

**EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MODULO DE ELASTICIDAD
CONTEMPLADA EN LA NSR-10 CON LAS ECUACIONES DEDUCIDAS DESDE
LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS IMPACT ECHO Y VELOCIDAD DE
PULSO ULTRASÓNICO**

**JUAN CAMILO GARCÍA CHICUE
GINA MARCELA GARRIDO ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MODULO DE ELASTICIDAD
CONTEMPLADA EN LA NSR-10 CON LAS ECUACIONES DEDUCIDAS DESDE
LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS IMPACT ECHO Y VELOCIDAD DE
PULSO ULTRASÓNICO**

**JUAN CAMILO GARCÍA CHICUE
GINA MARCELA GARRIDO ORTIZ**

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

**Director:
LUIS EDUARDO ZAPATA
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme terminar esta bonita etapa de forma exitosa y por darme la fortaleza necesaria en los momentos difíciles.

A mis padres Hernando Garrido y Sara Ortiz Ortiz, por llenar mis días de amor y de felicidad. Gracias por tanto sacrificio y esfuerzo. Gracias por todo el apoyo que me han dado durante tantos años, por ser el motor de mi vida y por creer en mí en los momentos en que ni yo misma lo hacía.

A mis familiares por todo el apoyo y cariño que me dieron durante estos años

A mis amigos por hacer parte de esta etapa de mi vida y por regalarme tantas sonrisas, gracias por la amistad incondicional que me han brindado. Gracias por ser amigos del corazón.

Y finalmente a mi compañero y amigo Juan Camilo García por todo el esfuerzo compartido y por todo el apoyo que me brindo en el final de esta etapa, este éxito es compartido Juancho.

Gina Marcela Garrido Ortiz

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Cecilia Chicué por el apoyo incondicional, su paciencia y su entendimiento para cumplir con este logro importante en mi vida. Gracias por creer en mí.

A mi compañera y amiga de proyecto Gina Marcela por todo el empeño y dedicación para cumplir con la investigación.

A mis compañeros que hicieron parte de todo el proceso académico durante estos años, gracias por su amistad y sus aportes para sacar esta carrera adelante.

Juan Camilo García Chicué

Agradecemos a nuestro director de proyecto el PhD. Luis Eduardo Zapata Orduz por su confianza y apoyo en el proceso de realización de esta investigación. Gracias al Ingeniero Carlos Eduardo Ruiz Navarro por su acompañamiento y asesoría, lo cual hizo posible la culminación de esta investigación. Gracias a la empresa CEMEX COLOMBIA S.A.S por brindarnos los materiales necesarios para la elaboración de las muestras de concreto, de igual forma agradecemos a la empresa KER Internatinal Group S.A por brindarnos total disposición de los equipos para las pruebas no destructivas realizadas a las probetas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. ANTECEDENTES	22
2. MATERIALES	26
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	30
3.1 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON RESPECTO A LA RELACIÓN A/C.	31
3.2 PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES PROPIAS DE LOS END.	33
3.2.1 Planteamiento ecuación I.E para 14 días de fraguado	36
3.2.2 Planteamiento ecuación UPV para 14 días de fraguado	41
3.2.3 Análisis de datos obtenidos por medio de la ecuación propia de los ensayos destructivos	46
3.3 CORRELACIÓN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO CON TEÓRICO	46
3.3.1 Correlación de módulo de elasticidad estático con las ecuaciones propias de UPV	46
3.3.2 Correlación de módulo de elasticidad estático con las ecuaciones propias de I.E	47
3.3.3 Correlación de módulo de elasticidad estático en función de valores de $f'c$, velocidad y densidad	48
3.3.4 Correlación de módulo de elasticidad estático en función de valores de velocidad	52
3.4 EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN CONTEMPLADA EN LA NSR-10, CON LAS ECUACIONES DE I.E Y UPV.	55

3.4.1 Evaluación de la ecuación de la NSR-10 con las ecuaciones obtenido por medio del ensayo de UPV	56
3.4.2 Evaluación de la ecuación de la NSR-10 con las ecuaciones obtenido por medio del ensayo de I.E	57
3.4.3 Discusión de resultados	58
4. CONCLUSIONES.	59
5. OBSERVACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Velocidad UPV Vs A/C.	32
Figura 2. Velocidad I.E. Vs A/C.	32
Figura 3. Relación de E estático vs Et UPV.	33
Figura 4. Relación de E estático vs Et I.E.	34
Figura 5. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47 37	
Figura 6. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,52 37	
Figura 7. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58 38	
Figura 8. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47.	39
Figura 9. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,52.	40
Figura 10. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58	40
Figura 11. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47.	42
Figura 12. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,52.	42
Figura 13. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58.	43
Figura 14. E en función de la velocidad, $f'c$, densidad	44
Figura 15. E en función de la velocidad, $f'c$, densidad	44
Figura 16. E en función de la velocidad, $f'c$, densidad	45

Figura 17. Correlación de los valores de módulo de elasticidad. E estático con E UPV	47
Figura 18. Correlación de los valores de módulo de elasticidad. E estático con Et a partir de I.E.	48
Figura 19. Valores de E estático en función de $f'c$, densidad y velocidad	50
Figura 20. Valores de E estático en función de $f'c$, densidad y velocidad	51
Figura 21. Valores de E estático vrs valores de E teórico I.E.	53
Figura 22. Valores de E estático vrs valores de E teórico I.E.	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.	27
Tabla 2. Tamaño de muestra día 14, resistencia de $f'c = 2400$ Psi.	28
Tabla 3. Tamaño de muestra día 14, resistencia de $f'c = 2800$ Psi.	28
Tabla 4. Tamaño de muestra día 14, resistencia de $f'c = 3200$ Psi.	28
Tabla 5. Tamaño de muestra de probetas en el día 28 para las resistencias de 3000 Psi, 3500 Psi y 4000 Psi.	29
Tabla 6. Errores de módulo de elasticidad estático y teórico.	34
Tabla 7. Tabla de ecuaciones según su relación A/C.	38
Tabla 8. Tabla de porcentaje de error a 28 días de fraguado.	39
Tabla 9. Tabla de ecuaciones según su relación A/C.	41
Tabla 10. Tabla de porcentaje de error a 28 días de fraguado	41
Tabla 11. Tabla de ecuaciones según su relación A/C.	43
Tabla 12. Tabla de porcentaje de error a 28 días de fraguado	43
Tabla 13. Tabla de ecuaciones según su relación A/C	45
Tabla 14. Tabla de porcentaje de error, a 28 días de fraguado.	45
Tabla 15. Ecuaciones de módulo de elasticidad a partir de $f'c$, densidad y velocidad, para UPV.	49
Tabla 16. Ecuaciones de módulo de elasticidad a partir de $f'c$, densidad y velocidad, para UPV.	50
Tabla 17. Errores entre los valores de E_t a partir de I.E. y los valores de E estático.	52

Tabla 18. Ecuaciones de E estático vrs E teórico del UPV en función de la velocidad.	53
Tabla 19. Ecuaciones de E estático y E teórico del I.E. en función de la velocidad.	54
Tabla 20. Valores teóricos de f_c y velocidad.	56
Tabla 21. Valores de módulo de elasticidad estático y teórico a partir de UPV.	57
Tabla 22. Valores de módulo de elasticidad estático y teórico a partir de I.E.	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,58 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia total.	68
ANEXO B. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,52 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia total.	69
ANEXO C. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,47 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia total.	70
ANEXO D. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,58 a 28 días de fraguado.	71
ANEXO E. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,52 a 28 días de fraguado.	72
ANEXO F. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,47 a 28 días de fraguado.	73
ANEXO G. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,58 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.	74
ANEXO H. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,52 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.	75

ANEXO I. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,47 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.	76
ANEXO J. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	77
ANEXO K. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	78
ANEXO L. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	79
ANEXO M. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,58 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.	80
ANEXO N. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,52 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.	81
ANEXO O. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,47 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.	82
ANEXO P. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	83
ANEXO Q. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	84
ANEXO R. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.	85

ANEXO S. (Tabla con porcentaje de error entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del I.E y los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del ensayo de compresión simple.	86
ANEXO T. (Tabla con porcentaje de error entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del UPV y los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del ensayo de compresión simple.	89

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE MODULO DE ELASTICIDAD CONTEMPLADA EN LA NSR-10 CON LAS ECUACIONES DEDUCIDAS DESDE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS IMPACT ECHO Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO*

AUTORES: JUAN CAMILO GARCÍA CHICUE**
GINA MARCELA GARRIDO ORTIZ

PALABRAS CLAVES: Ensayos no destructivos, velocidad de pulso ultrasónico, Impact echo, módulo de elasticidad.

DESCRIPCIÓN

El objetivo de esta investigación es evaluar la ecuación de módulo de elasticidad contemplada en la Norma Sismo Resistente Colombiana de 2010, por medio de su comparación con ecuaciones de módulo de elasticidad deducidas por medio de los ensayos no destructivos Impact Echo (I.E) y velocidad de pulso ultrasónico (UPV) y posteriormente establecer relaciones entre estas ecuaciones. Las muestras de concreto fueron elaboradas en condiciones de laboratorio en donde se tiene en cuenta las mismas condiciones de temperatura y humedad. Se diseñaron mezclas con distintos valores de relación agua/cemento (A/C) y estas fueron ensayadas a 14 y 28 días de fraguado. Esta investigación se plantea con base en que la A/C y la edad del concreto, son factores que afectan directamente el valor de velocidad de propagación de la onda, influyendo así en el valor de resistencia a la compresión de este y a su vez en el valor de módulo de elasticidad característico. En la presente investigación se midió la velocidad de pulso ultrasónico, el Impact Echo y la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas fabricadas con valores de relación (A/C) de 0.47, 0.52 y 0.58. En esta investigación se utilizan las técnicas no destructivas I.E y UPV, que permiten constatar la veracidad de dichos ensayos en la evaluación de cilindros de concreto por medio del planteamiento de ecuaciones características las cuales se correlacionan con los valores de módulo de elasticidad estático, obtenidos por medio de la ecuación planteada en la NSR-10.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata, Ingeniero Civil

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EQUATION Modulus of elasticity CONCERNED NSR-10 DEDUCTED FROM EQUATIONS WITH NON-DESTRUCTIVE TESTING IMPACT ECHO AND SPEED OF ULTRASONIC PULSE*

AUTHORS: JUAN CAMILO GARCÍA CHICUE**
GINA MARCELA GARRIDO ORTIZ

KEYWORDS: Nondestructive testing, ultrasonic pulse velocity, Impact Echo, modulus of elasticity.

DESCRIPTION

The objective of this research is to evaluate the modulus of elasticity equation referred to in Norma Sismo Resistente de 2010, through comparison with modulus of elasticity equations deduced by means of nondestructive testing Impact Echo (IE) and pulse rate ultrasonic (UPV) and subsequently establish relationships between these equations. The concrete samples were elaborated in laboratory conditions where are considered the same conditions of temperature and humidity. Mixtures were designed with different values of water cement ratio (W/C) and these were tested at 14 and 28 days of curing. This research raises based on the W / C and the age of concrete which are factors that directly affect the value of velocity wave propagation in concrete, thus influencing the value of compressive strength of this and in turn the value of characteristic elasticity moduli. In the present investigation are measured ultrasonic pulse velocity, the Impact Echo and the compressive strength of cylindrical specimens with values ratio (W / C) of 0.47, 0.52 and 0.58. This investigation in which nondestructive techniques IE and UPV were used helped to confirm the veracity of such tests in the evaluation of structures by means of characteristic equations approach and through correlations with each other.

* Degree work

** Faculty of Engineering physicommechanical. School of Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata, Civil Engineer

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más usados en el área de la construcción debido a su gran resistencia a la compresión y a su durabilidad ^[1]. Durante los primeros 28 días de curado del concreto, su capacidad de resistencia a la compresión llega a desarrollarse casi en su totalidad, por esta razón es recomendable su estudio durante este periodo. ^[1]

La resistencia a la compresión del concreto ($f'c$) es importante como factor de control, puesto que permite una evaluación preliminar de la calidad del concreto. Este valor de resistencia se encuentra afectado por diversos factores tales como tamaño de agregado, tipo de agregado y A/C, además de factores externos como humedad, temperatura y mezclado. ^[2]

Serrano-Guzmán y Col. ^[3] en su investigación sobre la sensibilidad de la estimación del módulo de elasticidad, plantean que las ecuaciones propuestas para el cálculo del módulo de elasticidad por la Norma Sismo Resistente Colombiana de 1998 (NSR-98), American Concrete Institute (ACI) y el Comité Europeo del Concreto (CEC), sobreestiman este valor en un 50%, 24 % y 46,2% respectivamente. Finalmente el estudio sugiere ecuaciones alternas a las contempladas en la NSR-98 y aconseja que estas sean usadas en lugar de las recomendadas por la norma NSR-98, haciendo énfasis en la fuerte incidencia que tienen los agregados en la calidad del concreto elaborado en Bucaramanga.

El planteamiento anterior abre la posibilidad de proponer una ecuación alterna a la desarrollada en la Norma Sismo Resistente Colombiana de 2010 (NSR-10), estudiando los distintos factores que pueden influenciarla, tales como la densidad y la velocidad obtenida a partir de los ensayos no destructivos. ^[3]

El módulo de elasticidad (E) del concreto está influenciado directamente por el valor de la resistencia a la compresión de este ^[3], el cual se ve afectado por el tipo de agregado y la A/C; en donde esta última es de las más relevantes.

1. ANTECEDENTES

“La importancia de la relación agua/cemento fue descubierta hace 60 años por Duff A. Abrams especialista de EE. UU. Después de haber estudiado un gran número de hormigones de diferentes composiciones, anunció la ley que expresa que con un agregado dado, la resistencia depende sólo de la relación agua/cemento del hormigón fresco. Este descubrimiento ha provocado desarrollos importantes puesto que otras propiedades de gran valor del hormigón, también dependen de la relación agua/cemento.”^[4]

Teniendo en cuenta lo anterior, la A/C, es modificada con el fin de obtener diferentes valores de f_c . Asimismo se quiere observar su influencia en la velocidad de propagación de onda del UPV y el I.E., en los diferentes especímenes de concreto.

Existen métodos destructivos y no destructivos para evaluar la calidad del concreto como es contemplado en la ACI 228^[7]. Métodos como el sonic echo, la respuesta de impulso, el análisis espectral de ondas superficiales, entre otros. El UPV es una prueba no destructiva que consiste en medir el tiempo de viaje de una onda ultrasónica a través de un espesor conocido, permitiendo hacer un análisis interno y detallado del material a estudiar.^[5]

“La medición de la velocidad del pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá (Malhotra y Carino 1991) y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto”.^[5]

Al igual que el UPV, el I.E. es un método no destructivo que permite el estudio del concreto por medio de la propagación de ondas de tensión, generadas por un impacto. Estas ondas viajan a través del material y son reflejadas por las fallas interiores del elemento de análisis o por las superficies externas.^[6]

Estos ensayos permiten conocer la velocidad (C_p) de propagación de la onda en el material. Esta velocidad de cálculo es diferente para cada uno de los ensayos. En el caso del UPV, se calcula dividiendo la longitud (L) que recorre la onda, sobre el tiempo (t) que tarda en realizar dicho recorrido:

$$C_p = L/t \quad (1)$$

Para el caso del I.E, de acuerdo a la Ec.2, el valor de la velocidad es calculado despejando de la fórmula del espesor (T), el producto de la velocidad (C_p) por el tiempo (t), dividido por dos, debido a que la onda es dada por reflexión^[6]:

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

Estas velocidades de onda están directamente relacionadas a las propiedades del material tales como: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson (ν), y la densidad característica del elemento (ρ), tal como se muestra en la ecuación 3.2a de la ACI 228^[7]

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

El I.E. es una tecnología bastante reciente en comparación con el UPV. Se ha venido usando principalmente para la medición exacta de espesores de losas y muros^[8], esto debido a que no es necesario acceder al otro lado de la superficie a analizar para obtener un registro de onda, caso contrario al UPV.

Hasta el momento se han desarrollado diversas investigaciones^[1-4] que buscan estudiar cuales variables tienen mayor influencia en el valor de la velocidad de onda en el concreto. Dentro de estas investigaciones se encuentra la realizada por Ariza y Col. en 2010, en donde se estudia la influencia que tiene la A/C y el tipo de agregado en el valor de velocidad. En este estudio fueron elaborados cilindros con resistencias variables, diferente A/C y variación en el tamaño del agregado de la mezcla. Esta investigación permitió confirmar 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 era de 3/4 y 3/8 de pulgada. 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.^[4]

Bogas y Col.^[2] en 2013, 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. Para esta investigación se consideraron 208 muestras, que contenían valores de resistencia a la compresión entre 30 – 80 MPa y variando la A/C entre 0.3 y 0.65, se realizó un análisis individual de cada variable con el fin de ver su influencia en los resultados finales de resistencia a la compresión; finalmente y por medio del uso de la ecuación 3.2a contemplada en la ACI 228^[7] y la ecuación 1-1 planteada en la Euro Code 2: Design of concrete structures, se logró plantear una expresión que relacionara el valor de velocidad del UPV, con los valores de $f'c$ y densidad del concreto. Este estudio permitió mostrar que la relación entre UPV y el $f'c$ es menos afectada por el volumen de agregado en

concreto de peso ligero. Adicionalmente se notó el aumento del UPV y la f_c con la edad y su disminución con respecto a la A/C y al volumen del agregado.

Por otro lado los estudios realizados por medio del Impact Echo 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. de 2013, esta investigación se encuentra enfocada a encontrar el valor de módulo de elasticidad dinámico (E_d) del concreto utilizando el ensayo de I.E. Para el desarrollo de este trabajo se realizó el estudio de especímenes cilíndricos de 0,15 m de diámetro y de 0,3 m de altura. De forma paralela a estos se realizaron elementos cuadrados de 0,1x0,1x0,4 m, para este caso se consideraron diferentes valores de módulo de elasticidad dinámico (E_d) 25, 35 y 40 GPa, sometidos a impactos de diferente duración, con el fin de estudiar el efecto que dicho impacto causa en la velocidad. El estudio logro validar el uso del I.E como método de cálculo del E_d , puesto que el valor obtenido al tomar la onda se asemeja al encontrado por medio del método tradicional de análisis de frecuencia. Adicionalmente se planteó una expresión que lograba describir el valor del módulo de elasticidad, resaltando el hecho de que el uso de dicha ecuación podía no ser recomendada para concretos elaborados con agregados débiles. Finalmente 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 ^[9]

A pesar de los muchos estudios realizados con los END, estos siguen siendo materia de investigación, debido a que los resultados obtenidos no son definitivos para casos generalizados. ^[1] En este proyecto se quiso comprobar la influencia de la A/C y la edad de evaluación del concreto, en el valor de velocidad de propagación de la onda, con el fin de plantear ecuaciones propias que describan de forma más exacta el valor de módulo de elasticidad obtenido a partir de la velocidad, medida desde los END.

2. MATERIALES

Para esta investigación fueron empleados materiales provenientes del río Chicamoca extraídos en el Departamento de Santander, y aportados por la empresa productora de cemento CEMEX COLOMBIA S.A. 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, todas estas pruebas conforme a las normas NTC 77 ^[10], NTC 92 ^[11], NTC 127 ^[12], NTC 176 ^[13] y NTC 237 ^[14]. Para la elaboración de la mezcla fue escogido cemento Portland de uso general tipo I.

Para la medición de la velocidad de pulso ultrasónico y el ensayo de I.E. se utilizó el equipo desarrollado por Olson Instruments, modelo NDE360 IE-1 NDE 1206188. 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.

Para llevar a cabo las pruebas se realizaron tres diseños de mezcla diferentes, siguiendo el método de volumen absoluto planteado en la norma ACI 211 ^[15], para estos diseños se usó un tamaño máximo nominal (TMN) de agregado de 1"; se fabricaron probetas cilíndricas de 0,2 m de altura y 0,1 m de diámetro, estas probetas fueron desencofradas pasadas 24 horas desde su fundición y fueron curadas en agua y bajo techo durante 28 días ^[17], los ensayos fueron realizados a los días 14 y 28 de edad. A estas probetas, les fueron realizados los ensayos de UPV, ensayo de I.E. y finalmente el ensayo de compresión simple.

Para la realización de las mezclas se emplean tres A/C: 0.45, 0.52 y 0.58, utilizando para estas un número diferente de probetas; para el día 14 se realizan 5, 9 y 12 respectivamente y para el día 28 se elaboran 9, 14 y 19 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 ^[18], plantea una Tabla (6.2) , 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, en la Tabla 1 se muestra esta información:

Tabla 1. Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.

V (%)	Uniformidad	Condiciones en que se obtiene
0 – 5	Excelente	Condiciones de laboratorio
5 – 10	Muy Bueno	Preciso control de materiales y dosificación por masa
10 – 15	Bueno	Buen control de materiales y dosificación por masa
15 – 20	Mediano	Algún control de materiales y dosificación por masa
20 – 25	Malo	Algún control de materiales y dosificación por volumen
>20	Muy malo	Ningún control de materiales y dosificación por volumen.

Fuente: Concreto Simple, Gerardo Rivera ^[18]

Teniendo en cuenta la hipótesis planteada por Rivera se encontraron los tamaños de muestra dependiendo del valor de resistencia esperada en el día de análisis, considerando esto se puede dar un número de probetas necesarias para mantener el valor de desviación establecido. De acuerdo a esto se encontró:

Tabla 2. Tamaño de muestra día 14, resistencia de $f'c = 2400$ Psi.

$F'c$ [Psi]	2400
σ	120
$Z \alpha/2$	1,64
$Z \beta$	1,28
α	5%
β	0,1
Δ	150
Potencia	0,9
N° Probetas	5

Tabla 3. Tamaño de muestra día 14, resistencia de $f'c = 2800$ Psi.

$F'c$ [Psi]	2800
σ	140
$Z \alpha/2$	1,96
$Z \beta$	1,28
α	5%
β	0,1
Δ	150
Potencia	0,9
N° Probetas	9

Tabla 4. Tamaño de muestra día 14, resistencia de $f'c = 3200$ Psi.

$F'c$ [Psi]	3200
σ	160
$Z \alpha/2$	1,96
$Z \beta$	1,28
α	5%
β	0,1
Δ	150
Potencia	0,9
N° Probetas	12

Dónde:

- σ es la desviación estándar
- β porcentaje de incertidumbre del valor obtenido
- α nivel de significancia
- $Z_{\alpha/2}$ distribución normal bilateral
- Δ variación posible de resistencia
- F_c resistencia teórica a la compresión

Del mismo modo fue realizado el análisis estadístico para el tamaño de muestra del día 28, los valores correspondientes son presentados en la (Tabla5:

Tabla 5. Tamaño de muestra de probetas en el día 28 para las resistencias de 3000 Psi, 3500 Psi y 4000 Psi.

Resistencia [Psi]	Desviación	N° Probetas
3000	120	9
3500	140	14
4000	160	19

Partiendo de los datos de velocidad, se realizó un análisis estadístico, con el fin de ver el efecto que la relación A/C y el tiempo de curado tienen sobre el valor de módulo de elasticidad del concreto y de esta forma plantear ecuaciones que se ajusten a su comportamiento.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para la obtención del módulo de elasticidad del concreto se debe contar con la densidad de los cilindros de concreto (ρ) para luego llevar a cabo el ensayo de resistencia a la compresión y de esta forma obtener el valor de módulo de elasticidad estático (E_s) [4]. Para esto se utiliza la Ec. 4. De manera alterna se halla un valor de módulo de elasticidad teórico (E_t), el cual se encuentra mediante velocidades de onda mediante ensayos no destructivos como el UPV y el Impact-echo, en donde la Ec. 3, muestra la relación entre las variables y E_t .

$$E = \rho^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'c} \text{ En MPa.} \quad (4)$$

Para determinar la densidad característica, se secan las muestras al horno durante 80 minutos a una temperatura de 110°C. Posteriormente teniendo las dimensiones de los cilindros y utilizando la Ec. 5 se encuentra el valor de ρ para cada probeta.

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

Todos los resultados de los valores promedios de los ensayos de $f'c$, UPV e I.E. son mostrados en las tablas anexas A - R, estos valores pertenecen a cilindros de concreto que fueron fraguados durante 14 y 28 días, todas las probetas fueron sujetas a las pruebas mencionados previamente bajo los mismos parámetros de humedad y temperatura. Debido a que E_t depende de la velocidad y se tiene una para cada ensayo no destructivo, se resuelve hacer énfasis en la variación de la velocidad con respecto a la relación A/C.

3.1 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON RESPECTO A LA RELACIÓN A/C.

Existe una relación clara entre la relación A/C y la velocidad de UPV, la cual se espera que descienda cuando la relación A/C aumente ^[1, 2], lo anterior puede deberse al peso unitario del material, ya que este es una variable que afecta directamente la velocidad ^[2]. Una mezcla con relación A/C menor tiene menos vacíos entre poros comparada con una relación A/C mayor, esto hace que el viaje de la onda no se vea afectado y recorra la probeta más rápidamente. En la *Fig.2* se aprecia este comportamiento. Conjuntamente se observa como aumenta significativamente la velocidad con la edad de fraguado. Si se sigue exhaustivamente la edad de fraguado la velocidad tiende a aumentar de manera logarítmica con el tiempo. ^[4]

De manera análoga se comporta la velocidad de onda de I.E. *Fig. 3*; en donde se puede llegar a explicar este fenómeno gracias a que los dos ensayos no destructivos tienen el mismo fundamento teórico ^[7], pues la diferencia entre los ensayos está en el receptor de la onda. El UPV debe tener el receptor al otro lado del objeto de estudio, contrario al I.E., para el cual no es necesario acceder al otro lado del elemento ya que además cuenta con su receptor a pocos centímetros del emisor.

Figura 1. Velocidad UPV Vs A/C.

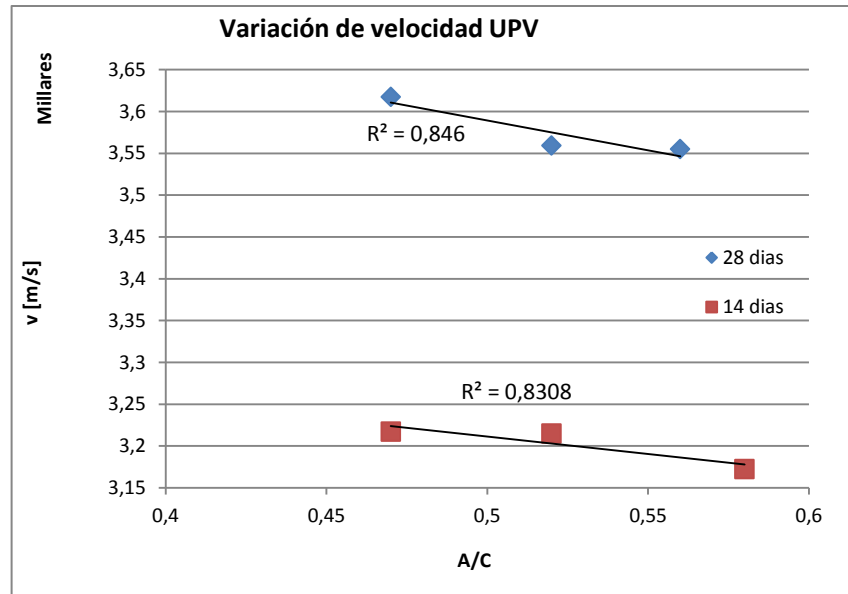
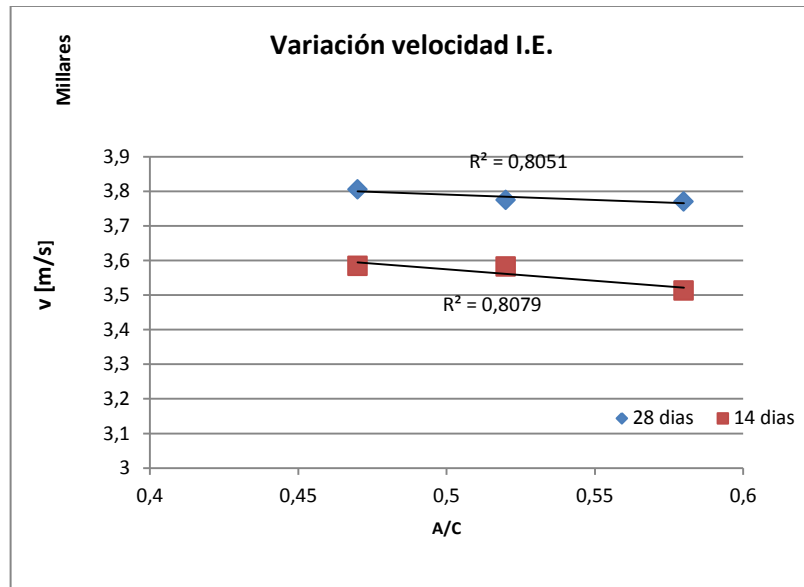


Figura 2. Velocidad I.E. Vs A/C.



3.2 PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES PROPIAS DE LOS END.

Considerando los ensayos efectuados a cada probeta, se realizó una gráfica *Fig. 4* y *Fig. 5*, donde se relacionan los valores de E estático en función de E teóricos, los cuales son calculados por medio de la Ec. 3.2a contemplada en la ACI 228 (3). Estos valores dependen directamente de la resistencia a la compresión la cual es obtenida de manera directa por medio de la prensa hidráulica y de la velocidad captada por los equipos, para los módulos de elasticidad estática y teórica respectivamente.

Figura 3. Relación de E estático vs Et UPV.

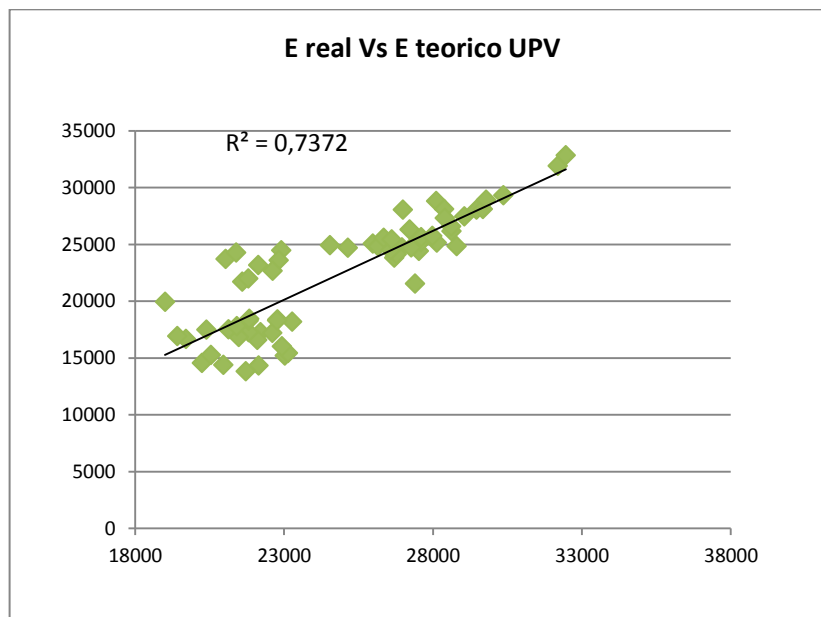


Figura 4. Relación de E estático vs Et I.E.

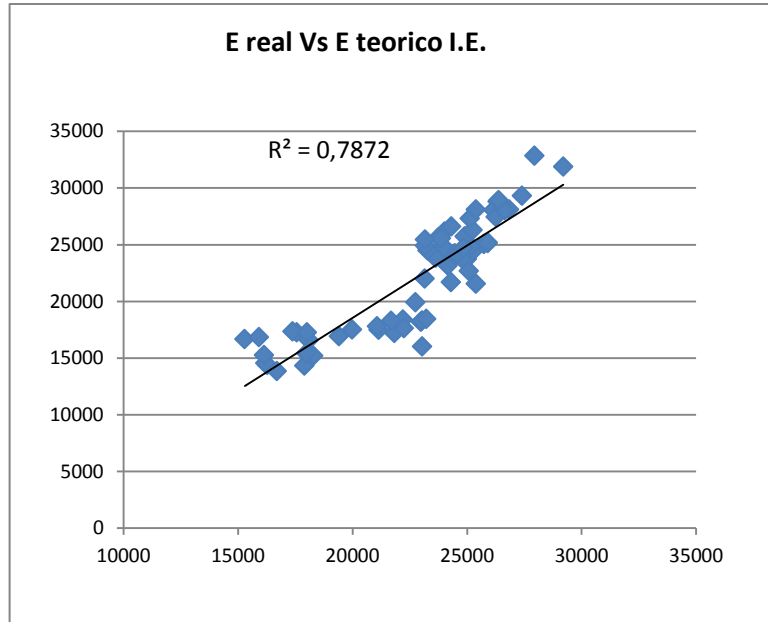


Tabla 6. Errores de módulo de elasticidad estático y teórico.

END	% Error min	% Error promedio	%Error max
UPV	0,26	15,51	56,98
I.E.	0,27	10,11	43,9

La *Fig. 1* y *Fig. 2*, muestran dispersiones aceptables como se refleja en el coeficiente de correlación (R^2) y el porcentaje de error obtenido entre los datos (Tabla 6). Debido a esto y con el fin de mejorar esta dispersión, se decide plantear ecuaciones propias obtenidas a partir de los valores tomados por medio de los ensayos no destructivos. Para evitar tal variación entre los datos, se decide hacer un análisis más detallado con el fin de observar la mayor cantidad de información sobre la influencia de las diferentes variables que puedan afectar directamente el módulo de elasticidad.

Para el análisis se decide dividir la información de la siguiente manera:

❖ Datos

➤ Relación (A/C)

- Datos reales
 - $f'c$ real (leído de la prensa hidráulica)
 - E estático Ec.(4)
- Datos teóricos
 - I.E.
 - ◆ Velocidad
 - ◆ E Ec. (3)
 - ◆ $f'c$ Ec.(4)
 - UPV
 - ◆ Velocidad
 - ◆ E Ec. (3)
 - ◆ $f'c$ Ec. (4)

La Ec. 3 planteada en la ACI 228, muestra que la velocidad es significativa en la determinación del módulo de elasticidad como también lo es la densidad y el coeficiente de Poisson, esta última variable tiene un valor constante para esta investigación, el cual será tomado como 0,2, puesto que no se percibe gran variación cuando este factor cambia.^[19]

Para plantear las ecuaciones correspondientes a cada ensayo, se deben analizar por separado las diferentes mezclas de concreto, los ensayos no destructivos y la edad de fraguado. Los datos tenidos en cuenta para llevar a cabo esta tarea se encuentran en las tablas anexas de la G-R, para obtener los datos de estas tabla se procede con la ejecución de los ensayos no destructivos en cuestión, consecutivamente se dispone a procesar los datos por medio del software propio de cada uno de estos y posteriormente se obtienen velocidades promedio de cada

uno de los ensayos para cada una de la probetas sometidas a las pruebas. Luego los datos se incorporan a la Ec.(3) para obtener el valor de E_t . De esta manera se tienen dos módulos de elasticidad teóricos para cada probeta.

Se desea realizar una relación entre los datos de módulo de elasticidad estático y los datos de módulo de elasticidad teóricos a partir de velocidades medidas en laboratorio. Además, analizar y proponer ecuaciones que se acerquen a los valores calculados con la Ec. (4). Para esto se trabaja con la ayuda del software estadístico Statgraphics.

3.2.1 Planteamiento ecuación I.E para 14 días de fraguado. Inicialmente fue planteada una regresión lineal múltiple que relaciona E estático con la densidad y la velocidad tomada con los equipos I.E y UPV. Para un mayor ajuste de las ecuaciones planteadas se decide separar los datos por relación A/C. Se enseñan las Fig. (4-6) las cuales presentan el valor de R^2 para cada mezcla de concreto y su respectivo ajuste gráfico; asimismo se exponen las ecuaciones en donde figuran los valores de E_s ajustados en función de densidad y velocidad (Tabla 7). Los datos de E_s obtenidos por medio de las ecuaciones descritas en la Tabla 7 presentan errores promedio menores a 5%, estos datos se presentan más detalladamente en la Tabla 8.

Figura 5. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,47

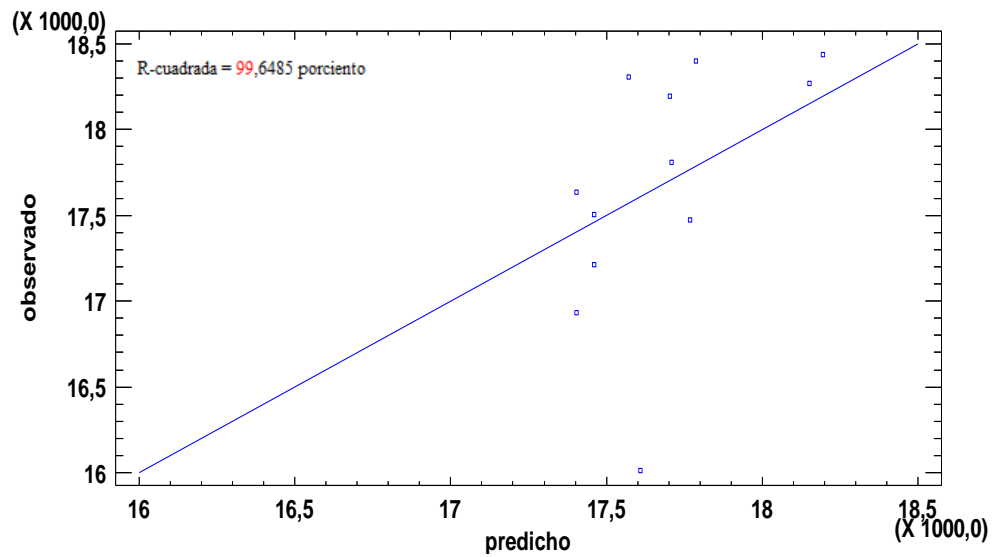


Figura 6. Es en función de la velocidad y densidad con una relacion A/C de 0,52

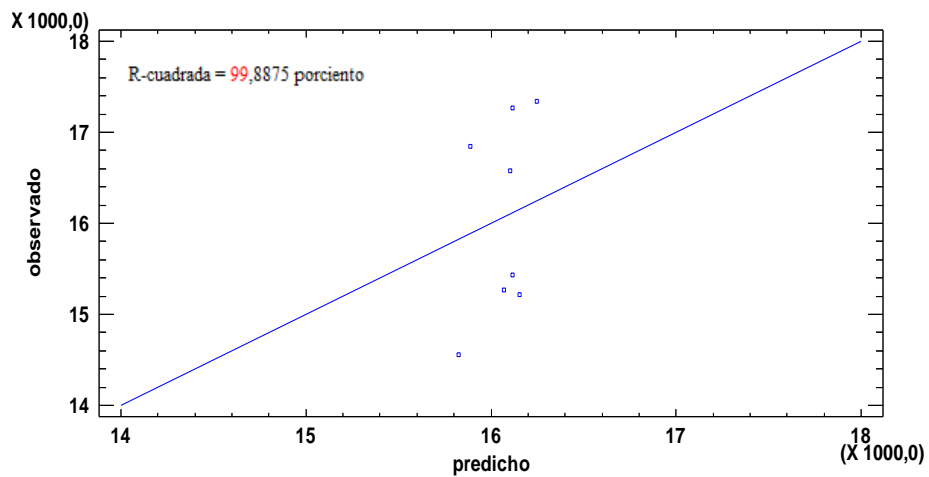


Figura 7. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58

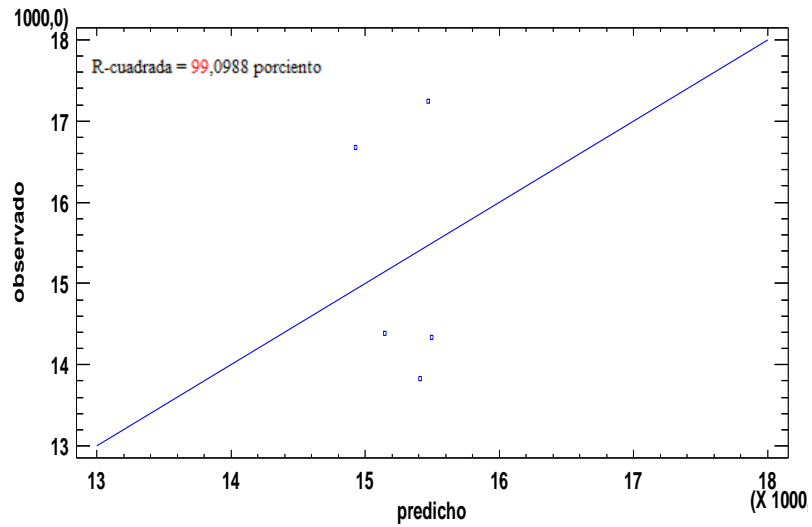


Tabla 7. Tabla de ecuaciones según su relación A/C.

I.E.		
Edad	A/C	Ecuación
14	0,58	$Es = 3,51689 \cdot \rho + 2,49275 \cdot Cp$ (6)
	0,52	$Es = 6,32782 \cdot \rho + 0,455223 \cdot Cp$ (7)
	0,47	$Es = 8,00824 \cdot \rho - 0,329035 \cdot Cp$ (8)

Dónde:

- ρ es la densidad en $[kg/m^3]$
- V es la velocidad en $[m/s]$

Tabla 8. Tabla de porcentaje de error a 28 días de fraguado.

I.E.				
Edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
14	0,58	9,11	11,38	5,29
	0,52	5,77	8,72	2,88
	0,47	2,50	9,98	0,28
Error promedio		4,87		

3.2.1.1 Planteamiento ecuación I.E para 28 días de fraguado: De forma paralela se hacen los análisis de datos para los resultados obtenidos por medio de ensayos destructivos y no destructivos para el día 28. Se plantean las mismas condiciones de análisis usadas para el UPV, logrando así un error promedio entre los datos de E_s muy cercano a 3% (Tabla10). Las Fig. (7-9) muestran los ajustes de los datos gráficamente y su respectivo R^2 para cada relación A/C. Adicionalmente se presentan las ecuaciones de las rectas mostradas en las figuras mencionadas (Tabla 9), en donde E_s está en función de la densidad y la velocidad.

Figura 8. E_s en función de la velocidad y densidad con una relacion A/C de 0,47.

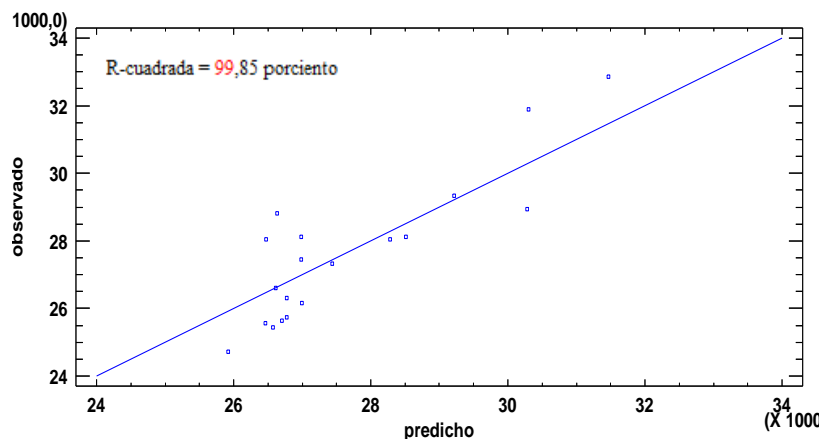


Figura 9. Es en funcion de la velocidad y densidad con una relacion A/C de 0,52.

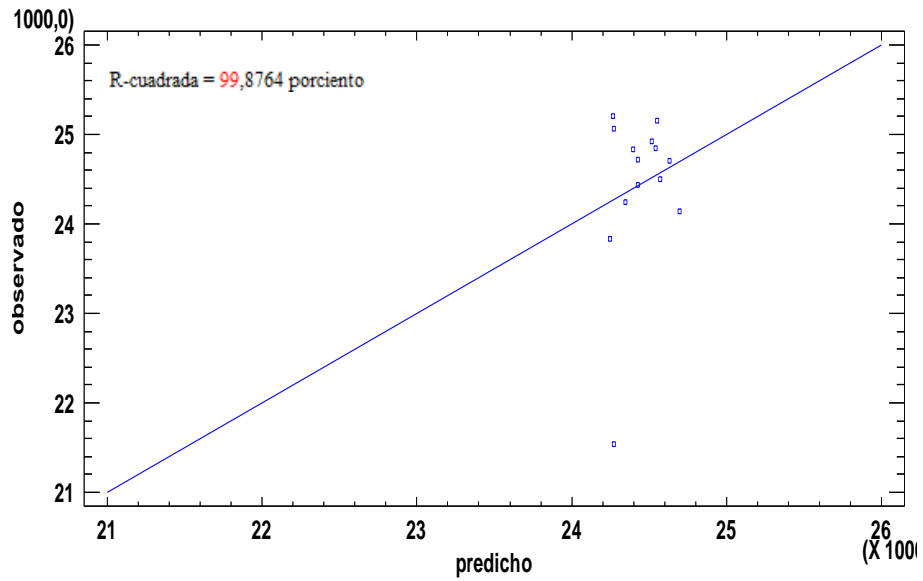


Figura 10. Es en funcion de la velocidad y densidad con una relacion A/C de 0,58

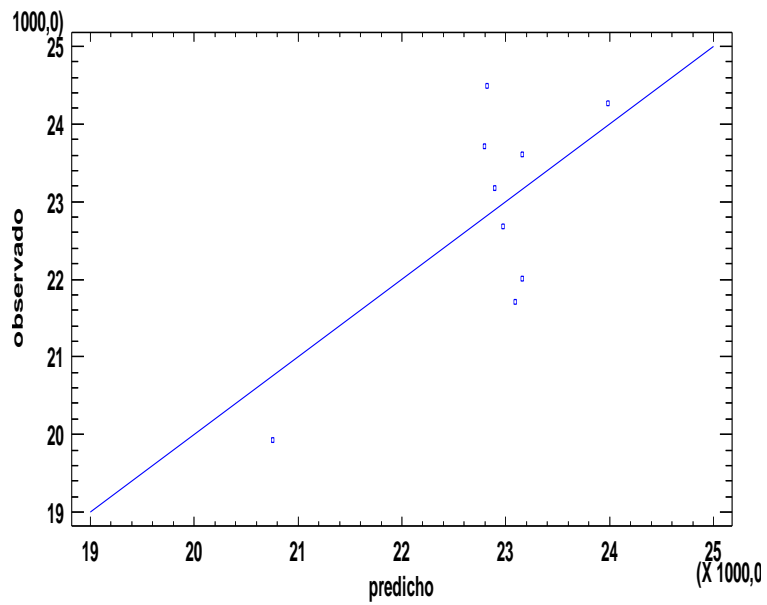


Tabla 9. Tabla de ecuaciones según su relación A/C.

I.E.		
Edad	A/C	Ecuación
28	0,58	$Es = 14,4687*\rho - 3,24661*Cp$ (9)
	0,52	$Es = 10,1875*\rho + 0,113467*Cp$ (10)
	0,47	$Es = 14,0648*\rho - 1,90938*Cp$ (11)

Dónde:

- ρ es la densidad en $[kg/m^3]$
- Cp es la velocidad en $[m/s]$

Tabla 10. Tabla de porcentaje de error a 28 días de fraguado

I.E.				
Edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
28	0,58	3,56	6,80	1,15
	0,52	2,35	12,66	0,02
	0,47	3,25	7,54	0,05
Error promedio		3,02		

3.2.2 Planteamiento ecuación UPV para 14 días de fraguado. Dado a que el UPV tiene el mismo principio teórico que el I.E. se estipulan las mismas condiciones para el análisis. Se plantea una regresión lineal múltiple que relacione el módulo de elasticidad estático hallado con la E_c (4) y las variables: densidad y velocidad. Los datos estudiados pertenecen a una edad de fraguado de 14 días. En la Fig. 10-12 se muestran los datos graficados en base a las ecuaciones mostradas en la Tabla 11. Los datos tienen un error promedio de 5% como se muestra en la Tabla 12.

Figura 11. Es en funcion de la velocidad y densidad con una relacion A/C de 0,47.

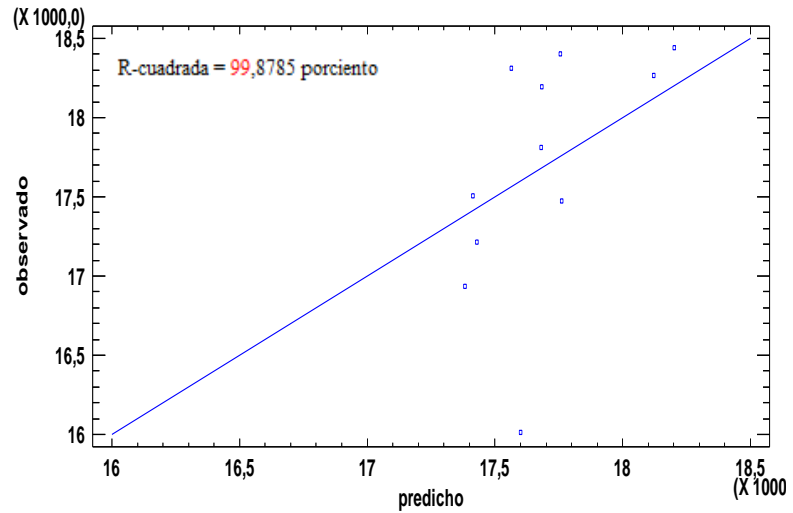


Figura 12. Es en funcion de la velocidad y densidad con una relacion A/C de 0,52.

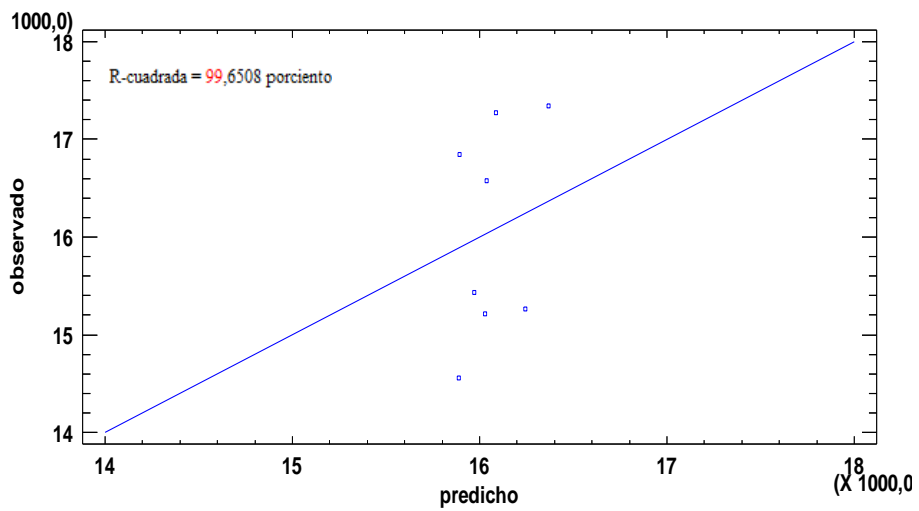


Figura 13. Es en función de la velocidad y densidad con una relación A/C de 0,58.

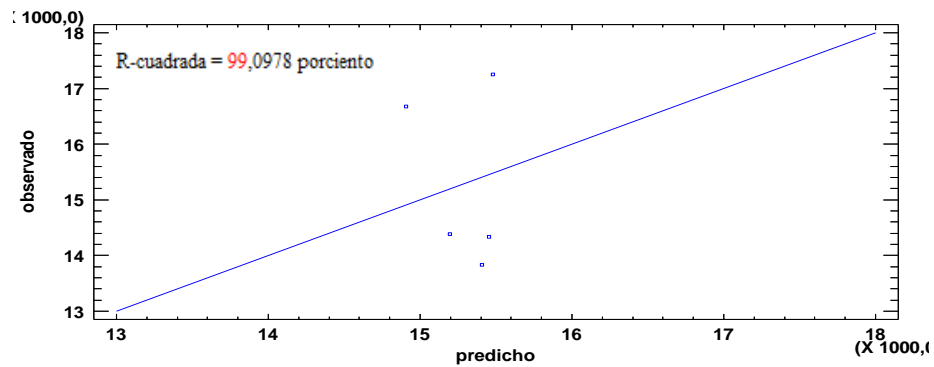


Tabla 11. Tabla de ecuaciones según su relación A/C.

UPV		
Edad	A/C	Ecuación
14	0,58	E ajustado = $2,5563 \cdot \rho + 2,9210 \cdot C_p(12)$
	0,52	E ajustado = $8,5586 \cdot \rho - 1,2128 \cdot C_p(13)$
	0,47	E ajustado = $7,9273 \cdot \rho - 0,27598 \cdot C_p(14)$

Dónde:

- ρ es la densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- C_p es la velocidad en $[\text{m}/\text{s}]$

Tabla 12. Tabla de porcentaje de error a 28 días de fraguado

UPV				
edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
14	0,58	9,13	11,38	5,62
	0,52	5,73	9,16	3,28
	0,47	2,65	9,91	0,54
Error promedio		5,03		

3.2.2.1 Planteamiento ecuación UPV para 28 días de fraguado: Después de hacer el ensayo de UPV se analizan los datos en el software del equipo el cual da información detallada sobre la velocidad de recorrido de la onda. Estos datos pertenecen a una edad de 28 días de fraguado, los cuales son descritos en las ecuaciones (15-17) dependiendo de la relación A/C como se muestra en la Tabla 14. Las Fig. (13-15) muestran de manera gráfica la relación de E_s en función de la densidad y la velocidad.

Figura 14. E en función de la velocidad, $f'c$, densidad

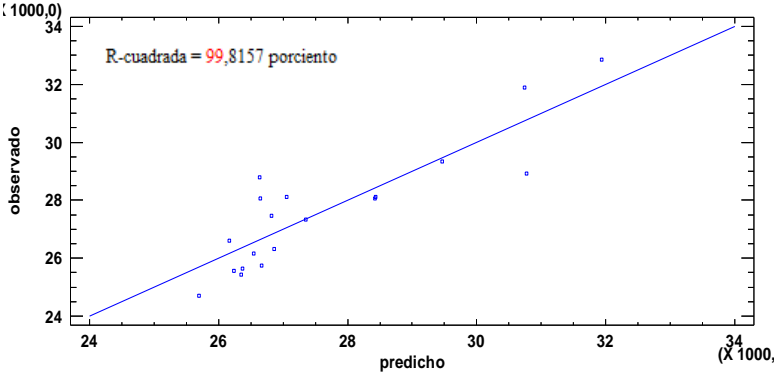


Figura 15. E en función de la velocidad, $f'c$, densidad

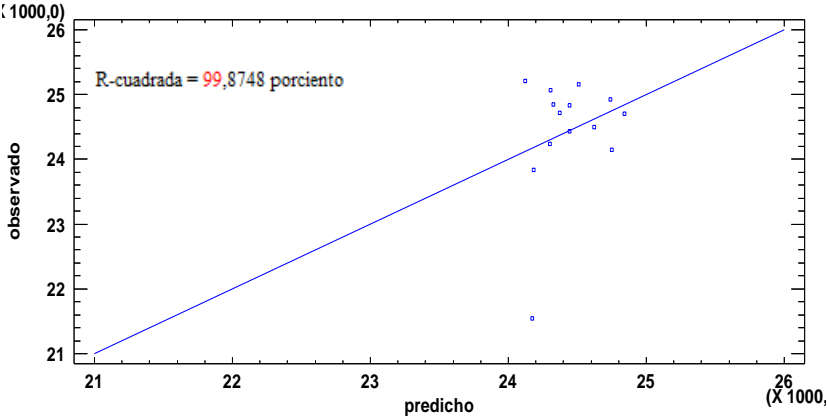


Figura 16. E en función de la velocidad, f'c, densidad

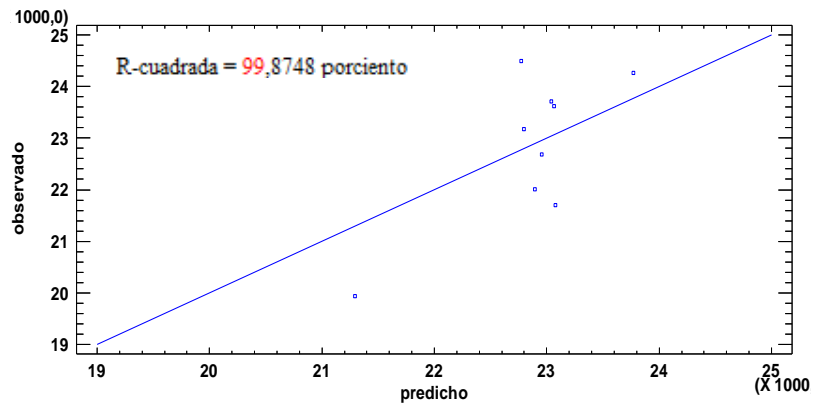


Tabla 13. Tabla de ecuaciones según su relación A/C

UPV		
Edad	A/C	Ecuación
28	0,58	E ajustado= $12,3626 \cdot \rho - 1,89335 \cdot C_p$ (15)
	0,52	E ajustado = $12,9532 \cdot \rho - 1,73364 \cdot C_p$ (16)
	0,47	E ajustado = $16,5528 \cdot \rho - 3,47792 \cdot C_p$ (17)

Dónde:

- ρ es la densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- C_p es la velocidad en $[\text{m}/\text{s}]$

Tabla 14. Tabla de porcentaje de error, a 28 días de fraguado.

UPV				
Edad	A/C	Error promedio %	Error % Max	Error % min
28	0,58	3,80	7,00	1,23
	0,52	2,38	12,20	0,05
	0,47	2,96	7,52	0,10
Error promedio		2,94		

3.2.3 Análisis de datos obtenidos por medio de la ecuación propia de los ensayos no destructivos. Se observa (Tabla 12 y 14) que los datos obtenidos por medio de las ecuaciones propias de I.E. y UPV para los días 14 y 28 tienen un error promedio de 3,7 %. Lo que lleva a pensar que las ecuaciones planteadas a partir de estos dos ensayos son más precisas en comparación a la ecuación 3.2a planteada en la ACI 228. ^[7]

3.3 CORRELACIÓN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO CON TEÓRICO

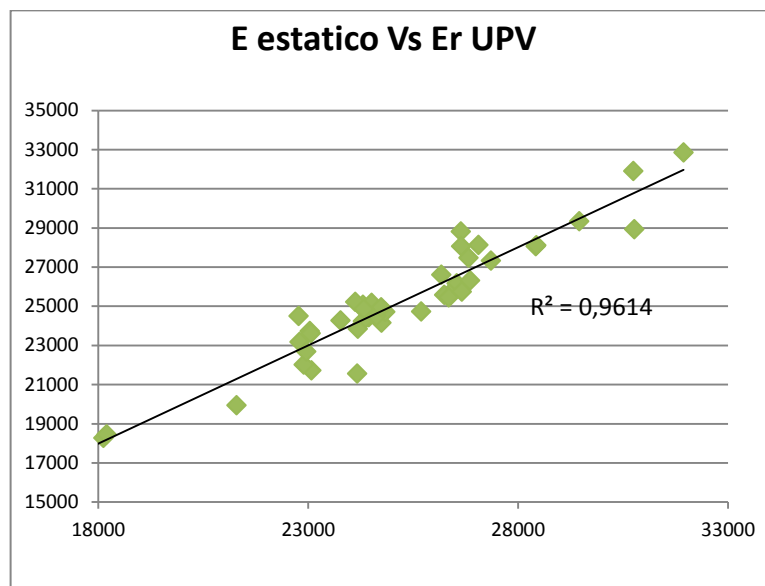
Para correlacionar las ecuaciones planteadas anteriormente con los ensayos no destructivos se procede con el siguiente razonamiento. Se quiere llegar a relacionar los valores teóricos y estáticos de alguna manera que pueda alcanzar los objetivos de la presente investigación; para ello se ha pensado en recurrir en las ecuaciones propias de los ensayos no destructivos planteadas en el numeral 3.2. Estas ecuaciones (6-18) describen el módulo de elasticidad estático ajustado con un porcentaje de error promedio del 3,7%.

3.3.1 Correlación de módulo de elasticidad estático con las ecuaciones propias de UPV. Teniendo en cuenta el planteamiento anterior se presenta la correlación de los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio de las ecuaciones propias de cada uno de los ensayos no destructivos y los valores conseguidos por medio del ensayo de compresión simple de las probetas (*Ver Fig. 16*).

Como se puede observar en la Fig. 16, los valores obtenidos por medio del ensayo de UPV son muy aproximados a los valores de módulo de elasticidad estático logrados durante la investigación, como muestra el valor de R^2 . Esta

correlación permite asegurar que las ecuaciones planteadas (6 – 11) son válidas a la hora de calcular un valor de módulo de elasticidad cuando se cuenta con el valor de velocidad tomado en campo, por medio del UPV. Para este caso el error con respecto al valor estático es de 3,7% aproximadamente.

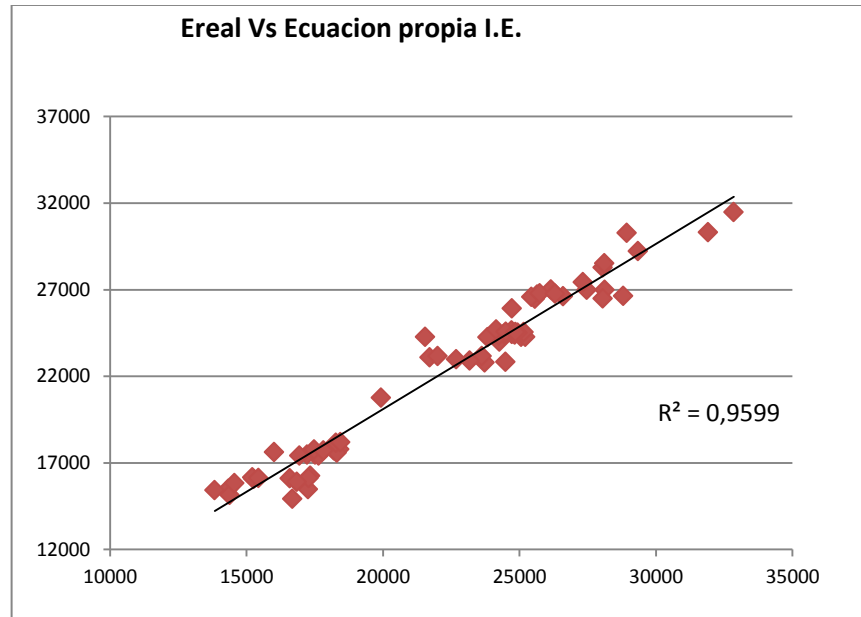
Figura 17. Correlación de los valores de módulo de elasticidad. E estático con E UPV



3.3.2 Correlación de módulo de elasticidad estático con las ecuaciones propias de I.E. La misma situación se observa con respecto a los valores de E obtenidos a partir del ensayo I.E., estos datos son mostrados en la *Fig. 17*, en donde se puede evidenciar con ayuda del valor de R^2 , que los valores de E_t obtenidos por medio del I.E, son muy cercanos a los valores de E calculados a partir del ensayo de compresión simple. Al igual que en el caso anterior, esto muestra que las ecuaciones planteadas para el I.E Ecs. (12 – 18) son válidas para calcular un valor aproximado de módulo de elasticidad, cuando se cuenta con el

valor de velocidad tomado en campo a través del I.E. Para este caso el error con respecto al valor estático es de aproximadamente 3,7%

Figura 18. Correlación de los valores de módulo de elasticidad. E estático con Et a partir de I.E.



3.3.3 Correlación de módulo de elasticidad estático en función de valores de $f'c$, velocidad y densidad. Se estudia el comportamiento del E_s a partir de los valores de $f'c$ obtenido a partir del ensayo de compresión simple, la velocidad tomada desde los END y densidad propia de cada probeta; para esto se plantea una ecuación en función de dichas variables y se estima el porcentaje de error entre estos valores de E_t y los de E_s .

3.3.3.1 Análisis para E_t desde UPV: Según lo dicho anteriormente se procede con el planteamiento de las ecuaciones de E_s en función de $f'c$, densidad y velocidad utilizando para ello el programa estadístico Statgraphics. Para el

análisis se decide dividir los datos conforme a su edad y relación A/C, como se propone en el planteamiento de las ecuaciones propias de los END en el numeral 2.2. De igual forma se idea una regresión lineal múltiple donde se relacionen las variables con los valores de E_s . Lo anterior arroja las ecuaciones mostradas en la Tabla 15. Adicionalmente se muestra como se correlacionan los datos logrados con las Ecs. (18-23) y los valores obtenidos de la Ec. 4, en la Fig. 18.

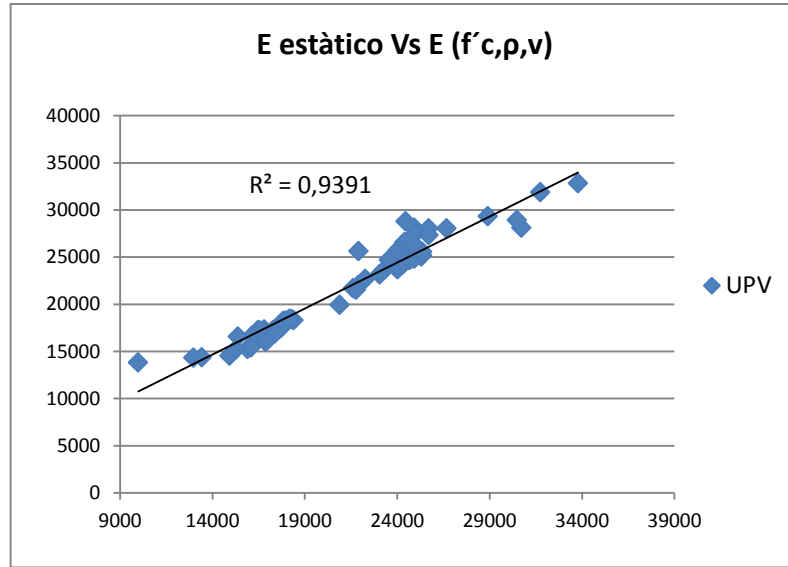
Tabla 15. Ecuaciones de módulo de elasticidad a partir de $f'c$, densidad y velocidad, para UPV.

Edad	A/C	Ecuación
14	0,47	$E_{\text{ajustado}} = 7,3614 * \rho + 765,925 * f'c - 4,95047 * C_p$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = -2,35819 * C_p + 0,137676 * \rho + 1213,15 * f'c$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = -2,35819 * C_p + 0,137676 * \rho + 1213,15 * f'c$
28	0,47	$E_{\text{ajustado}} = 500,422 * f'c + 17,4489 * \rho - 7,87243 * C_p$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = 6,67016 * \rho + 524,502 * f'c - 1,01743 * C_p$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = -4,23995 * C_p + 10,1012 * \rho + 610,214 * f'c$

Dónde:

- ρ es la densidad en $[kg/m^3]$
- C_p es la velocidad en $[m/s]$
- $f'c$ es la resistencia a la compresión en $[MPa]$

Figura 19. Valores de E estático en función de f'c, densidad y velocidad



3.3.3.2 Análisis para Et desde I.E: El análisis planteado anteriormente se dispone para los datos de I.E, ya que como se ha mencionado los dos END tienen el mismo principio teórico. Las ecuaciones que describen los valores de E_s en función de $f'c$, densidad y velocidad se muestran en la Tabla 21. Adicionalmente se muestra la Fig. 18 en donde se muestra la correlación entre los valores obtenidos de la Ec. (4) y las mencionadas en la Tabla 16.

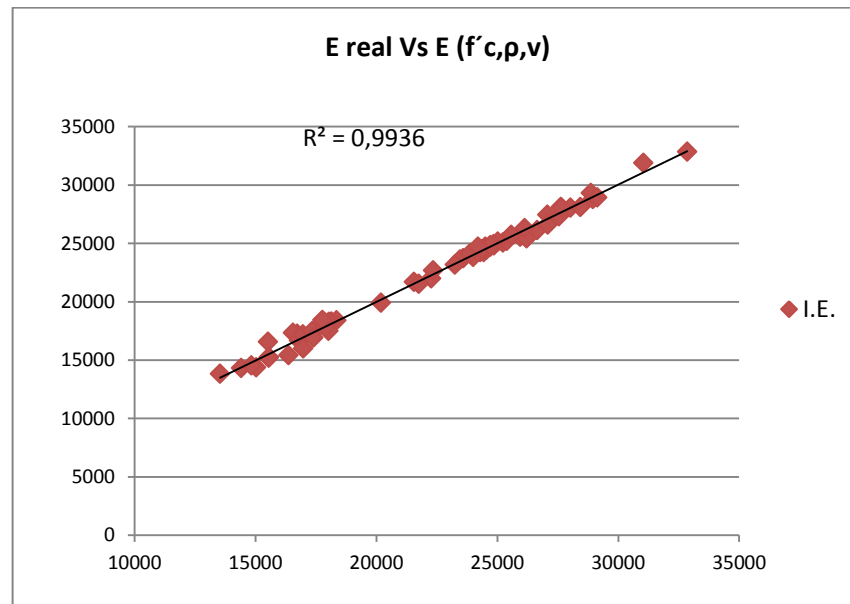
Tabla 16. Ecuaciones de módulo de elasticidad a partir de f'c, densidad y velocidad, para UPV.

Edad	A/C	Ecuación
14	0,47	$E_{\text{ajustado}} = 618,331 \cdot f'c + 7,59424 \cdot \rho - 4,14201 \cdot C_p$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = -4,08596 \cdot \rho + 1191,1 \cdot f'c + 0,940279 \cdot C_p$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = 5,79921 \cdot \rho - 3,80843 \cdot C_p + 714,132 \cdot f'c$
28	0,47	$E_{\text{ajustado}} = 16,2136 \cdot \rho - 8,64366 \cdot C_p + 649,506 \cdot f'c$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = 5,48277 \cdot \rho - 0,282201 \cdot C_p + 530,313 \cdot f'c$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = -4,89324 \cdot C_p + 11,2596 \cdot \rho + 622,852 \cdot f'c$

Dónde:

- ρ es la densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- C_p es la velocidad en $[\text{m}/\text{s}]$
- f'_c es la resistencia a la compresión en $[\text{MPa}]$

Figura 20. Valores de E estático en función de f'_c , densidad y velocidad



3.3.3.3 Discusión de resultados: A pesar de conseguir valores de correlación muy cercanos a uno y errores entre datos muy pequeños 3,6 y 1,46 % Tabla 22., es necesario recordar que el valor de f'_c utilizado para el ajuste de estas ecuaciones ha sido encontrado por medio del ensayo destructivo de compresión simple, hecho que no sería afín al planteamiento inicial del proyecto en donde se busca conocer los valores de módulo de elasticidad a partir END.

Adicionalmente se puede notar que los valores obtenidos por estas ecuaciones son muy cercanos (Anexo G-R), debido a que se tienen en cuenta prácticamente las mismas variables contempladas en la ecuación de la NSR-10, con la variante de que se agrega el valor de la velocidad, lo cual indica que se está planteando una ecuación redundante a la de la norma, que necesita de ensayos destructivos.

Tabla 17. Errores entre los valores de E_t a partir de I.E. y los valores de E estático.

END	% Error min	% Error promedio	%Error max
UPV	0,06	3,60	27,80
I.E.	0,01	1,46	6,36

3.3.4 Correlación de módulo de elasticidad estático en función de valores de velocidad. Teniendo en cuenta que los ensayos no destructivos ofrecen un valor directo de velocidad se quiso realizar el planteamiento de ecuaciones que solo dependieran de este factor, con el fin de observar si existe alguna correlación entre los datos de E_s y los valores de E_t , en comparación con los datos de E_s obtenidos por las ecuaciones (3) y (4).

3.3.4.1 Análisis para E_t desde UPV: Siguiendo este planteamiento se llegó a una serie de ecuaciones que son presentadas en la Tabla 23 las cuales describen el E_s en función de la velocidad obtenida a partir del UPV, así mismo se muestra en la Fig. 19 la correlación existente entre estos valores teóricos y el valor obtenido de E_s por la Ec. (4).

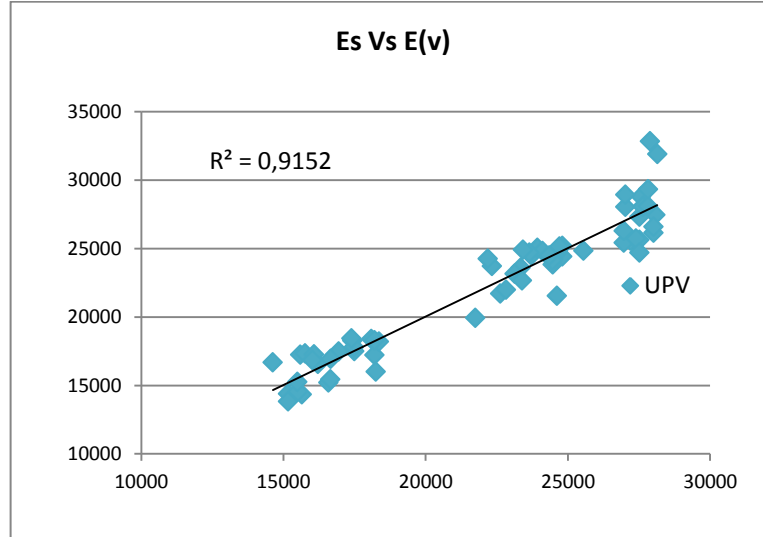
Tabla 18. Ecuaciones de E estático vrs E teórico del UPV en función de la velocidad.

Edad	A/C	Ecuación UPV
14	0,47	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,21096 \cdot \ln(Cp))$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,19899 \cdot \ln(Cp))$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,19464 \cdot \ln(Cp))$
28	0,47	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,24764 \cdot \ln(Cp))$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,23596 \cdot \ln(Cp))$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,24272 \cdot \ln(Cp))$

Dónde:

- Cp es la velocidad en [m/s]

Figura 21. Valores de E estático vrs valores de E teórico I.E.



3.3.4.2 Análisis para Et desde UPV: De la misma forma es realizado el análisis para los valores de E_s calculados por medio de la velocidad obtenida por el I.E. En la Tabla 24 se muestran las ecuaciones planteadas y en la Fig. 20 se muestra la correlación de estos datos teóricos con los datos de E_s .

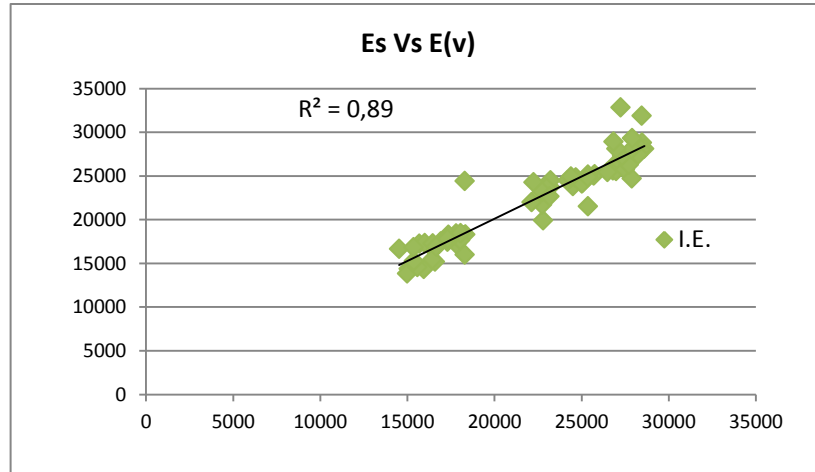
Tabla 19. Ecuaciones de E estático y E teórico del I.E. en función de la velocidad.

Edad	A/C	Ecuación I.E.
14	0,47	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,21093 \cdot \ln(C_p))$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,21632 \cdot \ln(C_p))$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,21293 \cdot \ln(C_p))$
28	0,47	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,25625 \cdot \ln(C_p))$
	0,52	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,24538 \cdot \ln(C_p))$
	0,58	$E_{\text{ajustado}} = \exp(1,23434 \cdot \ln(C_p))$

Dónde:

- C_p es la velocidad en [m/s]

Figura 22. Valores de E estático vrs valores de E teórico I.E.



3.3.4.3 Discusión de resultados: De acuerdo al análisis anterior se puede notar que los datos de E teórico tomados a partir de los dos ensayos no destructivos se ajustan a los valores de E_s calculados a partir de la Ec. (4), lo que se puede observar a partir del valor de coeficiente de correlación. Esto muestra la gran relación que existe entre la velocidad y el módulo de elasticidad, y además permite dar validez a las ecuaciones (Tabla 23 y 24) planteadas para cada uno de estos ensayos.

3.4 EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN CONTEMPLADA EN LA NSR-10, CON LAS ECUACIONES DE I.E Y UPV.

Luego de tener las ecuaciones a partir de los END y teniendo la certeza de que los valores obtenidos de E_t son válidos, se procede a evaluar dichas ecuaciones con la ecuación planteada en la NSR-10 (Ver Ec. (4)). Para calcular E_s se utiliza esta ecuación en donde se ingresan valores teóricos de f'_c y densidad. Por otro lado se calculan valores de E_t a partir de las ecuaciones contempladas en las Tablas 9 y

13en las cuales se ingresan valores de velocidades medidas con los equipos END. esto con el fin de observar los valores obtenidos y sus porcentajes de error correspondientes. Los valores teóricos de resistencia a la compresión son aquellos para los cuales fueron realizados los diseños de mezcla, es decir, 21, 24.5 y 28 MPa. Partiendo de estos valores de resistencia a la compresión, y usando la fórmula de velocidad planteada en la ACI 228 (Ver Ec. (3)), se encuentra el valor teórico de velocidad para el día 28, aplicada para todas las ecuaciones. Estos valores se presentan en la Tabla 18. Partiendo de estos datos se procede a calcular el valor de módulo de elasticidad con ayuda de cada ecuación y posteriormente el error entre estos.

Tabla 20. Valores teóricos de $f'c$ y velocidad.

$f'c$ [Mpa]	ρ [Kg/m ³]	Velocidad [m/s]
21,0	2300	3278,00
24,5	2300	3392,67
28,0	2300	3522,00

3.4.1 Evaluación de la ecuación de la NSR-10 con las ecuaciones obtenido por medio del ensayo de UPV. Como se planteó anteriormente se evalúa la ecuación de la NSR-10 (Ver Ec. (4)) con las ecuaciones obtenidos de UPV, la Tabla 19 muestra los resultados de E tanto estático como teórico y su error correspondiente.

Tabla 21. Valores de módulo de elasticidad estático y teórico a partir de UPV.

Datos de Entrada				
Edad	A/C	f _c [MPa]	ρ[Kg/m ³]	C _p [m/s]
28	0,58	21,0	2300	3278,00
	0,52	24,5	2300	3392,67
	0,47	28,0	2300	3522,00
Valores de Et y Es				
Et Ec propia UPV		Es Ec NSR-10		% Error
22227,58		21735,51		2,264
23910,69		23477,04		1,847
25822,21		25098,01		2,885

3.4.2 Evaluación de la ecuación de la NSR-10 con las ecuaciones obtenido por medio del ensayo de I.E. Al igual que en el caso anterior se evalúa la ecuación de la NSR-10 (Ver Ec. (4)), con las ecuaciones obtenidas de I.E, la Tabla 20 muestra los resultados de E tanto teóricos como estáticos y su error correspondiente.

Tabla 22. Valores de módulo de elasticidad estático y teórico a partir de I.E.

Edad	A/C	f _c [MPa]	ρ[Kg/m ³]	C _p [m/s]
28	0,58	21,00	2300,00	3278,00
	0,52	24,50	2300,00	3392,67
	0,47	28,00	2300,00	3522,00
Valores de Et y Es				
Et Ec propia UPV		Es Ec NSR-10		% Error
22635,62		21735,51		4,14
23816,21		23477,04		1,44
25624,20		25098,01		2,10

3.4.3 Discusión de resultados. Partiendo de los resultados de las ecuaciones de los END, se observa que los valores de E_t obtenido por medio de las ecuaciones propias de estos ensayos, se aproximan en gran medida a los valores de E_s calculados con ayuda de la ecuación planteada en la NSR-10 (Ver Ec. (4)), esto se puede observar gracias a los valores de error mostrados en las Tablas 20 y 21. Lo que nos indica que las ecuaciones propias de los END planteadas en esta investigación son válidas para calcular un valor aproximado de módulo de elasticidad, contando con valores tales como la velocidad y la densidad.

4. CONCLUSIONES.

- Al interpretar los valores obtenidos por los ensayos no destructivos se puede notar la influencia que la relación agua/cemento tiene en el valor de velocidad, se puede observar que el valor de velocidad aumenta conforme aumenta el valor de la relación agua/cemento, esto se debe a que la mayor cantidad de agua, se transforma en vacíos, que generan un medio ligeramente poroso lo cual resultara en mayor tiempo de desplazamiento de la onda. Teniendo en cuenta esto la velocidad de propagación de la velocidad de pulso ultrasónico se ve más afectada en comparación a la velocidad de propagación del Impact Echo, esto se muestra claramente al analizar la inclinación de la graficas obtenidas para cada ensayo.
- Con respecto a la edad del concreto, se observó que a medida que aumentan los días de curado aumentan los valores de velocidad para ambos ensayos no destructivos. Esto se debe a que el valor de velocidad depende directamente de la resistencia del elemento analizado, y como se sabe la resistencia a la compresión del concreto aumenta con el paso de los días, haciendo de esta forma que el valor de velocidad aumente también.
- En el caso del módulo de elasticidad, se observa que este valor es bastante susceptible a los cambio en la densidad del concreto y de la resistencia a la compresión. En el caso de los ensayos no destructivos, además del valor de la densidad también influye el valor de velocidad, que como se planteó anteriormente obedece a la edad del concreto y de su relación agua/cemento.

- Debido a la dispersión de los datos tomados a las probetas, y al comportamiento particular de estos con respecto a la relación agua/cemento, no se pudo plantear una ecuación única que se ajustara a las diferentes mezclas de cemento para una misma edad. Esto se podría lograr por medio de análisis estadísticos que están fuera del alcance de una tesis de pregrado. A pesar de esto, se logra reducir el porcentaje de error entre los datos de módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad teórico, en un 6 y 11% aproximadamente para I.E. y UPV respectivamente.
- Los resultados de módulo de elasticidad teórico en función de la densidad y la velocidad son más precisos que los obtenidos en función de la velocidad, puesto que la densidad es un factor muy influyente en el cálculo de E_s , lo cual hace que al tenerlo en cuenta dentro del análisis se minimicen errores.

5. OBSERVACIONES

- Para esta investigación no se tuvo en cuenta la influencia que tiene el tamaño del agregado en el valor del módulo de elasticidad dado que en el estudio realizado por Ariza y Col ^[4] se concluye que el tamaño de agregado no es la variable que más influye en la variación de la velocidad. Lo que se podría interpretar como una limitación, ya que como se plantea en otras investigaciones este es un parámetro de gran importancia en el análisis del concreto.
- En la presente investigación se tiene en cuenta la resistencia a la compresión para el cálculo del tamaño de muestra óptimo. Se recomienda para este tipo de estudios tener en cuenta además de este, variables tales como la velocidad y el tamaño de agregado.
- Se recomienda para futuras investigaciones realizar un ensayo de esfuerzo deformación de modo que se cuente con el parámetro de módulo de elasticidad real del concreto, esto con el fin de tener valores aún más cercanos a los obtenidos en esta investigación.

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

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.

Arqhys Arquitectura, "Granulometría del concreto" [Online] Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-granulometria.html>

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. Elsevier.

Herrera, R.H, Moreno, E., Rodríguez, L. (1978). Determinación de las frecuencias fundamentales mediante análisis de frecuencia por Impacto-Eco. Ualberta, 1(14). Recuperado de <http://www.ualberta.ca/~rhherrer/papers/articulo14.pdf>

Impact Echo system reference manual, vesion 1.2, Olson Instruments, Inc., Colorado, 2012.

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, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

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

Instituto Colombiano de Normas Técnicas.” Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto”. NTC 673, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2010.

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

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.

María F. Serrano; Diego D. Perez R. Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático en concreto (Julio-Diciembre 2010)

Quintero L., Herrera J., y Corzo. 2011; [1] Quintero L., Herrera J., y Corzo. 2011; Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluado a partir de parámetros ultrasónicos, Revista ION, 24(1); 69 – 76.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, “Titulo C – Concreto Estructural”, CR8.5 página C-112, 2010.

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

Sánchez de Guzmán, tecnología del concreto y mortero, Op. Cit., p. 210.

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 41-42; DOI: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780204>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Quintero L., Herrera J., y Corzo. 2011; [1] Quintero L., Herrera J., y Corzo. 2011; Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluado a partir de parámetros ultrasónicos, Revista ION, 24(1); 69 – 76.
- [2] 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. Elsevier.
- [3] María F. Serrano,; Diego D. Perez R. Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático en concreto (Julio-Diciembre 2010)
- [4] 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.
- [5] 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 41-42; DOI: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780204>.
- [6] Herrera, R.H, Moreno, E., Rodríguez, L. (1978). Determinación de las frecuencias fundamentales mediante análisis de frecuencia por Impacto-Eco. Ualberta, 1(14). Recuperado de <http://www.ualberta.ca/~rhherrer/papers/articulo14.pdf>

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

[8] Impact Echo system reference manual, version 1.2, Olson Instruments, Inc., Colorado, 2012.

[9] 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.

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

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

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

[13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas. "Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso". NTC 176, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.

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

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

[16] Arqhys Arquitectura, "Granulometria del concreto" [Online] Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-granulometria.html>

[17] Instituto Colombiano de Normas Técnicas." Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto". NTC 673, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2010.

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

[19] Sánchez de Guzmán, tecnología del concreto y mortero, Op. Cit., p. 210.

[20] Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, "Titulo C – Concreto Estructural", CR8.5 página C-112, 2010.

ANEXOS

ANEXO A. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,58 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia total.

A/C	N° Probeta	f' c [MPa]	Densidad[Kg/m3]	Es [MPa]
0,58	1	19,59	2359,74	17249,38
	2	16,74	2337,95	14337,92
	3	16,95	2333,22	14384,61
	4	19,02	2329,91	16677,46
	5	14,10	2416,95	13832,94

ANEXO B. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,52 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia total.

A/C	N° Probeta	f'c [MPa]	Densidad[Kg/m3]	Es [MPa]
0,52	1	18,72	2333,32	16579,11
	2	18,13	2299,77	14556,94
	3	18,91	2340,65	15263,72
	4	19,74	2361,72	17338,44
	5	20,24	2336,17	17270,06
	6	18,76	2341,16	15211,53
	7	19,86	2311,96	16845,36
	8	19,45	2336,25	15437,19

ANEXO C. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,47 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia total.

A/C	N° Probeta	f'c [MPa]	Densidad[Kg/m3]	Es [MPa]
0,47	1	21,58	2307,62	17507,69
	2	22,45	2354,05	18401,68
	3	20,71	2313,42	17215,30
	4	22,18	2346,28	18197,51
	5	22,92	2330,25	18309,90
	6	21,88	2307,75	17632,88
	7	20,97	2396,79	18267,86
	8	20,39	2348,70	17474,99
	9	20,95	2335,03	16011,48
	10	21,38	2341,35	17809,72
	11	21,10	2406,68	18438,83
	12	20,41	2299,24	16935,60

ANEXO D. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,58 a 28 días de fraguado.

A/C	N° Probeta	f'c [MPa]	Densidad[Kg/m3]	Es [MPa]
0,58	1	22,46	2347,51	23717,75
	2	23,87	2349,75	24487,25
	3	19,38	2195,83	19929,06
	4	21,90	2403,75	24264,08
	5	21,72	2366,93	23613,05
	6	18,62	2355,51	21707,21
	7	19,41	2344,08	22001,01
	8	21,59	2341,79	23168,41
	9	20,24	2358,89	22676,40

ANEXO E. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,52 a 28 días de fraguado.

A/C	N° Probeta	f'c [MPa]	Densidad[Kg/m3]	Es [MPa]
0,52	1	23,21	2368,21	24431,99
	2	24,01	2360,17	24723,14
	3	23,32	2352,12	24238,54
	4	18,61	2344,08	21542,6
	5	25,20	2343,66	25062,49
	6	25,51	2343,24	25207,46
	7	22,81	2342,82	23831,99
	8	24,31	2357,28	24828,61
	9	24,50	2371,75	25154,34
	10	22,17	2386,21	24146,96
	11	23,37	2380,52	24703,76
	12	23,14	2374,84	24497,2
	13	24,13	2369,15	24925,27
	14	23,94	2370,7	24852,14

ANEXO F. Valores de módulo de elasticidad, obtenidos por medio del ensayo de compresión simple para una relación A/C de 0,47 a 28 días de fraguado.

A/C	N° Probeta	f'c [MPa]	Densidad[Kg/m3]	Es [MPa]
0,47	1	32,17	2370,44	28803,03
	2	26,39	2374,42	26153,34
	3	29,64	2397,17	28115,8
	4	26,06	2353,22	25642,3
	5	30,97	2358,89	28054,11
	6	26,40	2338,36	25565,65
	7	26,11	2339,36	25439,04
	8	28,43	2392,85	27460,32
	9	28,08	2352,05	26598,04
	10	25,77	2367,95	25736,82
	11	25,53	2311,95	24715,68
	12	26,84	2370,36	26306,57
	13	27,48	2412,35	27326,6
	14	26,66	2479,62	28053,46
	15	26,60	2484,61	28107,16
	16	26,91	2546,63	29333,29
	17	28,85	2631,34	31901,54
	18	24,37	2608,07	28929,32
	19	28,38	2697,86	32847,49

ANEXO G. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,58 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad I.E [m/s]	f'c en función de Cp (I.E.) [MPa]	Es I.E. [MPa]
0,58	1	17569,4	18,83	21885,06
	2	17902,2	19,22	21806,58
	3	16278,4	17,96	21013,98
	4	15294,7	17,19	20516,62
	5	16699,2	17,83	22077,66

ANEXO H. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,52 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad I.E [m/s]	f'c en función de Cp (I.E.) [MPa]	Es I.E. [MPa]
0,52	1	18104,2	19,41	21848,36
	2	16201,2	18,08	20635,83
	3	16142,1	17,81	21026,43
	4	17386,1	18,67	21821,89
	5	18014,7	19,32	21838,36
	6	18297,8	19,51	22017,95
	7	15912,1	17,78	20626,06
	8	17988,8	19,30	21827,65

ANEXO I. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,47 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad I.E [m/s]	f'c en función de Cp (I.E.) [MPa]	Es I.E. [MPa]
0,47	1	19982,5	21,08	22393,67
	2	22201,7	22,51	23844,29
	3	21834,9	22,53	23236,46
	4	22982,6	23,19	24080,47
	5	23050,2	23,37	23926,02
	6	22240,3	22,89	23340,27
	7	21691,1	21,80	24108,30
	8	21143,8	21,72	23338,91
	9	23041,1	23,32	23976,62
	10	21077,6	21,72	23229,33
	11	23229,4	22,92	24872,06
	12	19413,8	20,68	22059,33

ANEXO J. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad I.E [m/s]	f'c en función de Cp (I.E.) [MPa]	Es I.E. [MPa]
0,58	1	25002,50	24,78	24914,01
	2	25061,80	24,81	24963,82
	3	22752,60	24,24	22292,27
	4	23914,30	23,47	25123,83
	5	24856,00	24,50	25081,49
	6	24301,10	24,16	24724,66
	7	23159,30	23,35	24128,05
	8	24159,60	24,16	24508,95
	9	25077,80	24,75	25076,95

ANEXO K. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad I.E [m/s]	f'c en función de Cp (I.E.) [MPa]	Es I.E. [MPa]
0,52	1	25258,70	16,69	20714,05
	2	23925,47	23,96	24692,66
	3	24470,59	24,40	24793,07
	4	25392,14	24,77	24850,55
	5	25746,58	25,19	25054,99
	6	25906,89	25,27	25091,18
	7	23635,72	23,71	24293,51
	8	23980,69	23,91	24622,21
	9	25912,26	24,77	25291,86
	10	24561,76	24,35	25307,30
	11	23276,77	23,50	24774,80
	12	23283,51	23,35	24604,54
	13	23163,34	23,57	24632,70
	14	25160,76	24,78	25284,09

ANEXO L. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo Impact Echo para una relación A/C de 0,47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad I.E [m/s]	f'c en función de Cp (I.E.) [MPa]	Es I.E. [MPa]
0,47	1	26334,90	25,64	25713,92
	2	24023,20	23,79	24829,96
	3	26836,90	25,80	26231,63
	4	23761,40	23,75	24478,89
	5	26155,60	25,60	25506,06
	6	23867,10	23,96	24351,18
	7	23164,20	23,39	24076,32
	8	26256,60	25,39	25948,97
	9	24308,10	24,19	24687,43
	10	24905,80	24,54	25113,57
	11	24840,80	24,96	24436,01
	12	25246,00	24,78	25278,65
	13	25130,30	24,35	25724,29
	14	26642,30	24,96	27141,91
	15	25385,70	23,97	26681,81
	16	27409,30	24,99	28269,08
	17	29199,00	25,62	30059,57
	18	26377,90	23,78	28579,66
	19	27947,80	24,23	30351,36

ANEXO M. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,58 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad UPV [m/s]	f'c en función de Cp (UPV) [MPa]	Et UPV [MPa]
0,58	1	3233,63	21,02	23123,65
	2	3244,14	21,12	22860,57
	3	3159,57	20,29	22339,68
	4	3065,15	19,40	21792,68
	5	3159,56	20,29	23552,94

ANEXO N. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,52 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad UPV [m/s]	f'c en función de Cp (UPV) [MPa]	Et UPV [MPa]
0,52	1	3244,12	21,12	22792,61
	2	3127,49	19,99	21694,16
	3	3122,58	19,94	22248,97
	4	3169,57	20,39	22804,46
	5	3220,62	20,89	22708,27
	6	3305,79	21,74	23240,41
	7	3212,87	20,81	22315,44
	8	3316,76	21,85	23226,65

ANEXO O. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,47 a 14 días de fraguado. 65% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad UPV [m/s]	f'c en función de Cp (UPV) [MPa]	Et UPV [MPa]
0,47	1	3189,87	20,59	22131,84
	2	3278,72	21,47	23285,14
	3	3294,90	21,63	22770,74
	4	3319,50	21,88	23391,30
	5	3294,93	21,63	23019,80
	6	0,00	--	--
	7	3179,68	20,49	23370,34
	8	3105,66	19,78	22273,32
	9	3303,08	21,71	23134,61
	10	3187,25	20,56	22604,72
	11	3174,64	20,44	23487,01
	12	3062,79	19,37	21351,56

ANEXO P. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,58 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

A/C	N° Probeta	Velocidad UPV [m/s]	f'c en función de Cp (UPV) [MPa]	Et UPV [MPa]
0,58	1	3157,89	20,28	22536,21
	2	3314,92	21,83	23418,20
	3	3092,22	19,65	20069,52
	4	3141,36	20,12	23259,00
	5	3272,73	21,41	23443,62
	6	3191,49	20,60	22833,09
	7	3214,29	20,83	22789,69
	8	3249,10	21,17	22943,64
	9	3278,69	21,47	23356,81

ANEXO Q. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,52 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

A/C	N°Probeta	Velocidad UPV [m/s]	f'c en función de Cp (UPV) [MPa]	Et UPV [MPa]
0,52	1	3593,89	24,79	25249,71
	2	3574,62	24,58	25013,21
	3	3555,78	24,37	24780,44
	4	3571,44	24,55	24740,23
	5	3490,41	23,67	24286,09
	6	3593,89	24,79	24851,42
	7	3554,60	24,36	24627,09
	8	3511,88	23,90	24617,41
	9	3581,85	24,66	25238,33
	10	3552,41	24,34	25301,95
	11	3457,43	23,31	24675,72
	12	3539,87	24,20	25050,60
	13	3430,57	23,03	24349,47
	14	3679,93	25,76	25777,27

ANEXO R. Valores de módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y velocidad, obtenidos por medio del ensayo no destructivo UPV para una relación A/C de 0,47 a 28 días de fraguado. 100% de la resistencia.

A/C	N°Probeta	Velocidad UPV [m/s]	f'c en función de Cp (UPV) [MPa]	Et UPV [MPa]
0,47	1	3623,19	25,12	25451,05
	2	3669,72	25,64	25779,77
	3	3629,76	25,19	25920,59
	4	3616,64	25,05	25137,55
	5	3565,06	24,48	24939,38
	6	3584,23	24,69	24720,40
	7	3558,72	24,41	24595,29
	8	3676,47	25,72	26119,42
	9	3669,72	25,64	25416,31
	10	3603,6	24,90	25300,32
	11	3616,64	25,05	24479,18
	12	3558,72	24,41	25085,79
	13	3616,64	25,05	26090,94
	14	3629,76	25,19	27269,32
	15	3649,64	25,42	27472,62
	16	3649,64	25,42	28507,65
	17	3683,24	25,80	30165,10
	18	3565,06	24,48	28993,65
	19	3656,31	25,49	31130,31

ANEXO S. (Tabla con porcentaje de error entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del I.E y los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del ensayo de compresión simple.

A/C	N° probeta	Ecuación propia I.E	% Error	E estático
0,58	1,00	22796,85	3,88	23717,75
	2,00	22821,37	6,80	24487,25
	3,00	20754,77	4,14	19929,06
	4,00	23984,87	1,15	24264,08
	5,00	23156,43	1,93	23613,05
	6,00	23089,09	6,37	21707,21
	7,00	23158,93	5,26	22001,01
	8,00	22890,58	1,20	23168,41
	9,00	22971,73	1,30	22676,4
0,52	1,00	24426,20	0,02	24431,99
	2,00	24426,35	1,20	24723,14
	3,00	24348,77	0,45	24238,54
	4,00	24270,48	12,66	21542,6
	5,00	24270,32	3,16	25062,49
	6,00	24266,88	3,73	25207,46
	7,00	24247,08	1,74	23831,99
	8,00	24396,41	1,74	24828,61
	9,00	24552,36	2,39	25154,34
	10,00	24695,55	2,27	24146,96
	11,00	24629,08	0,30	24703,76
	12,00	24569,63	0,30	24497,2
	13,00	24513,93	1,65	24925,27
	14,00	24541,84	1,25	24852,14
0,47	1,00	26631,31	7,54	28803,03
	2,00	26993,86	3,21	26153,34
	3,00	26981,49	4,03	28115,8
	4,00	26702,04	4,13	25642,3

A/C	N° probeta	Ecuación propia I.E	% Error	E estático
	5,00	26475,39	5,63	28054,11
	6,00	26458,50	3,49	25565,65
	7,00	26569,31	4,44	25439,04
	8,00	26987,92	1,72	27460,32
	9,00	26610,84	0,05	26598,04
	10,00	26777,41	4,04	25736,82
	11,00	25919,84	4,87	24715,68
	12,00	26770,24	1,76	26306,57
	13,00	27433,17	0,39	27326,6
	14,00	28278,09	0,80	28053,46
	15,00	28512,21	1,44	28107,16
	16,00	29214,90	0,40	29333,29
	17,00	30304,77	5,01	31901,54
	18,00	30281,24	4,67	28929,32
	19,00	31468,17	4,20	32847,49
0,58	1,00	15468,69	10,32	17249,38
	2,00	15493,27	8,06	14337,92
	3,00	15146,09	5,29	14384,61
	4,00	14926,26	10,50	16677,46
	5,00	15406,88	11,38	13832,94
0,52	1,00	16101,45	2,88	16579,11
	2,00	15826,13	8,72	14556,94
	3,00	16071,33	5,29	15263,72
	4,00	16246,48	6,30	17338,44
	5,00	16115,32	6,69	17270,06
	6,00	16155,90	6,21	15211,53
	7,00	15888,54	5,68	16845,36
	8,00	16114,89	4,39	15437,19
0,47	1,00	17459,37	0,28	17507,69
	2,00	17786,67	3,34	18401,68
	3,00	17460,86	1,43	17215,3
	4,00	17704,11	2,71	18197,51
	5,00	17570,33	4,04	18309,9
	6,00	17404,30	1,30	17632,88

A/C	N° probeta	Ecuación propia I.E	% Error	E estático
	7,00	18150,66	0,64	18267,86
	8,00	17768,35	1,68	17474,99
	9,00	17609,96	9,98	16011,48
	10,00	17709,43	0,56	17809,72
	11,00	18195,72	1,32	18438,83
	12,00	17405,01	2,77	16935,6
% Error promedio			3,71	

ANEXO T. (Tabla con porcentaje de error entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del UPV y los valores de módulo de elasticidad obtenidos por medio del ensayo de compresión simple.

A/C	N° probeta	Ecuación propia UPV	% Error	E estático
0,58	1	23042,34	2,85	23717,75
	2	22772,72	7,00	24487,25
	3	21291,51	6,84	19929,06
	4	23768,91	2,04	24264,08
	5	23064,99	2,32	23613,05
	6	23077,62	6,31	21707,21
	7	22893,15	4,05	22001,01
	8	22798,93	1,59	23168,41
	9	22954,31	1,23	22676,4
0,52	1	24445,39	0,05	24431,99
	2	24374,65	1,41	24723,14
	3	24303,04	0,27	24238,54
	4	24171,75	12,20	21542,6
	5	24306,78	3,02	25062,49
	6	24121,94	4,31	25207,46
	7	24184,62	1,48	23831,99
	8	24445,98	1,54	24828,61
	9	24512,11	2,55	25154,34
	10	24750,46	2,50	24146,96
	11	24841,41	0,56	24703,76
	12	24624,92	0,52	24497,2
	13	24740,70	0,74	24925,27
	14	24328,48	2,11	24852,14
0,47	1	26636,25	7,52	28803,03
	2	26540,31	1,48	26153,34
	3	27055,86	3,77	28115,8
	4	26374,00	2,85	25642,3

A/C	N° probeta	Ecuación propia UPV	% Error	E estático
	5	26647,24	5,01	28054,11
	6	26240,74	2,64	25565,65
	7	26346,01	3,57	25439,04
	8	26821,90	2,32	27460,32
	9	26170,02	1,61	26598,04
	10	26663,17	3,60	25736,82
	11	25690,86	3,95	24715,68
	12	26859,15	2,10	26306,57
	13	27352,76	0,10	27326,6
	14	28420,64	1,31	28053,46
	15	28434,10	1,16	28107,16
	16	29460,70	0,43	29333,29
	17	30746,03	3,62	31901,54
	18	30771,87	6,37	28929,32
	19	31940,78	2,76	32847,49
0,56	1	15477,75	10,27	17249,38
	2	15452,75	7,78	14337,92
	3	15193,62	5,62	14384,61
	4	14909,36	10,60	16677,46
	5	15407,65	11,38	13832,94
0,52	1	16035,58	3,28	16579,11
	2	15889,87	9,16	14556,94
	3	16245,69	6,43	15263,72
	4	16369,05	5,59	17338,44
	5	16088,42	6,84	17270,06
	6	16027,84	5,37	15211,53
	7	15890,68	5,67	16845,36
	8	15972,57	3,47	15437,19
0,47	1	17412,91	0,54	17507,69
	2	17756,45	3,51	18401,68
	3	17429,87	1,25	17215,3
	4	17683,63	2,82	18197,51
	5	17563,26	4,08	18309,9
	6	--	--	17632,88

A/C	N° probeta	Ecuación propia UPV	% Error	E estático
	7	18122,58	0,80	18267,86
	8	17761,82	1,64	17474,99
	9	17598,92	9,91	16011,48
	10	17680,98	0,72	17809,72
	11	18202,37	1,28	18438,83
	12	17381,51	2,63	16935,6
% Error promedio			3,70	