersión baja de datos	Fallo de datos, depende del tipo de hormigón. Influencia de las condiciones climáticas sobre el fraguado y el endurecimiento del hormigón. Difícil interpretación de datos en concreto con alta cuantía de refuerzo.

El UPV consiste en medir el tiempo que demora un pulso ultrasónico en recorrer la masa de concreto en estudio. Los especialistas lo establecen como una herramienta ideal, muy simple y versátil, para determinar la uniformidad en el concreto, tanto a nivel de campo como a nivel de laboratorio, esta herramienta combinada con el software de tomografía hacen un equipo excelente en ensayos no destructivos. Por otro lado, según se reporta en la literatura especializada [2], la resistencia del concreto determinada por esta vía puede ser predicha con una tolerancia de un $\pm 20\%$, tolerancia dependiente tanto del tipo de agregado como de las proporciones de la mezcla. La experiencia muestra que cuando aparecen grandes diferencias en la UPV sin una razón aparente, existen grandes probabilidades de que se esté en presencia de un concreto defectuoso o deteriorado; consecuentemente, altas y constantes lecturas de UPV indican buena calidad del concreto [2].

El reglamento Colombiano para el Diseño Estructural de Edificaciones Sismo-Resistentes NSR-10, en el Capítulo A.10 “Evaluación e intervención de edificaciones construidas antes de la vigencia de la presente versión del reglamento” presenta criterios y procedimientos con el fin de evaluar la

vulnerabilidad sísmica e indica que las edificaciones construidas antes del año 2010 deben cumplir los requisitos establecidos para la adición, modificación y remodelación del sistema estructural. ^[6] Es necesario establecer una base de conocimiento sobre las actuaciones frente a las distintas patologías que se presentan en las estructuras de concreto, de manera que en ningún momento se ponga en riesgo el bienestar de los usuarios. Las pruebas in situ pueden suplir la base y permitir una evaluación más económica del concreto en la estructura.

Con la aparición de las nuevas tecnologías surgen los ensayos no destructivos y la implementación de nuevas herramientas (software), los cuales son capaces de brindar información acerca de la resistencia y de la calidad del material, sin afectar la integridad del elemento estudiado. Una de las técnicas más difundidas y de probada efectividad, resulta el empleo del método de la UPV, empleado para determinar las características del concreto, por medio del desarrollo de mediciones de la velocidad ultra-sónica a través del material ^[33]. Los métodos de ensayos no destructivos (NDT) se aplican cada vez más en la evaluación de estructuras de concreto. Este aumento en la aplicación de métodos de NDT es debido a una serie de factores:

- Las mejoras tecnológicas en hardware y software para la recolección y análisis de datos
- Las ventajas económicas en la evaluación de grandes volúmenes de estructuras de concreto en comparación con otros métodos
- Capacidad para realizar evaluaciones rápidas e integrales de construcción existente
- Especificación de los métodos de ensayos no destructivos para el control de calidad de las cimentaciones profundas y reparaciones concretas.

5. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos por medio de los ensayos no destructivos se evidencia la notable influencia que tiene la relación agua/cemento (A/C) sobre la velocidad de onda, se puede observar que la velocidad de propagación que viaja en un elemento de concreto disminuye a medida que aumenta la relación A/C, se debe a que a mayor cantidad de agua en la mezcla ocasiona que se genere un incremento en la porosidad del medio que obstaculiza el paso de la onda en el material retardando su viaje. De igual manera se encuentran menores valores de densidad y resistencia a la compresión del concreto cuando la relación A/C es mayor, o viceversa, de esta manera se confirma que la metodología de prueba ultrasónica en el concreto se basa en el hecho de que el tiempo de propagación expresa la densidad del material, que puede ser correlacionada con las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.
- Las correlaciones entre la velocidad de propagación de onda y la resistencia a la compresión halladas, son particulares para este determinado tipo de concreto y son útiles para tener una medida próxima a la resistencia de dicho concreto, pero no será la exacta, deben utilizarse con precaución y más como un parámetro de clasificación de calidad y condición del concreto.
- Los ensayos no destructivos y la implementación del software tomográfico permiten evaluar y conocer los posibles defectos e imperfecciones presentes en un elemento estructural. La importancia y gran ventaja de los ensayos no destructivos es que permiten realizar las pruebas sin deteriorar ni maltratar el elemento arrojando información valiosa de su estado. Por otra parte, permite realizar medidas in situ.

- Se generaron imágenes espectrales 2D del interior de elementos estructurales de hormigón armado ya existentes y con defectos conocidos, implementando el software de tomografía, mediante el procesamiento de datos obtenidos por medio de ensayos no destructivos.
- Los ensayos no destructivos son cada vez más aplicados para la investigación de estructuras de hormigón debido a las mejoras tecnológicas en software para la recolección y análisis de datos, ventajas económicas en la evaluación de grandes volúmenes de estructuras de concreto en comparación con otros métodos y la capacidad para realizar evaluaciones rápidas e integrales de las construcciones ya existentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. O. Aguirre, I. Vidaud, L. Peña y E. Vidaud. Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica. Construcción y tecnología en concreto. Volumen 3 (4). Buenos Aires, 2013. 24 p.

[2]. SÁNCHEZ de GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 1996. 133 p.

[3]. VICENTE Fuentes José, YUSTE Javier. Técnicas no destructivas en la evaluación del concreto. Noticreto 115 la revista de la técnica y la construcción. Bogotá, 2012. 96 p.

[4]. GEOTOM CG. Tomographic software for civil and geological engineering applications. 2012.

<http://dev.geotom.net/?page_id=111> [Consulta: 10-10-2014].

[5]. American Concrete Institute. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. 2008.

[6] Norma sismo resistente de Colombia. Título A. Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. 2010.

[7] Romel G., Solís R., Moreno E., y Castillo w. 2004; Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados, Ingeniería, páginas-41. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780204>>. [Consulta: 10-12-2014].

[8]. TORRES Martínez Juan Guillermo, PÉREZ Edison Segundo. “Efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la presencia de daño en concreto sin refuerzo”. Trabajo de grado en Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander (UIS). 2011.

[9] Ariza, D., Atuesta, J., 2010; Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo. (Tesis inédita de pregrado). Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, COL.

[10] NAWWY G. Edward. Concrete Construction Engineering Handbook. Taylor and Francis Group. Second edition.2008.p.21-5; 21-16.

[11] SOLÍS R; BAEZA J. Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto. Revista Técnica de la facultad de ingeniería, universidad Zulia. Venezuela. Vol. 26, nº. 1. (2003). P. 44-55

[12] American Concrete Institute. “Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures” ACI 228.2R-13.

[13] VASQUEZ Coraspe. Luis Alberto. Estudio y caracterización mediante ensayos no destructivos con ultrasonido de materiales compuestos concreto - raspadura de caucho (ripio). Trabajo de grado Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.2003.

[14] Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. ASTM C1383-98^a. Filadelfia, Estados Unidos.

[15] Bogas J., Gomes M., y Gomes A. 2013; Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive pulse velocity method, Ultrasonic 53; 962 – 972. Lisbon, Portugal.

[16] Lu X., Sun Q., Feng W., y Tian J. 2013; Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using oimpact-echo method, Construction and Building Materials; 231-239. Elsevier.

[17] GEOTOMOGRAPHIE, course Sísmica Borhole tomografía. Inversión de los datos de tiempo de llegada aplicando Geotom CG.
<<http://geotomographie.com/html/tomography2.html> > [Consulta: 12-01-2015].

[18] Lehmann, B., 2007, Seismic Traveltime Tomography for Engineering and Exploration Applications. EAGE Publications bv, DB Houton, the Netherlands.

[19] DIAMOND Path, Geotom, installing and running the three-dimensional tomography program. GeoTom, LLC. Apple Valley, MN 55124, Neuwied, Germany, 2012.

[20] GARCÍA Chicue Juan Camilo, GARRIDO Ortiz Gina Marcela. “Evaluación de la ecuación de módulo de elasticidad contemplada en la NSR-10 con las ecuaciones deducidas desde los ensayos no destructivos impact echo y velocidad de pulso ultrasónico”. Trabajo de grado en Ingeniería Civil. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander (UIS). 2015.

[21] Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos)”. NTC 77, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2007.

[22] Instituto Colombiano de Normas Técnicas “Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado”. NTC 92, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

[23] Instituto Colombiano de Normas Técnicas “Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”. NTC 127, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2000.

[24] Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso”. NTC 176, MICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

[25] Instituto Colombiano de Normas Técnicas.” Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino”. NTC 237, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

[26] American Concrete Institute. “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete” ACI 211.1- 91

[27] Universidad Nacional de Colombia. Cursos. Composición del concreto simple.
Sede Manizales.
<<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/capitul>
> [Consulta: 23-10-2014].

[28] Fraguado del Concreto. Arqhys Arquitectura & Decoración.
<<http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html>> [Consulta: 23-10-2014].

[29] Rivera, G. 2010; Concreto Simple. Cali: Universidad del Cauca. 267 p.

[30] QUINTERO L, HERRERA J. 2011. Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluado a partir de parámetros ultrasónicos, Revista ION, 24 (1); Pág. 69-76.

[31] CESPEDES García Marco Antonio, “Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de ultrasonido”. Trabajo de grado en Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Piura. Universidad de Piura (UDP). 2013.

[32] Patología del Hormigón. Causas y Soluciones del Concreto. <<http://www.udc.es/dep/dtcon/.../pub.../Patologia/trasparencias%20patologia.pdf>> [Consulta: 20-10-2015].

[33] Patología, saneamiento y rehabilitación estructural (jun 2013) <<http://www.javerianacali.edu.co/educacioncontinual>> [Consulta: 11-11-2014].

[34] Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto”. NTC 4325, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1997.

[35] American Society for Testing Materials “Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the Impact Echo method” ASTM C1383, United States, 2009

BIBLIOGRAFÍA

American Concrete Institute. "Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures" ACI 228.2R-13.

American Concrete Institute. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete" ACI 211.1- 91

American Concrete Institute. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.2008.

American Society for Testing Materials "Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the Impact Echo method" ASTM C1383, United States, 2009

ARIZA, D., ATUESTA, J., 2010; Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo. (Tesis inédita de pregrado). Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, COL.

BOGAS J., GOMES M., y GOMES A. 2013; Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive pulse velocity method, Ultrasonic 53; 962 – 972. Lisbon, Portugal.

CESPEDES GARCÍA, M. A. "Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de ultrasonido". Trabajo de grado en Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Piura. Universidad de Piura (UDP). 2013.

DIAMOND Path, Geotom, installing and running the three-dimensional tomography program. GeoTom, LLC. Apple Valley, MN 55124, Neuwied, Germany, 2012.

Fraguado del Concreto. Arqhys Arquitectura & Decoración. Disponible en: <<http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html>> [Consulta: 23-10-2014].

GARCÍA CHICUE, J. C.; GARRIDO ORTIZ, G. M. “Evaluación de la ecuación de módulo de elasticidad contemplada en la NSR-10 con las ecuaciones deducidas desde los ensayos no destructivos impact echo y velocidad de pulso ultrasónico”. Trabajo de grado en Ingeniería Civil. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander (UIS). 2015.

GEOTOM CG. Tomographic software for civil and geological engineering applications. 2012. Disponible en: <http://dev.geotom.net/?page_id=111> [Consulta: 10-10-2014].

GEOTOMOGRAPHIE, course Sísmica Borhole tomografía. Inversión de los datos de tiempo de llegada aplicando Geotom CG. Disponible en: <<http://geotomographie.com/html/tomography2.html> > [Consulta: 12-01-2015].

Instituto Colombiano de Normas Técnicas “Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado”. NTC 92, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas “Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”. NTC 127, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2000.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso”. NTC 176, MICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto”. NTC 4325, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1997.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. “Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos)”. NTC 77, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2007.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas.” Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino”. NTC 237, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

LEHMANN, B., 2007, Seismic Travelttime Tomography for Engineering and Exploration Applications. EAGE Publications bv, DB Houton, the Netherlands.

LU X., SUN Q., FENG W., y TIAN J. 2013; Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using oimpact-echo method, Construction and Building Materials; 231-239. Elsevier.

NAWWY G. E. Concrete Constrution Enginnering Handbook. Taylor and Francis Group. Second edition.2008.p.21-5; 21-16.

Norma sismo resistente de Colombia. Titulo A. Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. 2010.

O. AGUIRRE, I. VIDAUD, L. PEÑA y E. Vidaud. Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica. Construcción y tecnología en concreto. Volumen 3 (4). Buenos Aires, 2013. 24 p.

Patología del Hormigón. Causas y Soluciones del Concreto. Disponible en: <<http://www.udc.es/dep/dtcon/.../pub.../Patologia/trasparencias%20patologia.pdf>> [Consulta: 20-10-2015].

Patología, saneamiento y rehabilitación estructural (jun 2013). Disponible en: <<http://www.javerianacali.edu.co/educacioncontinual>> [Consulta: 11-11-2014].

QUINTERO L, HERRERA J. 2011. Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluado a partir de parámetros ultrasónicos, Revista ION, 24 (1); Pág. 69-76.

RIVERA, G. 2010; Concreto Simple. Cali: Universidad del Cauca. 267 p.

ROMEL G., SOLIS R., MORENO E., y CASTILLO w. 2004; Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados, Ingeniería, páginas-41. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780204>>. [Consulta: 10-12-2014].

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, D. Tecnología del Concreto y Mortero. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 1996. 133 p.

SOLÍS R.; BAEZA J. Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto. Revista Técnica de la facultad de ingeniería, universidad Zulia. Venezuela. Vol. 26, n°. 1. (2003). P. 44-55

Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. ASTM C1383-98^a. Filadelfia, Estados Unidos.

TORRES MARTÍNEZ, J. G.; PÉREZ EDISON, S. “Efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la presencia de daño en concreto sin refuerzo”. Trabajo de grado en Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander (UIS). 2011.

Universidad Nacional de Colombia. Cursos. Composición del concreto simple. Sede Manizales. Disponible en: <<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/capitul>> [Consulta: 23-10-2014].

VASQUEZ CORASPE, L. A. Estudio y caracterización mediante ensayos no destructivos con ultrasonido de materiales compuestos concreto - raspadura de caucho (ripio). Trabajo de grado Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.2003.

VICENTE FUENTES, J. YUSTE, J. Técnicas no destructivas en la evaluación del concreto. Noticreto 115 la revista de la técnica y la construcción. Bogotá, 2012. 96 p.

ANEXOS.

ANEXO A. Caracterización de materiales suministrados por la empresa CEMEX COLOMBIA S.A, seccional Bucaramanga, para ejecución de proyecto. Datos para diseño de mezcla ACI 211.

AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
TMN	25.40 mm (1")	TMN	2.70
Absorción (%)	0.44	Absorción (%)	1.35
% de Vacios	0.59	% de Vacios	34.73
Gravedad Especifica	2.64	Gravedad Especifica	2.60

ANEXO B. Diseños de mezcla siguiendo el método de volumen absoluto especificado en la ACI 211 para cada relación A/C: 0.47, 0.52, 0.58.

DISEÑO DE MEZCLA RELACIÓN A/C = 0.47				
(Diseño para 1 m ³ de concreto)				
MATERIAL	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m³]	VOLUMEN [m³]	PORCENTAJE [%]
Cemento	404.26	3100.00	0.130	13.041
Aire	0.00	0.00	0.015	1.500
Agua	190.00	1000.00	0.190	19.000
Grava	1058.08	2640.00	0.401	40.079
Arena	685.90	2600.00	0.264	26.381
Resistencia de diseño [MPa]			28	

DISEÑO DE MEZCLA RELACIÓN A/C = 0.52				
(Diseño para 1 m ³ de concreto)				
MATERIAL	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m³]	VOLUMEN [m³]	PORCENTAJE [%]
Cemento	365.40	3100.00	0.118	11.787
Aire	0.00	0.00	0.015	1.500
Agua	190.00	1000.00	0.190	19.000
Grava	1058.08	2640.00	0.401	40.079
Arena	718.50	2600.00	0.276	27.635
Resistencia de diseño [MPa]			24	

DISEÑO DE MEZCLA RELACIÓN A/C = 0.58				
(Diseño para 1 m ³ de concreto)				
MATERIAL	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m³]	VOLUMEN [m³]	PORCENTAJE [%]
Cemento	327.60	3100.00	0.106	10.568
Aire	0.00	0.00	0.015	1.500
Agua	190.00	1000.00	0.190	19.000
Grava	1058.08	2640.00	0.401	40.079
Arena	750.20	2600.00	0.289	28.854
Resistencia de diseño [MPa]			21	

ANEXO C. Valores de resistencia, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Resistencia de Diseño [MPa]	Resistencia (f'c) [MPa]
0.58	1	21	22.53
	2		21.67
	3		22.46
	4		23.87
	5		19.38
	6		21.90
	7		21.72
	8		18.62
	9		19.41
	10		21.59
	11		20.24
	12		21.51

ANEXO D. Valores de resistencia, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Resistencia de Diseño [MPa]	Resistencia (f'c) [MPa]
0.52	1	24	23.32
	2		18.61
	3		25.20
	4		25.51
	5		22.81
	6		24.31
	7		25.50
	8		22.17
	9		23.37
	10		23.14
	11		24.13
	12		23.94
	13		26.56
	14		24.97
	15		25.71
	16		23.21
	17		24.01

ANEXO E. Valores de resistencia, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Resistencia de Diseño [MPa]	Resistencia (f'c) [MPa]
0.47	1	28	29.64
	2		26.06
	3		30.97
	4		26.40
	5		26.11
	6		28.43
0.47	7	28	28.08
	8		25.77
	9		25.53
	10		26.84
	11		27.48
	12		26.66
	13		26.60
	14		26.91
	15		28.85
	16		24.37
	17		28.38
	18		29.85
	19		28.73
	20		32.17
	21		26.39

ANEXO F. Valore de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de UPV para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad UPV (m/s)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (f'c) [MPa]
0.58	1	3111.78	2324.87	22.53
	2	3176.23	2351.65	21.67
	3	3157.89	2347.51	22.46
	4	3314.92	2349.75	23.87
	5	3092.22	2195.83	19.38
	6	3141.36	2403.75	21.90
	7	3272.73	2366.93	21.72
	8	3191.49	2355.51	18.62
	9	3214.29	2341.79	19.41
	10	3249.10	2344.08	21.59
	11	3278.69	2358.89	20.24
	12	3233.67	2361.37	21.51

ANEXO G. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de UPV para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad (m/s)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (f'c)
0.52	1	3555.78	2352.12	23.32
	2	3571.44	2344.08	18.61
	3	3490.41	2343.66	25.20
	4	3593.89	2343.24	25.51
	5	3554.60	2342.82	22.81
	6	3511.88	2357.28	24.31
	7	3581.85	2371.75	25.50
	8	3552.41	2386.21	22.17
	9	3457.43	2380.52	23.37
	10	3539.87	2374.84	23.14
	11	3430.57	2369.15	24.13
	12	3679.93	2370.7	23.94
	13	3650.81	2365.83	26.56
	14	3538.22	2360.38	24.97
	15	3603.12	2361.8	25.71
	16	3593.89	2368.21	23.21
	17	3574.62	2360.17	24.01

ANEXO H. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de UPV para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (f'c)
0.47	1	3629.76	2397.17	29.64
	2	3616.64	2353.22	26.06
	3	3565.06	2358.89	30.97
	4	3584.23	2338.36	26.40
	5	3558.72	2339.36	26.11
	6	3676.47	2572.85	28.43
	7	3669.72	2548.05	28.08
	8	3603.60	2367.95	25.77
0.47	9	3616.64	2311.95	25.53
	10	3558.72	2370.36	26.84
	11	3616.64	2412.35	27.48
	12	3629.76	2479.62	26.66
	13	3649.64	2484.61	26.60
	14	3649.64	2546.63	26.91
	15	3683.24	2631.34	28.85
	16	3565.06	2608.07	24.37
	17	3656.31	2697.86	28.38
	18	3662.29	2522.99	29.85
	19	3640.22	2452.64	28.73
	20	3623.19	2370.44	32.17
	21	3669.72	2550.42	26.39

ANEXO I. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de I.E para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad I.E (m/s)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (f'c) [MPa]
0.58	1	3311.26	2324.87	22.53
	2	3350.71	2351.65	21.67
	3	3440.07	2347.51	22.46
	4	3442.50	2349.75	23.87
	5	3393.09	2195.83	19.38
	6	3324.78	2403.75	21.90
	7	3415.86	2366.93	21.72
	8	3385.71	2355.51	18.62
	9	3313.26	2341.79	19.41
	10	3385.71	2344.08	21.59
	11	3436.92	2358.89	20.24
	12	3421.18	2361.37	21.51

ANEXO J. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de I.E para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad I.E (m/s)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (f'c) [MPa]
0.52	1	3406.68	2352.12	23.32
	2	3438.54	2344.08	18.61
	3	3474.90	2343.66	25.20
	4	3482.28	2343.24	25.51
	5	3345.48	2342.82	22.81
	6	3363.30	2357.28	24.31
	7	3438.54	2371.75	25.50
	8	3402.18	2386.21	22.17
	9	3327.21	2380.52	23.37
	10	3313.26	2374.84	23.14
	11	3333.24	2369.15	24.13
	12	3440.07	2370.7	23.94
	13	3438.12	2365.83	26.56
	14	3435.24	2360.38	24.97
	15	3390	2361.8	25.71
	16	3444.50	2368.21	23.21
	17	3367.62	2360.17	24.01

ANEXO K. Valores de densidad, resistencia y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo de I.E para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad I.E (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (f'c) [MPa]
0.47	1	3426.92	2397.17	29.64
	2	3349.53	2353.22	26.06
	3	3410.00	2358.89	30.97
	4	3367.62	2338.36	26.40
	5	3316.95	2339.36	26.11
	6	3491.73	2572.85	28.43
	7	3388.68	2548.05	28.08
	8	3418.56	2367.95	25.77
0.47	9	3387.19	2311.95	25.53
	10	3440.07	2370.36	26.84
	11	3402.18	2412.35	27.48
	12	3455.19	2479.62	26.66
	13	3369.33	2484.61	26.60
	14	3458.16	2546.63	26.91
	15	3511.35	2631.34	28.85
	16	3462.26	2608.07	24.37
	17	3492.04	2697.86	28.38
	18	3450.12	2522.99	29.85
	19	3425.56	2452.64	28.73
	20	3513.42	2370.44	32.17
	21	3352.86	2550.42	26.39

ANEXO L. Valores de resistencia a la compresión teórica de UPV, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad UPV (m/s)	Modulo de Elasticidad teorico (MPa) [UPV]	f'c teorico (MPa) [UPV]	Resistencia (f'c) [MPa]	% Error
0.58	1	3111.78	20260.94	16.87	22.53	25.10
	2	3176.23	21352.03	18.11	21.67	16.44
	3	3157.89	21069.00	17.72	22.46	21.09
	4	3314.92	23238.62	21.50	23.87	9.93
	5	3092.22	18896.53	17.42	19.38	10.11
	6	3141.36	21348.49	16.95	21.90	22.60
	7	3272.73	22816.46	20.28	21.72	6.64
	8	3191.49	21593.07	18.43	18.62	1.03
	9	3214.29	21775.12	19.07	19.41	1.75
	10	3249.10	22271.07	19.89	21.59	7.87
	11	3278.69	22821.85	20.50	20.24	1.27
	12	3233.67	22222.76	19.37	21.51	9.93

ANEXO M. Valores de resistencia a la compresión teórica de UPV, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad (m/s)	Modulo de Elasticidad teorico (MPa) [UPV]	f'c teorico (MPa) [UPV]	Resistencia (f'c) [MPa]	% Error
0.52	1	3555.78	26765.28	28.44	23.32	21.94
	2	3571.44	26909.25	29.04	18.61	56.04
	3	3490.41	25697.45	26.50	25.2	5.15
	4	3593.89	27238.85	29.79	25.51	16.76
	5	3554.60	26641.76	28.51	22.81	24.99
	6	3511.88	26165.74	27.00	24.31	11.06
	7	3581.85	27385.85	29.04	25.5	13.87
	8	3552.41	27101.75	27.92	22.17	25.95
	9	3457.43	25610.68	25.11	23.37	7.46
	10	3539.87	26782.52	27.66	23.14	19.54
	11	3430.57	25093.87	24.46	24.13	1.37
	12	3679.93	28893.37	32.36	23.94	35.19
	13	3650.81	28379.48	31.42	26.56	18.28
	14	3538.22	26594.64	27.78	24.97	11.25
	15	3603.12	27595.81	29.86	25.71	16.13
	16	3593.89	27529.12	29.47	23.21	26.98
	17	3574.62	27142.23	28.94	24.01	20.55

ANEXO N. Valores de resistencia a la compresión teórica de UPV, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad (m/s)	Modulo de Elasticidad teorico (MPa) [UPV]	f'c teorico (MPa) [UPV]	Resistencia (f'c) [MPa]	% Error
0.47	1	3629.76	28424.78	30.30	29.64	2.21
	2	3616.64	27702.29	30.42	26.06	16.72
	3	3565.06	26982.61	28.65	30.97	7.49
	4	3584.23	27036.20	29.53	26.40	11.85
	5	3558.72	26664.12	28.69	26.11	9.86
	6	3676.47	31298.18	29.71	28.43	4.50
	7	3669.72	30882.77	29.78	28.08	6.05
	8	3603.60	27675.04	29.80	25.77	15.62
	9	3616.64	27216.45	30.96	25.53	21.28
	10	3558.72	27017.46	28.31	26.84	5.48
	11	3616.64	28398.37	29.67	27.48	7.98
	12	3629.76	29402.45	29.29	26.66	9.86
	13	3649.64	29785.22	29.88	26.60	12.32
	14	3649.64	30528.71	29.15	26.91	8.32
	15	3683.24	32127.69	29.26	28.85	1.43
	16	3565.06	29832.90	25.91	24.37	6.33
	17	3656.31	32459.96	27.72	28.38	2.34
	18	3662.29	30455.34	29.83	29.85	0.06
	19	3640.22	29250.38	29.95	28.73	4.26
	20	3623.19	28006.17	30.42	32.17	5.45
	21	3669.72	30911.50	29.75	26.39	12.74

ANEXO O. Valores de resistencia a la compresión teórica de I.E, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad I.E (m/s)	Modulo de Elasticidad teorico (MPa) [I.E]	f'c teorico (MPa) [I.E]	Resistencia (f'c) [MPa]	% Error
0.58	1	3311.26	22941.81	21.63	22.53	3.97
	2	3350.71	23762.32	22.43	21.67	3.49
	3	3440.07	25002.56	24.96	22.46	11.13
	4	3442.50	25061.79	25.01	23.87	4.76
	5	3393.09	22752.65	25.26	19.38	30.32
	6	3324.78	23914.30	21.27	21.90	2.88
	7	3415.86	24855.82	24.07	21.72	10.80
	8	3385.71	24301.16	23.34	18.62	25.35
	9	3313.26	23136.70	21.53	19.41	10.92
	10	3385.71	24183.24	23.45	21.59	8.63
	11	3436.92	25077.78	24.75	20.24	22.28
	12	3421.18	24874.73	24.27	21.51	12.84

ANEXO P. Valores de resistencia a la compresión teórica de I.E, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.52 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad I.E (m/s)	Modulo de Elasticidad teorico (MPa) [I.E]	f'c teorico (MPa) [I.E]	Resistencia (f'c) [MPa]	% Error
0.52	1	3555.78	24567.71	23.96	23.32	2.73
	2	3571.44	24943.83	24.95	18.61	34.08
	3	3490.41	25469.58	26.03	25.2	3.29
	4	3593.89	25573.29	26.26	25.51	2.92
	5	3554.60	23599.26	22.37	22.81	1.93
	6	3511.88	23998.54	22.71	24.31	6.58
	7	3581.85	25238.27	24.66	25.5	3.29
	8	3552.41	24857.97	23.49	22.17	5.96
	9	3457.43	23717.82	21.54	23.37	7.83
	10	3539.87	23463.24	21.23	23.14	8.25
	11	3430.57	23690.17	21.80	24.13	9.66
	12	3679.93	25249.55	24.72	23.94	3.24
	13	3650.81	25169.12	24.71	26.56	6.96
	14	3538.22	25069.09	24.68	24.97	1.14
	15	3603.12	24427.84	23.40	25.71	9.00
	16	3593.89	25288.04	24.87	23.21	7.15
	17	3574.62	24089.73	22.80	24.01	5.04

ANEXO Q. Valores de resistencia a la compresión teórica de I.E, velocidad, resistencia experimental o real y porcentaje de error para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Velocidad I.E (m/s)	Modulo de Elasticidad teorico (MPa) [I.E]	f'c teorico (MPa) [I.E]	Resistencia (f'c) [MPa]	% Error
0.47	1	3629.76	25336.65	24.07	29.64	18.79
	2	3616.64	23761.44	22.38	26.06	14.12
	3	3565.06	24686.47	23.98	30.97	22.56
	4	3584.23	23867.12	23.01	26.40	12.83
	5	3558.72	23164.21	21.65	26.11	17.09
	6	3676.47	28231.78	24.17	28.43	14.97
	7	3669.72	26333.68	21.65	28.08	22.89
	8	3603.60	24905.85	24.13	25.77	6.36
	9	3616.64	23872.62	23.82	25.53	6.69
	10	3558.72	25245.93	24.72	26.84	7.90
	11	3616.64	25130.28	23.24	27.48	15.44
	12	3629.76	26642.29	24.05	26.66	9.80
	13	3649.64	25385.62	21.70	26.60	18.41
	14	3649.64	27409.34	23.50	26.91	12.69
	15	3683.24	29198.98	24.17	28.85	16.22
	16	3565.06	28137.22	23.05	24.37	5.41
	17	3656.31	29608.77	23.06	28.38	18.74
	18	3662.29	27028.78	23.50	29.85	21.29
	19	3640.22	25902.37	23.49	28.73	18.24
	20	3623.19	26334.90	26.89	32.17	16.40
	21	3669.72	25803.88	20.73	26.39	21.44

ANEXO R. Valores de velocidad UPV, resistencia a la compresión y densidad en probetas defectuosas inducidas en laboratorio para una relación A/C de 0.58 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Condición	Velocidad UPV (m/s)	Densidad (kg/m³)	(f'c) [MPa]
0.58	1	Buen estado	3111.78	2324.87	22.53
	2	Buen estado	3176.23	2351.65	21.67
	3	Buen estado	3157.89	2347.51	22.46
	4	Porosidad baja	3314.92	2349.75	23.87
	5	Porosidad baja	3092.22	2195.83	19.38
	6	Porosidad baja	3141.36	2403.75	21.90
	7	Porosidad baja	3272.73	2366.93	21.72
	8	Porosidad baja	3191.49	2355.51	18.62
	9	Porosidad baja	3214.29	2341.79	19.41
	10	Inclusión madera	3249.10	2344.08	21.59
	11	Inclusión madera	3278.69	2358.89	20.24
	12	Inclusión madera	3233.67	2361.37	21.51

ANEXO S. Valores de velocidad UPV, resistencia a la compresión y densidad en probetas defectuosas inducidas en laboratorio para una relación A/C de 0.47 a 28 días de fraguado.

Relación (A/C)	N° Probeta	Condición	Velocidad UPV (m/s)	Densidad (kg/m³)	(f'c) [MPa]
0.47	13	Buen estado	3782.29	2452.99	29.79
	14	Buen estado	3810.41	2452.99	29.79
	15	Buen estado	3700.36	2452.99	29.79
	16	Porosidad baja	2957.14	2429.86	24.83
	17	Porosidad baja	2961.37	2429.86	24.83
	18	Porosidad baja	2969.87	2429.86	24.83
	19	Porosidad baja	2687.75	2295.21	18.45
	20	Porosidad baja	2771.74	2295.21	18.45
	21	Porosidad baja	2764.23	2295.21	18.45
	22	Indusión madera	3576.39	2373.50	22.07
	23	Indusión madera	3595.11	2373.50	22.07
	24	Indusión madera	3557.86	2373.50	22.07

ANEXO T. Valores de velocidad UPV en vigas con y sin refuerzo y porcentaje de incremento de velocidad debido a la presencia de refuerzo.

Datos tomados en dirección perpendicular a las barras de acero.

DATOS	Velocidad UPV (m/s) Presencia de refuerzo barras perpendiculares al pulso	Viga sin refuerzo Velocidad UPV (m/s)	INCREMENTO DE VELOCIDAD (%)
1	3109.76	3030.43	2.55
2	3207.55	3019.29	5.87
3	3194.15	3013.75	5.65
4	3109.76	3047.31	2.01
5	3180.87	3030.43	4.73
6	3161.16	3019.29	4.49
7	3174.27	3041.66	4.18
8	3200.84	3036.03	5.15
9	3180.87	3013.75	5.25
10	3141.68	2991.79	4.77
11	3128.83	3030.43	3.15
12	3116.09	3047.31	2.21
13	3116.09	3013.75	3.28
14	3194.15	3022.68	5.37
15	3122.45	3099.55	0.73
16	3097.17	2927.88	5.47
17	3078.47	3064.38	0.46
18	3148.15	3099.13	1.56
19	3129.76	3067.31	2.00

ANEXO U. Valores de velocidad UPV en vigas con y sin refuerzo y porcentaje de incremento de velocidad debido a la presencia de refuerzo.

Datos tomados en dirección perpendicular a las barras de acero.

DATOS	Velocidad UPV (m/s) Presencia de refuerzo barras paralelas al pulso	Viga sin refuerzo Velocidad UPV (m/s)	INCREMENTO DE VELOCIDAD (%)
1	3491.46	3030.43	13.20
2	3494.11	3019.29	13.59
3	3514.13	3013.75	14.24
4	3522.21	3047.31	13.48
5	3524.90	3030.43	14.03
6	3527.61	3019.29	14.41
7	3511.46	3041.66	13.38
8	3500.84	3036.03	13.28
9	3498.87	3013.75	13.87
10	3514.68	2991.79	14.88
11	3521.83	3030.43	13.95
12	3509.96	3047.31	13.18