

**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.**

**DIANA MARCELA ARIZA DÍAZ
JAVIER ANDRÉS ATUESTA ESPARZA**

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

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.**

**DIANA MARCELA ARIZA DÍAZ
JAVIER ANDRÉS ATUESTA ESPARZA**

Trabajo de grado, presentado como requisito para optar al título de ingeniero
metalúrgico

Área: Ensayos No Destructivos

Modalidad: Investigación

Directora

Ms.C Luz Amparo Quintero Ortiz

Codirector

Ing. Julian Herrera Ortiz

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIAS DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A **Dios** por ser mi guía, mi luz y camino, por darme la paciencia y capacidad necesaria para el desarrollo de este trabajo.

A **mi Mamita Linda** por ser la razón de mi vida y el motivo para cada día ser mejor.

A **Mi Papá** por brindarme todo su amor, apoyo y confianza.

A mis hermanas **Nathaly y Johanna** por enseñarme lo importante que es la familia y por demostrarme que todo lo que queremos lo podemos conseguir solo con nuestro propio esfuerzo.

A **Eli** por creer en mí y ayudarme a ser la ingeniera que ahora soy. Por ser un gran amigo y el mejor hermano.

A mi primo **Enrique** que aunque ya no está con nosotros fue un verdadero hermano y un soporte en mi vida. Gracias por creer en mí por quererme tanto y por demostrarme lo felices que podemos ser con cosas tan pequeñas.

A **Rafael** por acompañarme en cada momento difícil de esta etapa de mi vida, por hacerme tan feliz y por quererme tanto.

A **Marce y Sofi** por ser las mejores amigas del mundo, por su confianza y sobretodo por estar ahí cuando más las necesitaba.

A amigos como **Diana, Victor, Javier, Oscar y Arnold**, que me enseñaron lo divertido que puede ser la vida si todo lo tomamos día tras día.

A **Mis Compañeros de la universidad** con quienes pase momentos inolvidables. Gracias por ser mis amigos y por apoyarme durante estos últimos meses.

DIANA MARCELA ARIZA DIAZ

DEDICATORIA

A **Dios**, que gracias a su voluntad logre ingresar y darme la sabiduría para culminar mis estudios.

A **Mi MADRE** la cual es mi orgullo y mi razón de ser, ya que me ha guiado por el camino correcto y me ha dado la oportunidad de formarme como persona.

A **Mi PADRE** el cual me enseñado que las oportunidades de la vida hay que aprovecharlas y el cual ha dedicado su esfuerzo en que sus hijos estemos bien.

A **mis primos** en especial a **BARBIE** por su apoyo y amistad incondicional.

A **mi familia** en general por haber contribuido en mi formación personal, a mis abuelitas **ESTHER Y MARINA**, por haberme consentido y mimado durante mi niñez

A una persona muy especial en mi vida **Andreita Gómez** la cual es una persona que ha influido en mi vida.

A todos mis compañeros y amigos en especial a **PILAR, DIANA, NELSON, DOÑA LAURA , EL CHAVO, JAIME, LUCHO, TATE, MAYE, LILI**, por brindarme una verdadera amistad, lealtad, apoyo y cariño.

Por último a cada una de las personas que creen en mí y en mis capacidades.

JAVIER ANDRES ATUESTA

AGRADECIMIENTOS

A la universidad industrial de Santander por habernos permitido entrar en su comunidad universitaria.

A la directora de nuestro proyecto Ms.C LUZ AMPARO QUINTERO, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por brindarnos la confianza necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A nuestro codirector y futuro magister, JULIÁN HERRERA por apoyarnos y darnos el conocimiento necesario para poder realizar este proyecto.

A la escuela de ingeniería metalúrgica a sus profesores y técnicos por brindarnos los elementos necesarios en nuestra formación profesional.

A la escuela de ingeniería civil, por proporcionarnos sus instalaciones y los materiales empleados en esta investigación. A su técnico Jairo Hernández por su colaboración y amistad.

Al Ph.D Ricardo cruz por aportarnos todos sus conocimientos en ingeniería civil, por su colaboración y apoyo.

Por último a nuestras familias por creer en nosotros, por apoyarnos y por su amor incondicional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	25
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.2 JUSTIFICACIÓN	26
1.3 ESTADO DE ARTE	26
1.4 OBJETIVOS	27
1.4.1 Objetivo General	27
1.4.2 Objetivos Específicos	27
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	29
2.1. GENERALIDADES DEL CONCRETO	29
2.1.1 Componentes del Concreto.	30
2.1.1.1 Cemento].	30
2.1.1.2 Agua	32
2.1.1.3 Agregados	33
2.1.2 Proceso de fabricación del concreto	35
2.1.2.1 Caracterización de la materia prima	35
2.1.2.2 Diseño de mezcla	36
2.1.2.3 Fraguado	36
2.1.2.4 Curado Húmedo.	37
2.2 ENSAYO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	37
2.2.1 Factores que afecta la resistencia del concreto.	39
2.3 ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	41
2.3.1 Factores que afecta la Velocidad de Pulso Ultrasónico del concreto.	44

3. METODOLOGÍA	46
3.1 FASE 1: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA LITERATURA RECOPIADA	47
3.2. FASE 2: DISEÑO DE EXPERIMENTOS	47
3.3 FASE 3: Proceso de fabricación del concreto	49
3.3.1 Etapa 1: Caracterización de la materia prima.	49
3.3.2 Etapa 2: Diseño de la mezcla.	51
3.3.3 Etapa 3: Elaboración de las probetas.	52
3.3.4 Etapa 4: Fraguado y curado.	54
3.4 FASE 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES	54
3.4.1 Inspección visual.	54
3.4.2 Ensayo de ultrasonido.	55
3.4.3 Ensayo de resistencia a la compresión.	57
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
4.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	60
4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES	64
4.2.1 Inspección visual.	64
4.2.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.	68
4.2.3 Ensayo de resistencia a la compresión.	74
4.3 CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	80
4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	86
4.4.1 Análisis del diagrama de Pareto y Efectos principales para la Velocidad de Pulso Ultrasónico.	87
4.4.1.1 Correlación matemática.	89
4.4.2. Análisis del diagrama de Pareto y Efectos principales sobre la Resistencia a la Compresión.	90
4.4.2.1 Correlación matemática.	91
5. CONCLUSIONES	93

6. RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFIA	96
ANEXOS	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del cemento según norma ASTM C 150.	32
Tabla 2. Clasificación del concreto según resistencia a la compresión.	38
Tabla 3. Clasificación de la calidad del concreto por medio de la Velocidad de Pulso Ultrasónico según Leslie y Cheesman.	42
Tabla 4. Distribución representativa de las variables empleadas en el diseño de experimentos y sus respectivos límites.	48
Tabla 5. Parámetros de trabajo del equipo CNS FARNELL LTDA PUNDIT PLUS.	56
Tabla 6. Caracterización de los agregados fino, grueso 3/4" y grueso 3/8".	60
Tabla 7. Análisis Granulométrico del agregado fino (Arena proveniente de Pescadero, Santander)	61
Tabla 8. Dosificación de la mezcla de concreto para un tamaño máximo de agregado grueso de 3/4"	62
Tabla 9. Dosificación de la mezcla de concreto para un tamaño máximo de agregado grueso de 3/8"	62
Tabla 10. Distribución empleada para la realización de las mezclas utilizadas.	63
Tabla 11. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico para muestras de concreto con tamaño máximo de agregado de 3/4".	69
Tabla 12. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico para muestras de concreto con tamaño máximo de agregado de 3/8".	69
Tabla 13. Registro de resistencia a la compresión para un concretos con tamaño máximo de agregado de 3/4"	75
Tabla 14. Resultados de resistencia a la compresión para concretos con tamaño máximo de agregado de 3/8"	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes del concreto con o sin aire incluido	30
Figura 2. Proceso de fabricación del cemento.	31
Figura 3. Influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto (Gonnerman y Shuman en1928).	41
Figura 4. Mecanismos de transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico.	44
Figura 5. Esquema de la Metodología para el desarrollo de la investigación.	46
Figura 6. Diseño de experimentos	48
Figura 7. Modelo estadístico utilizado en el análisis de los valores resultantes de VPU y resistencia a la compresión.	49
Figura 8. Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua utilizada para la realización de las probetas.	50
Figura 9. Proceso de elaboración de las probetas. a) Fabricación de la mezcla; b) elaboración de las probetas	53
Figura 10. Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico.; a) Equipo de ultrasonido; b) Calibración del equipo y prueba de ultrasonido.	56
Figura 11. Realización de la prueba de resistencia a la compresión. a) Equipo (maquina universal de ensayos marca TREBEL); b) Disposición de la probeta para la prueba de compresión.	58
Figura 12. Proceso de endurecimiento. a) Fraguado realizado por 24 horas. b) Proceso de curado realizado bajo condiciones (100% Humedad y temperatura ambiente)	64
Figura 13. Pesado de las probetas	65
Figura 14. Determinación del diámetro de las probetas.	66
Figura 15. Estado superficial de las probetas a ensayar	66
Figura 16. Probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/4" para cada una de las relaciones agua/cemento.	67

Figura 17. Probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/8" para cada una de las relaciones agua/cemento	68
Figura 18. Falla presentada por las probetas después de realizar la prueba de compresión.	80

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafico 1. Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/4".	70
Grafico 2. Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/8".	71
Grafico 3. Valores de velocidad de pulso ultrasónico para concretos con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.4	72
Grafico 4. Valores de velocidad de pulso ultrasónico para concretos con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.5	72
Grafico 5. Valores de velocidad de pulso ultrasónico para concretos con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.6	73
Grafico 6. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico con la relación a/c en concretos con tamaños máximos de 3/4" y 3/8" a 28 días de curado	74
Grafico 7. Desarrollo de la resistencia a la compresión de un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/4" a diferentes edades.	76
Grafico 8. Desarrollo de la resistencia a la compresión de un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/8" a diferentes edades.	76
Grafico 9. Valores de resistencia a la compresión para concretos fabricados con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.4	77
Grafico 10. Valores de resistencia a la compresión para concretos fabricados con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.5	78
Grafico 11. Valores de resistencia a la compresión para concretos fabricados con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.6	78
Grafico 12. Variación de la resistencia a la compresión con la relación a/c en concretos con tamaños máximos de 3/4" y 3/8" a los 28 días de curado	79

Grafica 13. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,4 y tamaño máximo de agregado 3/4"	81
Grafica 14 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,5 y tamaño máximo de agregado 3/4"	82
Grafica 15 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,6 y tamaño máximo de agregado 3/4"	83
Grafica 16. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,4 y tamaño máximo de agregado 3/8"	84
Grafica 17. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,5 y tamaño máximo de agregado 3/8"	85
Grafica 18. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,6 y tamaño máximo de agregado 3/8"	86
Grafica 19. Interacción entre las variables (Diagrama de Pareto Estandarizado) para las mediciones de Velocidad de Pulso Ultrasónico.	88
Grafica 20. Gráfico de Efectos Principales (tamaño de agregado, relación agua cemento y tiempo de curado) para las mediciones de Velocidad de Pulso Ultrasónico.	89
Grafica 21. Interacción entre las variables (Diagrama de Pareto Estandarizado) para el ensayo de Resistencia a la Compresión (MPA)	90
Grafica 22. Gráfico de Efectos Principales (tamaño de agregado, relación agua cemento y tiempo de curado) sobre el ensayo de Resistencia a la Compresión	91

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Metodología para el diseño de mezcla	101
ANEXO B. Diseño de una mezcla con tamaño máximo de agregado de 3/8” con relación agua/cemento 0.4	107
ANEXO C. Registro de los cambios en peso para las probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/4”	109
ANEXO D. Registro de los cambios en peso para las probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/8”.	110
ANEXO E. Cálculo del área para las probetas con tamaño de agregado máximo de 3/4"	111
ANEXO F. Cálculo del área para las probetas con tamaño de agregado máximo de 3/8"	112
ANEXO G Tabla de correlación entre las medidas de velocidad de pulso contra resistencia a la compresión para cada una de las mezclas.	113
ANEXO H. Grafica de interacción entre las variables relación agua/cemento, tamaño máximo de agregado y tiempo de curado sobre la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.	114
ANEXO I. Grafica de interacción entre las variables relación agua/cemento, tamaño máximo de agregado y tiempo de curado sobre el ensayo de resistencia a la compresión.	115
ANEXO J. Grafica de superficie de respuesta para la edad de 28 días.	116

GLOSARIO

ABSORCIÓN: La absorción mide la cantidad de agua expresada en % del peso del material seco que es capaz de absorber un material.

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

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

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

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: Etapa en la cual se separa una masa de agregado en fracciones de igual tamaño a través de una serie de tamices cuyas características se ajustan según la norma.

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

DENSIDAD ABSOLUTA: Es la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupa única y exclusivamente la masa sólida, es decir, se excluyen los poros saturables o no saturables.

DENSIDAD APARENTE: Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas de agregado, incluyendo los poros saturables y no saturables.

DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO: Esta definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada. Sin embargo, en el caso de los agregados para concreto generalmente se presentan poros que pueden estar vacíos o llenos de agua variando de una u otra manera este valor.

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

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

GRAVEDAD ESPECÍFICA: Relación peso/volumen de un cuerpo comparado con la relación peso/volumen del agua.

HUMEDAD: Es la cantidad de agua superficial retenida por la partícula, su influencia esta en la mayor o menor cantidad de agua necesario en la mezcla.

MASA UNITARIA: Masa promedio de las partículas de un agregado contenido en un recipiente de volumen unitario.

MODULO DE FINURA: Es un factor empírico que se obtiene al sumar los porcentajes retenidos acumulados desde el tamiz N°4 (4.75mm) hasta el tamiz N°100 (0.150mm) y dividirlos entre 100.

PASTA: Se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (atrapado o incluido) y aditivos (si se añaden).

PESO UNITARIO DEL CONCRETO: Está definido como la cantidad de masa por unidad de volumen y generalmente se expresa en Kg/m^3 . Este valor depende de la densidad y tamaño máximo de los agregados, la cantidad de aire atrapado y del contenido de agua y cemento.

PORCENTAJE DE VACÍOS: Es la medida de volumen expresado en porcentaje de los espacios entre las partículas de agregados, depende del acomodo de las partículas por lo que su valor es relativo como en el caso del peso unitario.

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

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: Resistencia a la compresión: Se puede definir como la máxima resistencia medida en un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se exprese en kilogramos por centímetro cuadrado.

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO: Es el tamaño de partícula más grande que hay dentro de la masa de agregados, el cual debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de la estructura.

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO: Es el tamaño promedio de partículas más grande que hay dentro de la masa de agregados.

SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO (SSS): Todos los poros se encuentran llenos de agua, pero sin una película de humedad sobre la superficie de las partículas de agregado.

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO, TAMAÑO DE AGREGADO Y TIEMPO DE CURADO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.*

AUTORES: ARIZA DIAZ, Diana Marcela. ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés**

PALABRAS CLAVES: velocidad de pulso ultrasónico, relación agua/cemento, tiempo de curado, tamaño máximo de agregado, concrete.

RESUMEN

Debido a que se ha obtenido resultados altamente confiables al utilizar la técnica de VPU como alternativa para evaluar la calidad del concreto, en el presente trabajo se determinó el efecto de la relación agua/cemento, el tamaño máximo de agregado y el tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo, se evaluó la relación existente entre la resistencia a la compresión y esta técnica no destructiva. Se diseñaron seis mezclas de concreto utilizando el método American Concrete Institute (ACI-211), fabricando en total 72 especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro por 20 cm de longitud, a los cuales se les realizó inspección visual, medidas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, en los días 7, 14, 21 y 28 del tiempo de curado realizado bajo condiciones estándar de humedad y temperatura. Los resultados obtenidos mostraron como la relación agua/cemento fue la principal fuente de variación en los valores de velocidad de pulso ultrasónico así como en los valores de resistencia a la compresión siendo su efecto negativo para los dos casos. Además se determinó que las variables: tamaño máximo de agregado y tiempo de curado afectan de forma positiva la VPU, lo que genera una mejor clasificación del concreto según su calidad. Por último, se relacionaron las dos técnicas para cada una de las mezcla de concreto teniendo como resultado modelos lineales con alto nivel de correlación.

* Proyecto De Grado

** Facultad de Ingenierías físico químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Directora: Ms.C.Luz Amparo Quintero. Codirector: Julian Herrera.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF THE RELATION WATER/CEMENT, AGGREGATE SIZE AND CURING TIME ON ULTRASONIC PULSE VELOCITY IN UNREINFORCED CONCRETE. *

AUTORS: ARIZA DIAZ, Diana Marcela. ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés**

KEYWORDS: Ultrasonic pulse velocity, maximum aggregate size, age of curing, relation water/cement, concrete.

ABSTRACT

Due it has obtained highly reliable results when using the pulse ultrasonic velocity as an alternative to evaluate the quality of concrete, in the present work the effect of relation water/cement ratio, maximum aggregate size and age of curing was determine for the test the ultrasonic pulse velocity in unreinforced concrete. Also, the relation between the ultrasonic pulse velocity and compressive strength was evaluated. To do this, the concrete mixtures were designed and prepared using the American Concrete Institute (ACI-211), in total were produced 72 cylindrical specimens of 10 x 20cm. The visual inspection, the ultrasonic velocity and compressive strength were determined at 7, 14, 21 and 28 days of cured age, respectively. The curing was done under standard conditions of humidity and temperature. The experimental results showed how the water/cement ratio was the main source of variation in the values of ultrasonic pulse velocity and the values of compressive strength being its negative effect. In addition it was found that the maximum aggregate size and curing time presented a positive effect in the values of ultrasonic pulse velocity generating the better classification of concrete according to quality. Finally, the correlation between VPU and compressive strength each for the conditions and concrete mixtures were (was) evaluated and the results show a high correlation values. Finally, linking the two techniques for each of the concrete mix resulting in linears models whose correlation factors were highly reliable.

* Research Work.

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering. Director: Luz Amparo Quintero. Codirector: Julian Herrera.

INTRODUCCIÓN

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es una prueba no destructiva que consiste en medir el tiempo de vuelo de una onda ultrasónica a través de un espesor conocido, permitiendo realizar un análisis interno y detallado del material a estudiar. Debido al carácter heterogéneo que presenta el concreto, el uso de esta técnica no se llegó a considerar hasta 1946 cuando Leslie y Cheesman introdujeron el equipo y la técnica conocida como “método de velocidad de pulso”, logrando que este ensayo se utilizara en la evaluación de estructuras de concreto, teniendo en cuenta las características de la mezcla y la calidad de cada uno de sus componentes (Solís y col., 2004).

Malhotra en 1985 desarrollo un criterio de aceptación del concreto basado en su calidad, el cual lo clasifica como excelente, bueno, cuestionable, pobre y muy pobre según lo valores de velocidad de pulso. Sin embargo, es el ensayo destructivo de resistencia a la compresión el mecanismo más efectivo en la evaluación de este material, es por esta razón que Anderson, Seals (1981) y Sturup (1984) así como otros investigadores, realizaron innumerables estudios a fin de considerar una relación entre los dos ensayos. Los estudios realizados lo único que han hecho es demostrar que el carácter heterogéneo del concreto genera modelos de correlación diferentes entre las dos técnicas debido a que los valores en la velocidad de pulso se ven afectados por múltiples variables como: tipo de agregado, relación agua/cemento, edad del concreto, tamaño máximo de agregado y condiciones de curado. Por lo anterior, el estudio del efecto de cada una de estos parámetros sobre la técnica no destructiva permitirá mejorar los modelos de correlación y por consiguiente hacer un análisis más confiable de estructuras ya puestas, pues se podría estimar las variaciones en sus valores de resistencia a la compresión e intervenirlas oportunamente evitando pérdidas económicas y humanas, cuando las estructuras no cuenten con las especificaciones de resistencia necesarias.

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es uno de los materiales más utilizados en el desarrollo infraestructural de un país, esto se debe a su heterogeneidad y alta resistencia a la compresión principalmente, pero además a la facilidad que se tiene para obtener un concreto de buena calidad, sin generar mayores costos. Puesto que su aplicación en la industria ha aumentado con el pasar del tiempo, se ha hecho necesario estudiar más a fondo sus propiedades mecánicas llegando a establecer el ensayo destructivo de resistencia a la compresión, como un ensayo de gran importancia pero que genera modificaciones posteriores en las estructuras ya existentes, pues se tienen que retirar núcleos de la misma con el fin de realizarlo, lo cual conlleva a cambios y debilitamiento del diseño estructural.

Por lo anterior, sería necesario considerar otro tipo de ensayo que permitiera un control rápido y confiable de la estructura, para determinar esta propiedad, sin ocasionar cambios en la misma. Siendo la técnica de VPU (Velocidad de Pulso Ultrasónico) un ensayo no destructivo, se podría correlacionar los valores obtenidos mediante este ensayo con los resultados adquiridos en la prueba destructiva de resistencia a la compresión [1] y posteriormente estimar la resistencia mediante medidas de VPU, evitándose el deterioro de la estructura.

La Velocidad de Pulso Ultrasónico está influenciada de manera significativa por muchos factores tales como: La calidad y tipo de agregados, porosidad, contenido de agua, edad del concreto entre otras. Por lo tanto, el estudio del efecto de estas variables es de vital importancia para el mejoramiento de esta técnica en la evaluación de estructuras de concreto.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La determinación de la resistencia a la compresión del concreto se ha realizado a lo largo del tiempo por ensayos destructivos obteniendo resultados muy veraces, sin embargo, el ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico como una herramienta útil para determinar la calidad del concreto evitaría la destrucción del material y llevaría a obtener resultados aproximados a los esperados. Para conseguir una relación más congruente entre las dos pruebas es necesario conocer cual es la influencia sobre estas, de factores como: relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado entre otros.

1.3 ESTADO DE ARTE

La necesidad de buscar una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto llevo a los ingenieros civiles a indagar más sobre las posibles técnicas no destructivas que permitieran de forma simple obtener una información veraz sobre este material. En 1949 Leslie y Cheesman desarrollaron la técnica de medición de velocidad de pulso ultrasónico como medio de diagnostico para conocer el estado del concreto, siendo utilizada desde hace aproximadamente 60 años. En 1953 Parker encontró una dependencia en la medición de velocidad con las propiedades elásticas del medio, sugiriendo entonces que del conocimiento de la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, permitiendo así relacionar las mismas con los parámetros de calidad del material. Para este mismo año en Ontario, Parker determinó una relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión [2].

A partir de estos estudios, Malhotra en 1985 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 con base en intervalos de velocidad [3], haciendo de su aplicación un

medio de evaluación inicial y así mismo un punto de comparación con la técnica destructiva de resistencia a la compresión, llevada a cabo después de este procedimiento. Alrededor de esta época Anderson y Seals (1981) y Sturup (1984) y durante muchos años, otros investigadores han intentado desarrollar modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión uniaxial del concreto, basándose en la velocidad de pulso ultrasónico obteniendo como resultado modelos diferentes entre sí, lo cuál se cree se debe al carácter heterogéneo del material. Una conclusión a la cual se ha llegado es que una de las causas principales en la variación de las propiedades es el tipo de agregado y sus proporciones en la mezcla. Solis et al. (2003) [4].

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 ésta técnica como una buena alternativa en el estudio del comportamiento de este material mediante una prueba no destructiva.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Evaluar el efecto de la relación agua/cemento, tamaño máximo de agregados y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar el efecto de la variación de la relación agua/cemento sobre la velocidad de pulso ultrasónico.
- Establecer las variaciones de la velocidad de pulso ultrasónico durante el tiempo de curado.

- Determinar el efecto de la granulometría de los agregados sobre la velocidad de pulso ultrasónico.
- Relacionar los resultados de resistencia a la compresión con las medidas de velocidad de pulso ultrasónico para las diferentes condiciones de trabajo.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. GENERALIDADES DEL CONCRETO

El concreto es producto de la mezcla de tres componentes fundamentales: cemento, agua y agregados (arena y grava). El cemento presenta la propiedad de fraguar y endurecerse con el agua, debido a la reacción química de hidratación que ocurre entre los dos. Al producirse esta mezcla se obtiene una pasta con aire atrapado o aire incluido intencionalmente, cuya consistencia depende de la cantidad de agua que se agregue. Por otra parte, la función de los agregados dentro de la mezcla es como material de relleno, haciéndola más económica [5].

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado. Por lo anterior, la pasta constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto [6].

Al fraguar y endurecer la pasta en conjunto con los agregados, proporcionan parte de la resistencia mecánica a la compresión que va tener el concreto en estado sólido, sin embargo es con el tiempo de curado con el cual el concreto madura y desarrolla sus propiedades mecánicas finales.

Además de lo anterior, el comportamiento del concreto esta también determinado por la influencia de la relación agua/cemento, debido a que se puede obtener las siguientes ventajas a la hora de reducir el contenido del agua:

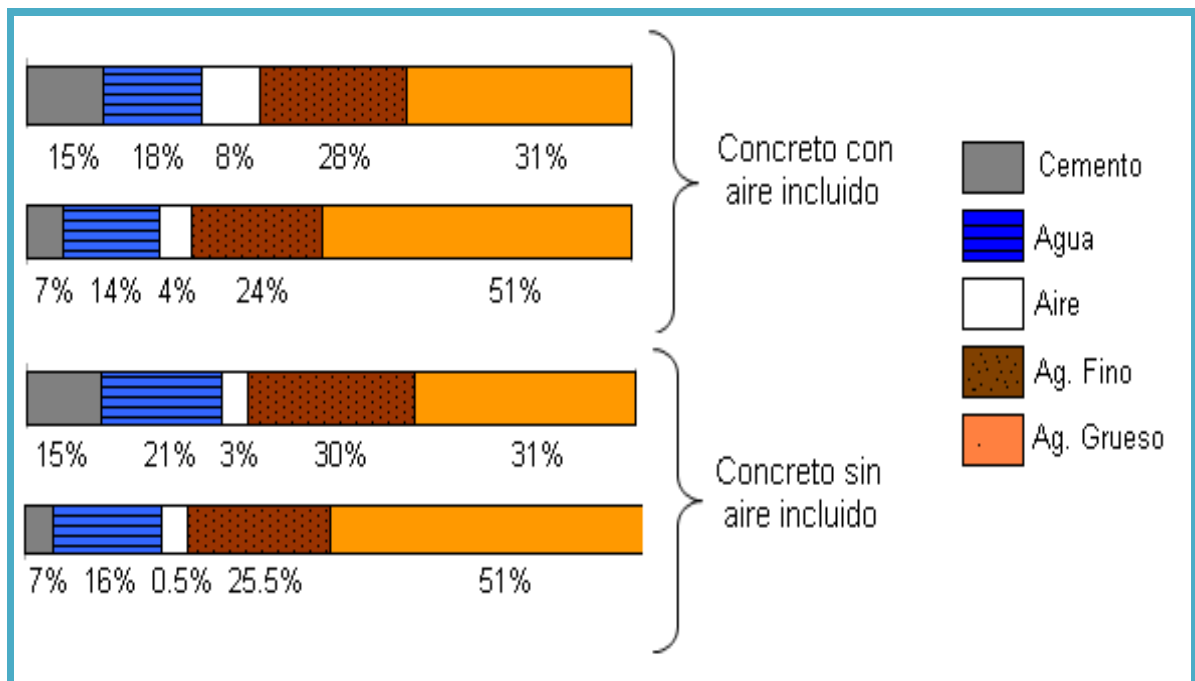
- ✓ Incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión.
- ✓ Menor permeabilidad.

- ✓ Lograr una mejor unión entre capas sucesivas entre el concreto y el esfuerzo.
- ✓ Reducir las tendencias de agrietamientos por contracción [7].

2.1.1 Componentes del Concreto.

Las proporciones por volumen de cada uno de los componentes del concreto (cemento, agua, aire, agregado grueso y agregado fino) dependerán de la resistencia y durabilidad que se busque en el concreto y se conseguirán a partir de un diseño de mezcla. A continuación en la figura 1 se presenta un ejemplo de estas proporciones para concreto con o sin aire incluido.

Figura 1. Componentes del concreto con o sin aire incluido



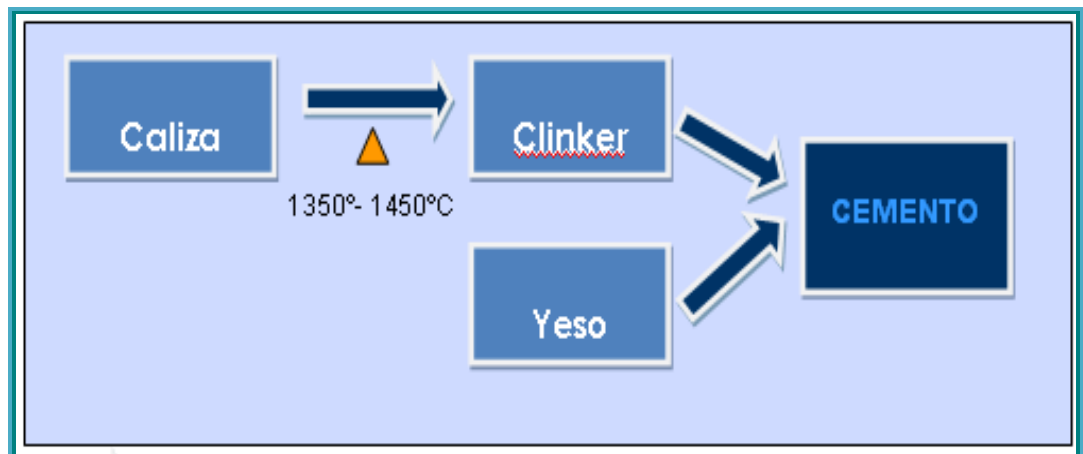
Fuente. Tecnología del Concreto y Mortero [8]

2.1.1.1 Cemento: El cemento es uno de los componentes básicos para la elaboración del concreto, debido a sus propiedades adhesivas y cohesivas, las

cuales le permiten fraguar y endurecer en presencia de agua para formar la pasta, así como aglutinar los agregados para formar el concreto [9].

El cemento se obtiene a partir de la producción de Clinker. Al calcinar Arcilla y Caliza a una temperatura comprendida entre 1400° y 1500° C, se obtiene este material considerado la materia prima para producir el cemento, posterior a esto, el Clinker se alimenta a los molinos junto con el yeso (regulador del fraguado), para obtener como producto final el cemento[10]. En la figura 2 se muestra un esquema del proceso.

Figura 2. Proceso de fabricación del cemento.



Fuente. Autores

Las proporciones de los materiales añadidos así como el control de las variables dependen del tipo de uso que se le va a dar al cemento. La norma ASTM C 150 (ver tabla 1), establece ocho diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades [11].

Ya que el cemento presenta grandes características su aplicación es principalmente en construcciones que requieran una elevada firmeza y resistencia.

Tabla 1. Clasificación del cemento según norma ASTM C 150.

TIPO	APLICACIÓN
I	Normal. Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.
IA	Normal. Uso general, con inclusor de aire.
II	Moderado. Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
IIA	Moderado. Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.
III	Altas resistencias. Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.
IIIA	Altas resistencias. Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
IV	Bajo calor de hidratación. Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.
V	Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

Fuente. Norma ASTM C 150 [11]

2.1.1.2 Agua: El agua es el componente esencial en las mezclas de concreto ya que es está la que permite que el cemento desarrolle su poder ligante. En general, un porcentaje de la cantidad de agua que se agregue a la mezcla es requerido para la hidratación del cemento, la otra parte suministra mayor fluidez a la pasta permitiendo un aumento en el manejo de la misma a la hora de trabajar con los agregados [12].

El agua de mezclado debe ser: Agua potable, limpia de impurezas como ácidos, bases y materias orgánicas. Esto es con el fin de evitar que propiedades como: tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, acabado y durabilidad, sean afectadas por agua contaminada. La norma ASTM C 94 presenta las especificaciones del agua a utilizar en el mezclado como también el contenido máximo de sustancias disueltas o sales aceptables para uso dentro de la mezcla [13].

Conocidas las características que debe tener el agua de mezclado es necesario tener en cuenta que las proporciones con que se adicionen a la mezcla deben ser las estrictamente necesarias, ya que el exceso de agua aumenta la tendencia a la evaporación creando vacíos dentro de la estructura. Si se suministra una cantidad inferior a la estipulada, la mezcla va a tener menor manejabilidad.

2.1.1.3 Agregados. Los agregados son materiales inorgánicos naturales o artificiales que conforman el esqueleto granular del concreto, puesto que al mezclarse con la pasta creada por el cemento y agua, ocupan entre el 60 y 80% del volumen de la unidad cúbica de concreto. Por esto se considera que afecta significativamente las propiedades buscadas, al ser el elemento mayoritario en la mezcla [14].

Clasificación según su tamaño

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos según su tamaño: finos y gruesos. El agregado fino está constituido por arenas y/o piedras trituradas o manufacturadas cuyo tamaño debe estar entre $75\mu\text{m}$ (malla № 200) hasta 4.75mm. El contenido del agregado fino en un concreto normalmente se encuentra entre 35 y 45% por masa o volumen total de agregado. Los agregados gruesos son aquellos cuyo tamaño de partícula está entre 4.75mm (son retenidos en la malla № 4) y 50mm. El tamaño de agregado grueso más utilizado es el de 19mm (3/4") o el de 25mm (1") [15].

Clasificación según su densidad o peso específico

La densidad está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, por lo tanto, los agregados se clasifican de acuerdo a su peso específico en: livianos ($Pe < 2.5$), normales ($2.5 < Pe < 2.75$) y pesados ($Pe > 2.75$). Estas diferencias los hacen aptos para producir concretos con cierta variedad en el peso unitario, característica básica del material.

Los agregados se clasifican según su peso específico en Ligeros, normales y pesados. A partir de esta clasificación se genera una característica importante en el concreto que es su peso unitario, clasificándolo en tres grandes grupos: Concretos de peso normal (2400 Kg/m^3), concretos ligeros (peso unitario $<1800 \text{ Kg/m}^3$) y concretos pesados (peso unitario $>3200 \text{ Kg/m}^3$) [16].

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Algunas propiedades físicas de los agregados son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc. También es de suma importancia la granulometría de los agregados, y el tamaño máximo del agregado (para la grava), tanto en el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido.

- Absorción: La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente lo que disminuye la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregado tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño, etc; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesaria para cubrir con pasta, se tendrá menor fluidez [17].

Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas.

- Porosidad: La porosidad se relaciona con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad y su volumen total. A nivel práctico, la medida a través de la cual se conoce cual es el nivel de porosidad de un agregado es su capacidad de absorción.

El efecto de la porosidad de las partículas de agregado es muy importante dentro del concreto ya que no solo afectan propiedades mecánicas como la adherencia, resistencia a la compresión entre otras, sino también propiedades como durabilidad, resistencia al congelamiento y deshielo, etc. Ya que una partícula porosa es menos dura que una partícula compacta o maciza [18].

- Adherencia: La adherencia es la interacción que existe entre la zona de contacto agregado-pasta, este tipo de interacción se produce por fuerzas de origen físico-químico. por lo tanto, entre mayor adherencia se consiga entre la pasta de cemento y el agregado mayor será la resistencia del concreto. Esta propiedad mecánica depende de la calidad de la pasta de cemento, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas de agregado [19].

2.1.2 Proceso de fabricación del concreto

Con el fin de realizar adecuadamente este proceso la A.C.I. recomienda que se lleven a cabo las siguientes actividades: caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, fraguado y curado.

2.1.2.1 Caracterización de la materia prima. Básicamente esta etapa consta de una caracterización detallada de los agregados tanto finos como gruesos presentes en la mezcla, a fin de conocer características como: Modulo de finura, gravedad específica, peso específico, porcentaje de absorción, tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

El análisis granulométrico se realiza según las siguientes normas: NTC 77 [20], NTC 78 [21] y consiste en hacer pasar el agregado de cualquier tamaño por una serie de tamices con el fin de seleccionar el material cuya granulometría según la norma pueda clasificarse como fino o grueso. A partir de esto, se pesa tanto el

material que pasa por cada malla así como el material que queda retenido, todo esto a fin de conocer el modulo de finura.

Por otra parte, la gravedad específica, masa unitaria, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos, se obtienen siguiendo la metodología presentada por normas NTC 92 [22], NTC 176 [23] y NTC 237 [24].

2.1.2.2 Diseño de mezcla. En la actualidad existen diversos métodos de diseño de mezcla disponibles sin que haya variaciones representativas en las proporciones calculadas para cada uno de los materiales a utilizar. Sin embargo en Colombia el método más empleado es “PRÁCTICA RECOMENDADA PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL Y CONCRETO PESADO A.C.I.- 211”.

La ACI (American Concrete Institute) cuenta con un procedimiento a través del cual se puede realizar el diseño de mezcla [25]. Este método consiste en una serie de tablas obtenidas de forma empírica, las cuales permiten determinar las cantidades necesarias de cada uno de los materiales presentes en la mezcla [26]. A fin de obtener un concreto adecuado y para un uso específico. A continuación se presentan los pasos a seguir [27]: selección del asentamiento, selección de la relación agua/cemento, estimación del contenido de agua, estimación del contenido de cemento, estimación del contenido de agregado grueso, estimación del contenido de agregado fino, fraguado y curado.

Características o detalles de cada uno de estos pasos son presentadas en el anexo A.

2.1.2.3 Fraguado. El fraguado puede definirse como el lapso de tiempo necesario para que la mezcla pase de un estado fluido a un estado sólido, debido a las reacciones químicas que se producen cuando se ponen en contacto el cemento con el agua de mezclado, causando un endurecimiento paulatino de la mezcla. El

fraguado ocurre al exponer las probetas al aire libre durante mínimo 10 horas en las que se busca obtener una parte del endurecimiento que será completado con los 28 días del proceso de curado. [28]

2.1.2.4 Curado Húmedo. El curado es el proceso natural por medio del cual el concreto madura y desarrolla propiedades mecánicas típicas del estado endurecido bajo condiciones de temperatura y humedad. En el tiempo durante el cual se lleva a cabo este proceso se desarrollan una serie de reacciones químicas de hidratación entre el cemento y el agua. Se ha comprobado que curando en húmedo se tienen las condiciones más favorables para el proceso así como mejores propiedades mecánicas.

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

2.2 ENSAYO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la actualidad el concreto es el material de construcción más utilizado en nuestro país gracias a sus propiedades mecánicas, principalmente a la resistencia a la compresión, característica del concreto que se utiliza como medio evaluador de su calidad. Es por esto que las mezclas de concreto son diseñadas de acuerdo a esta característica y a requerimientos en durabilidad con fin de determinar cual es la aplicación que se le va a dar (Puentes, edificios, etc, entre otros).

Esta característica física del concreto se puede definir como la máxima resistencia que puede soportar un espécimen de este material a carga axial a una edad de 28 días. Las unidades con las que generalmente se expresa esta propiedad son Kg/cm^2 ó MPa.

El ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión a partir de la fuerza de ruptura dividida por el área de sección de la probeta y se reporta en unidades de PSI o en MPa. Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 17MPa (2500 PSI) para el concreto residencial hasta 28 MPa (4000 PSI) y más para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 70 MPa (10000 PSI) y más [29].

De estudios colombianos se ha clasificado el uso del concreto de acuerdo a su resistencia a la compresión a los 28 días de edad. Esta clasificación se presenta en la tabla 2 [30].

Tabla 2. Clasificación del concreto según resistencia a la compresión.

DESCRIPCIÓN	MPa	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	
		Kg/cm^2	Lb/pulg^2
Normal	7 - 42	70 - 420	1000 – 6000
Alta resistencia	42 - 100	420 - 1000	6000- 14000
Ultra alta resistencia	Más de 100	Más de 1000	Más de 14000

Fuente. Concretos y Morteros

2.2.1 Factores que afecta la resistencia del concreto.

Dentro de los factores que influyen sobre la resistencia del concreto están [31]:

- a. Aquellas variables que influyen en el proceso de fabricación del concreto, como: Mezclado, transporte, colocación, compactación y curado.
- b. Aquellos factores relacionados con la calidad y la cantidad de elementos constitutivos en el concreto, tales como: Agregados, cemento y agua.

De estos dos grandes grupos los factores que más afectan esta propiedad son: el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, el tamaño máximo de agregado grueso y el tiempo de curado. A continuación se presentan algunos detalles de cada uno de ellos.

- **Cemento:** El efecto del cemento sobre la resistencia a la compresión depende de cuales sean sus características físicas así como de la cantidad requerida dentro de la mezcla, esto se debe a que el cemento es el elemento más activo en la mezcla afectando de sobremanera esta propiedad. Por lo tanto, un aumento en el contenido de cemento produce un aumento en la resistencia, pero este contenido no debe exceder de 470Kg/m^3 ya que produce un efecto opuesto sobre esta propiedad mecánica [32].
- **Relación agua/cemento:** La relación agua/cemento es el factor más importante en la resistencia a la compresión de un concreto. Sin embargo las medidas de esta propiedad pueden variar según sean el tamaño de agregado y el cemento utilizado para una misma relación A/C. Entonces es necesario considerar estos dos factores antes de analizar cuál es el efecto real [33].
- **Calidad de agregados:** La calidad de los agregados influye sobre la resistencia de un concreto a través de las siguientes propiedades: Granulometría, forma y textura de los agregados, tamaño máximo del agregado grueso y la resistencia y rigidez de las partículas del agregado [34].

- **Tamaño máximo de agregado grueso:** Otro factor importante que afecta la resistencia es el tamaño máximo de agregado grueso. Esto se debe a que la cantidad de cemento necesario para conseguir determinada resistencia va a depender del tamaño máximo de agregado, pues se ha demostrado que se requiere de una mayor cantidad de cemento cuando se trabaja con agregado de tamaño máximo menor lo que produce un aumento en la resistencia. Lo mismo ocurre cuando se trabaja con la misma relación agua/cemento, se obtiene mayor resistencia si los concretos son preparados con agregados de tamaño máximo menores [35].

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

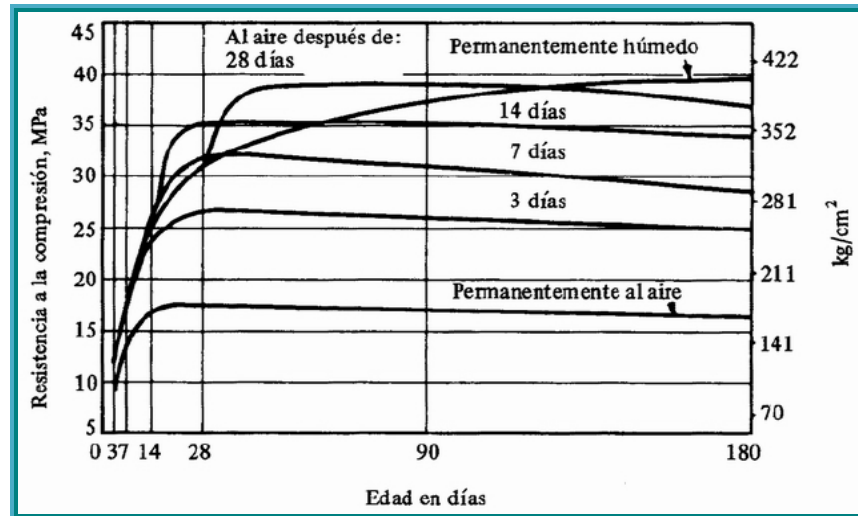
- **Tiempo y tipo de curado del concreto:** Debido a que durante la etapa de curado se dan las reacciones de hidratación cemento-agua, las cuales presentan gran incidencia sobre la resistencia. Un curado donde el concreto se encuentre expuesto al aire producirá una hidratación incompleta causando una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

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

En la figura 3. Se muestra la influencia de las distintas condiciones de curado sobre la resistencia a la compresión del concreto a medida que aumenta su edad, esto basándose en los experimentos realizados por Gonnerman y Shuman [36]. La figura permite observar que el curado realizado totalmente al aire produce los más

bajos valores de resistencia durante todo el tiempo de curado, en caso contrario el curado llevado a cabo en medio húmedo permite lograr los mayores valores de resistencia.

Figura 3. Influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto (Gonnerman y Shuman en 1928).



Fuente. Tecnología del Concreto y del Mortero [37].

2.3 ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO: VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

“La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica desarrollada para probar los materiales y se usa en el control de calidad. Es una prueba no destructiva y en la actualidad es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su fácil empleo además permite determinar la resistencia a la compresión, el modulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto” [38].

Esta técnica se basa en la propagación de una onda a través de un medio sólido, cuya velocidad de propagación dependerá directamente de las propiedades elásticas de cada material.

La frecuencia utilizada para las ondas longitudinales en evaluación de materiales metálicos se encuentra entre 0.25 y 25 MHz, mientras que las frecuencias empleadas en el concreto se encuentran dentro del rango de 20 a 150 KHz. Estas frecuencias bajas permiten longitudes de onda grandes aptas para la inspección de materiales heterogéneos, característica principal del concreto (ver norma ASTM 597) [39].

En general, el uso de esta técnica como ensayo no destructivo es una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido (Ver tabla 3), pero en ningún caso reemplazan a los ensayos destructivos. Esto se debe a que la medida de esta técnica se ve condicionada por la heterogeneidad del concreto. Por lo tanto, la correlación entre la resistencia a la compresión (σ_f) y la velocidad de pulso ultrasónico (C_i) esta fuertemente afectada por factores como: porosidad, tipo y tamaño de agregado, tipo de cemento, relación agua/cemento, condiciones de fraguado y curado, edad del concreto, etc. [40]

Tabla 3. Clasificación de la calidad del concreto por medio de la Velocidad de Pulso Ultrasónico según Leslie y Cheesman.

VELOCIDAD (m/seg)	CALIDAD DEL CONCRETO
Más de 4.500	Excelente
3.500 – 4.500	Buena
3.000 – 3.500	Regular
2.000 – 3.000	Mala
Menos de 2.000	Muy Mala

Fuente. Concretos y Morteros (Manejo y Colocación en Obra) [41]

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico, VPU, consiste en determinar el tiempo durante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una dimensión conocida del elemento de concreto. Así, la longitud de la trayectoria dividida por el tiempo que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la velocidad de pulso ultrasónico [42].

$$v = \frac{L}{t}$$

Ecuación 1

Esta prueba no destructiva no solo permite determinar las discontinuidades de un material heterogéneo como lo es el concreto, sino también algunas de sus propiedades mecánicas más influyentes a la hora de utilizarlo en construcción como: modulo elástico y resistencia a la compresión.

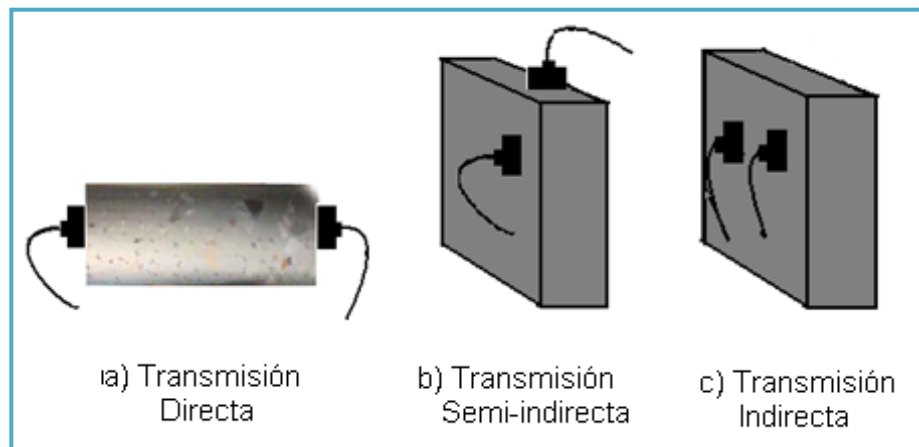
El ensayo puede realizarse de tres maneras [43]:

Transmisión directa. Los terminales del emisor y el receptor son colocados y enfrentados en superficies opuestas del concreto. Este método presenta grandes ventajas pues produce una mayor sensibilidad y una ruta de viaje más definida por esto es empleada en vigas y columnas. (Figura 4a.)

Transmisión semi-directa. Las terminales son colocadas adyacentemente formando generalmente un ángulo de 90°, este método se emplea en pilares, estribos o zapatas. (Figura 4b.)

Transmisión indirecta o superficial. En este caso las terminales son colocadas en la misma superficie del concreto. Este es el método menos utilizado debido a la baja sensibilidad. (Figura 4c.)

Figura 4. Mecanismos de transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico.



Fuente. Los Autores [44]

2.3.1 Factores que afectan la velocidad de pulso ultrasónico del concreto.

A medida que el estudio del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico aumentó se ha demostrado que los elementos presentes en la mezcla así como las condiciones a las cuales se somete la misma tiene un efecto pronunciado sobre esta técnica. Alguno de estos factores son [45]: cantidad y tipo de agregado, relación agua/cemento, tipo y tiempo de curado del concreto.

- **Cantidad y Tipo de agregado:** De estudios anteriores [46] se ha demostrado que tanto la cantidad como el tamaño de agregado afectan considerablemente las reacciones de hidratación y la trayectoria de la onda, generando variaciones en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico para concretos con una misma relación A/C.
- **Relación agua/cemento:** Puesto que es la relación A/C quien determina parte de las características del concreto, su efecto sobre la técnica de VPU es inversamente proporcional, ya que a medida que disminuye la relación, los valores de velocidad de pulso aumentan, debido a que la cantidad de agua presente en la mezcla es menor, lo que disminuye el porcentaje de porosidad en la material,

evitando la dispersión de las ondas ultrasónicas y por tanto, tomando menos tiempo en el recorrido de la trayectoria.

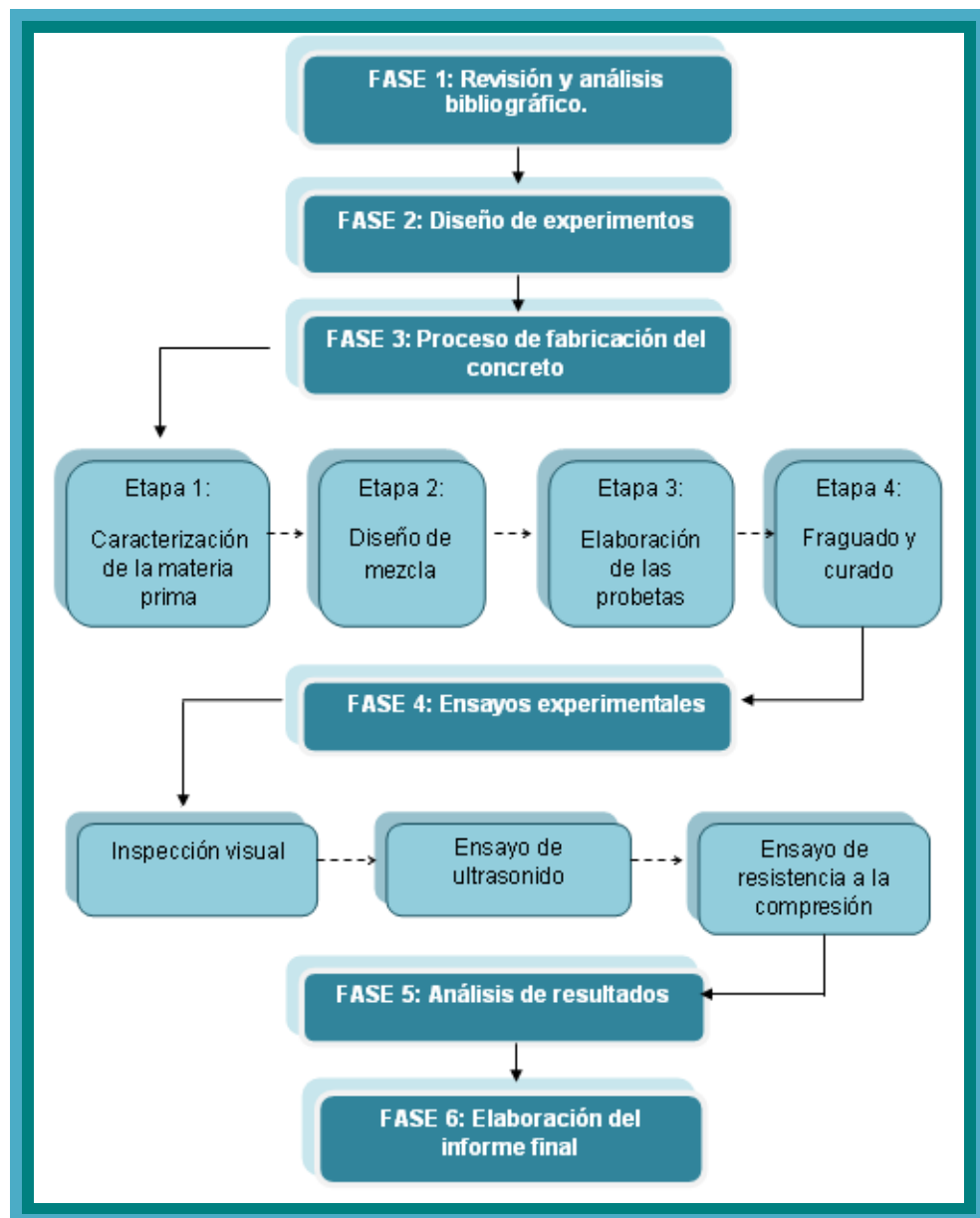
- **Tipo y tiempo de curado del concreto:** Las reacciones de hidratación aumentarán según sean las condiciones de humedad y temperatura bajo las cuales sea el curado, causando una variación representativa en la Velocidad de Pulso Ultrasónico. Por lo tanto, si el concreto es curado bajo condiciones de humedad del 100%, la velocidad de onda aumentará en un porcentaje mayor debido a las condiciones de saturación.

Por otra parte, El aumento en la edad del concreto genera una disminución en la porosidad debida a las reacciones de hidratación, lo que conlleva a que las ondas se propagan más rápido en este medio sólido.

3. METODOLOGÍA

En la figura 5 se muestra un diagrama de flujo con las etapas que se llevaron a cabo en la realización de la presente investigación.

Figura 5. Esquema de la Metodología para el desarrollo de la investigación.



Fuente. Los autores

Cabe resaltar que en esta investigación se analizaron muestras de concreto preparadas con dos granulometrías diferentes de agregado grueso provenientes de la zona de Pescadero, Santander. Se emplearon relaciones agua/cemento (A/C) de: 0.4, 0.5 y 0.6, con el fin de abarcar las relaciones más empleadas en la industria de la construcción.

3.1 FASE 1: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA LITERATURA RECOPIADA

Durante el desarrollo de esta investigación se realizó una recopilación de artículos, diversas tesis y trabajos de grado, trabajos de grupos de investigación entre otros. Se revisó todo el material bibliográfico referente a la técnica no destructiva de Velocidad de Pulso Ultrasónico y la técnica destructiva de Resistencia a la Compresión sobre concreto sin refuerzo. Esta información permitió conocer el posible efecto de las variables como: relación agua/cemento, el tamaño de agregado y el tiempo de curado sobre el comportamiento del concreto frente a los ensayos indicados. Por otra parte se realizó un estudio sobre el proceso de elaboración, generalidades, reacciones de hidratación y propiedades del concreto con el cuál se trabajo.

3.2. FASE 2: DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para evaluar el efecto de cada una de las variables independientes (Relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado) así como la interacción entre ellas sobre las variables dependientes (Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistencia a la Compresión), se elaboró un diseño experimental de 2^n por medio del paquete estadístico STARTGRAFHIG. Esto con el fin de obtener una

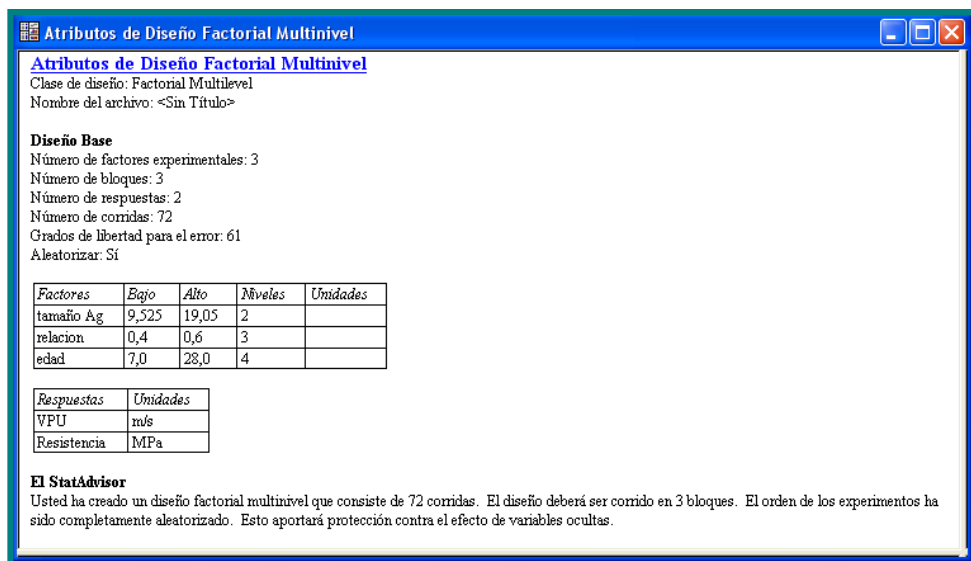
información más acertada de lo que ocurre en el concreto a medida que se produce el cambio de alguna de estas variables.

El modelo obtenido fue de 2^3 con 3 repeticiones, llegando a un total de 72 ensayos. Se establecieron como puntos máximos, medios y mínimos de las variables los valores presentados en la tabla 4. En las figuras 6 y 7 se presentan las características del diseño de experimentos y la tabla con los ensayos aleatorios sugeridos por el paquete estadístico.

Tabla 4. Distribución representativa de las variables empleadas en el diseño de experimentos y sus respectivos límites.

VARIABLES INDEPENDIENTES	PUNTO MÁXIMO	PUNTO MEDIO		PUNTO MÍNIMO
Relación A/C	0,4	0,5		0,6
Tamaño de agregado	3/8"			3/4"
Tiempo de curado	7	14	21	28

Figura 6. Diseño de experimentos



Fuente. Los Autores

Figura 7. Modelo estadístico utilizado en el análisis de los valores resultantes de VPU y resistencia a la compresión.

	BLOQUE	tamaño Ag mm	Relacion	edad	VPU m/s	Resistencia MPa
1	1	19,05	0,5	7,0		
2	1	9,525	0,4	7,0		
3	1	9,525	0,5	21,0		
4	1	9,525	0,5	7,0		
5	1	9,525	0,5	14,0		
6	1	9,525	0,5	28,0		
7	1	19,05	0,5	28,0		
8	1	19,05	0,4	28,0		
9	1	19,05	0,4	7,0		
10	1	9,525	0,6	7,0		
11	1	19,05	0,6	7,0		
12	1	9,525	0,4	21,0		
13	1	9,525	0,4	14,0		
14	1	19,05	0,4	21,0		
15	1	19,05	0,4	14,0		
16	1	19,05	0,5	21,0		
17	1	9,525	0,6	28,0		
18	1	19,05	0,6	14,0		
19	1	19,05	0,6	28,0		

3.3 FASE 3: Proceso de fabricación del concreto

En el proceso de fabricación se realizaron diferentes etapas que tenían como único fin obtener un concreto de buena calidad para poder llevar a cabo las fases posteriores. Dentro de esta fase se encuentran las siguientes etapas:

- Etapa 1. Caracterización de la materia prima
- Etapa 2. Diseño de mezcla
- Etapa 3. Elaboración de probetas
- Etapa 4. Proceso de fraguado y curado

3.3.1 Etapa 1: Caracterización de la materia prima.

Para la fabricación de la mezcla de concreto fueron necesarios los siguientes materiales: cemento Portland tipo I, agregados fino y grueso, y agua potable. A continuación se presentan las características básicas de los mismos, al igual que los procedimientos empleados para su evaluación.

Todos los ensayos de caracterización se llevaron a cabo en el Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Edificio Álvaro Beltrán Pinzón.


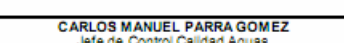
- CEMENTO.

Con el fin de cumplir las especificaciones mecánicas, físicas y químicas indicadas por las Normas NTC 121[47] y NTC 321 [48], el cemento empleado fue PORTLAND TIPO I.

- AGUA POTABLE.

Se utilizó agua potable de la ciudad de Bucaramanga proveniente del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. El análisis fisicoquímico y microbiológico del agua suministrado por el acueducto se presenta en la figura 8.

Figura 8. Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua utilizada para la realización de las probetas.

No Aplica FCC 507-006 Rev.:0		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA			AÑO:		2010													
PARAMETROS MES	Parámetros Fisicoquímicos											Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL			
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente UPC	pH Unidades	Oloro y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cenizas mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No.de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales		% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
Enero	90	1,02	0,57	3,1	7,70	0	0,05	60,9	74,9	4,9	23,9	0,10	1,0	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,92	0,56	2,4	7,58	0	0,05	59,6	77,5	4,4	28,9	N.D	0,9	N.D	168	0	100	0	100	0,14
Marzo	93	0,92	0,60	2,8	7,44	0	0,05	57,7	77,3	4,7	31,1	0,10	0,9	N.D	186	0	100	0	100	0,16
PROMEDIO	89	0,95	0,58	2,8	7,57	0	0,05	59,4	76,6	4,7	28,0	0,10	0,9	N.D	178	0,0	100	0,0	100	0,10
RES. 2115/07.	30	0,5-2,0	0,2	15	6,5-9,0	ACEP.	0,2	200	300	250	250	0,5	10	0,1	30	0	100	0	100	0,5
Convenciones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable																			
Nota:	El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5 AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.																			
Elaboró:	Luis Salomon Barragan			Revisó y Aprobó:																
CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas																				

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga [49]

- AGREGADOS.

Para conseguir una mezcla de concreto que fuera consistente se trabajó con agregados procedentes del municipio de Pescadero (Santander), utilizando la arena como agregado fino y grava como agregado grueso.

Se determinó el modulo de finura, gravedad específica o peso específico, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos para cada uno de los agregados, a través de un análisis granulométrico basado en normas: NTC 92 [22], NTC176 [23] y NTC 237 [24].

La clasificación de los agregados por tamaños (a fin de obtener una granulometría específica) se realizó siguiendo las Normas NTC 77 [20] y NTC 78 [21]. En el caso del agregado fino se utilizó la serie de tamices 4, 8, 16, 30, 50 y 100, y según este orden el material retenido por cada tamiz fue pesado a fin de obtener el análisis granulométrico. Por otra parte y teniendo en cuenta que para el desarrollo de esta investigación era necesario trabajar con dos tamaños máximos de agregado grueso, la clasificación por tamaños se realizó utilizando el juego de tamices 3/4", 3/8" y 4. Se seleccionaron agregados con tamaño máximo de 3/4" y 3/8".

Los resultados de esta caracterización son mostrados en el capítulo siguiente.

3.3.2 Etapa 2: Diseño de la mezcla.

El diseño de mezcla se realizó para tres relaciones agua/cemento (0.4, 0.5 y 0.6) con dos tamaños máximos de agregado grueso (3/4" y 3/8"), planteados en los objetivos del proyecto. En total se realizaron 6 diseños de mezcla. Un ejemplo correspondiente a la relación agua/cemento 0.4 con tamaño máximo de agregado de 3/8" se presenta en el anexo B.

La dosificación utilizada en cada una de las mezclas de concreto, para un total de 14 probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 20cm de longitud y un volumen de $1.76 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, se presenta en el capítulo de resultados,

3.3.3 Etapa 3: Elaboración de las probetas.

Se elaboraron catorce probetas de cada relación agua/cemento para cada uno de los tamaños de agregado, con el fin de efectuar los ensayos de inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, se examinaron tres probetas de cada relación y tamaño de agregado en los días 7, 14, 21 y 28 de curado. Es importante resaltar que como los dos primeros ensayos son de tipo no destructivo, las mismas probetas fueron empleadas para realizar el ensayo destructivo de resistencia a la compresión, fabricándose en total 84 probetas cilíndricas de las cuales fueron analizadas 72.

Para la fabricación de las probetas fue necesario inicialmente limpiar los moldes de plástico con dimensiones de $10 \pm 0.5 \text{ cm}$ de diámetro por $20 \pm 0.5 \text{ cm}$ de largo. Posteriormente se humedecieron con ACPM a fin de evitar que la mezcla se adhiera al molde y lograr así desencofrar más fácilmente. Luego se procedió a pesar en una balanza analítica cada uno de los materiales presentes en la mezcla, según fueran las proporciones calculadas en su diseño. Estos datos se presentan en el siguiente capítulo teniendo en cuenta el tamaño máximo de agregado grueso con el cual se trabajó.

Después de lo anterior se realizó la mezcla de concreto al adicionar uno a uno los materiales necesarios. La mezcla completa finalmente homogeneizada fue colocada con una cuchara por capas en los moldes cilíndricos y se compactó de forma manual cada capa, aplicando 25 golpes en diferentes lugares de la superficie con una varilla metálica. Después de llenar cada capa, se aplicaron una

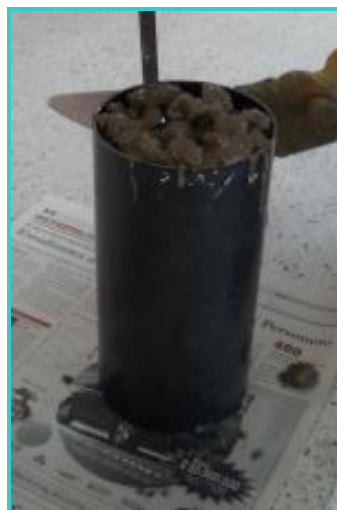
serie de golpes con un martillo de caucho tanto en la parte exterior como superior del cilindro a fin de eliminar el aire atrapado [50].

En la figura 9 se presentan algunos de los pasos seguidos durante el proceso de elaboración de las probetas.

Figura 9. Proceso de elaboración de las probetas. a) Fabricación de la mezcla; b) elaboración de las probetas.



a) Fabricación de la mezcla



b) Elaboración de las probetas

Con el fin de desarrollar adecuadamente las pruebas se elaboró una programación de tal manera que se analizaban solo 9 probetas por día.

3.3.4 Etapa 4: Fraguado y curado.

Después de adecuar los moldes, las probetas se dejaron 24 horas al aire libre como tiempo de fraguado, tiempo durante el cual se buscaba una hidratación inicial. A fin de obtener una hidratación completa el curado se realizó bajo condiciones estándar de temperatura y humedad (23°C y humedad del 100%) durante los días estipulados, según norma ICONTEC 1377 [51].

3.4 FASE 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES

En la fase experimental de esta investigación se realizaron tres pruebas a fin de conocer el estado superficial de las probetas así como el comportamiento físico-mecánico del concreto trabajado. Los ensayos se efectuaron los días 7, 14, 21 y 28 del tiempo de curado, a 9 probetas por día, para cada tamaño máximo de agregado, Las pruebas realizadas fueron:

- Inspección Visual [52]
- Ensayo de Velocidad de Pulso ultrasónico (Norma ASTM C 597-02) [53]
- Ensayo de Resistencia a la Compresión (Norma ASTM C39/C39M-04) [54]

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas son mostrados en el siguiente capítulo.

3.4.1 Inspección visual.

Después de extraer las probetas de la piscina en la cual permanecieron durante los días de curado planteados (7, 14, 21 y 28), cada probeta fue secada y pesada, para luego ser analizada por inspección visual. Durante este ensayo se observó

cuidadosamente la probeta a fin de conocer cual era su estado superficial y detectar posibles defectos como: mal acabado superficial, discontinuidades abiertas a la superficie y porosidad.

3.4.2 Ensayo de ultrasonido.

Para medir la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) se empleo el equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA, utilizando transductores de 54KHz de frecuencia. El cuál mide el tiempo de propagación de la onda a través de la pieza con relación a la distancia entre los transductores.

Las mediciones se aplicaron a tres cilindros, para cada relación agua/cemento y cada tamaño de agregado en los días 7, 14, 21 y 28. A cada probeta se le tomaron dos lecturas en tres puntos diferentes dentro de la misma cara, luego estos valores fueron promediados.

El procedimiento seguido para realizar este ensayo se encuentra en la norma ASTM C597-02, ver figura 10.

1. Preparación y acondicionamiento de las probetas. Inicialmente se preparo la probeta al nivelar y limpiar la superficie de las dos caras paralelas para evitar una superficie rugosa e impurezas que causaran lecturas erróneas. Luego cada probeta se colocó sobre una guía que permitía obtener mejores valores de velocidad al mantener los transductores firmes en la misma posición el uno frente al otro.
2. Ajustes del equipo. Para empezar se conectaron los transductores a los puertos correspondientes en el equipo ya cargado. Se ajustaron los parámetros bajo los cuales iba a trabajar el equipo, estos parámetros son presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de trabajo del equipo CNS FARNELL LTDA PUNDIT PLUS.

PARAMETROS DEL EQUIPO	
Voltaje	500V
Unidades	Métricas
Modo de pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	Apagado
Pulso de referencia	10 seg
VELOCIDAD	
Distancia entre transductores	0,21m
Limite superior	9999
Limite inferior	1
Velocidad/limite	Vel

Fuente. Los Autores

3. Mediciones. Se calibró el equipo según las recomendaciones del fabricante, se utilizó como acoplamiento vaselina y se empleo como método de transmisión el método directo. Con las condiciones indicadas se hicieron las mediciones en cada una de las probetas.

Figura 10. Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico.; a) Equipo de ultrasonido; b) Calibración del equipo y prueba de ultrasonido.



a) Equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA



b) Calibración del equipo y prueba de ultrasonido

3.4.3 Ensayo de resistencia a la compresión.

La prueba de resistencia a la compresión del concreto se realizó a tres probetas por cada relación agua/cemento para cada tamaño de agregado. En total fueron 9 probetas para cada día de prueba.

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM C39/C39M-04. Utilizando la máquina universal de ensayos marca TREBEL, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas, ver figura 11.

Para el desarrollo de este ensayo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Preparación y acondicionamiento de las probetas
2. Condiciones de humedad
3. Aplicación de carga
4. Toma de datos

Y a continuación se presentan detalles de cada uno de ellos:

1. Preparación y acondicionamiento de las probetas. Como punto de partida fue necesario determinar el diámetro de cada una de las probetas, para luego determinar el área bajo el cual se aplicaba la carga. Posteriormente se niveló con un desbaste superficial las caras opuestas al eje del cilindro a fin de eliminar cualquier irregularidad presente.

2. Condiciones de humedad. Puesto que las probetas fueron curadas por vía húmeda el ensayo de compresión se realizó tan pronto se terminó la prueba de ultrasonido para así evitar una pérdida excesiva de humedad.

3. Aplicación de carga: Tras limpiar las bases de la probeta, ésta se colocó en el equipo alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga, después se bajó la placa superior hacia la probeta con el fin de generar contacto. Luego de colocar la probeta se aplicó la carga con una velocidad uniforme y continua hasta que se produjo la falla en la probeta.

4. Toma de datos. Terminado el ensayo se tomaron datos como: Edad de probeta, características de la probeta, dimensiones, peso final y carga aplicada.

Figura 11. Realización de la prueba de resistencia a la compresión. a) Equipo (maquina universal de ensayos marca TREBEL); b) Disposición de la probeta para la prueba de compresión.



a) Equipo (maquina universal de ensayos marca TREBEL)



b) Disposición de la probeta para la prueba de compresión.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente investigación según lo planteado en la metodología experimental.

4.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO

Con base en el diseño de experimentos planteado, se procedió a la fabricación de las probetas para los diferentes ensayos.

ETAPA 1: Caracterización de la materia prima.

La tabla 6 presenta la caracterización realizada tanto al agregado fino como al agregado grueso de 3/4" y 3/8", mostrándose las principales propiedades físicas de estos.

Tabla 6. Caracterización de los agregados fino, grueso 3/4" y grueso 3/8".

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE AGREGADO		
	Agregado Fino	Agregado Grueso (3/4)	Agregado Grueso (3/8)
Gravedad Especifica Aparente S.S.S	2,65	2,61	2,6
Peso Unitario del Agregado S.S.S. Compactado (Kg/m ³)	1585,55	1503,72	1465,34
Peso Unitario del Agregado S.S.S. Suelto (Kg/m ³)	1401,35	1378,55	1381,51
Porcentaje de Absorción (%)	0,022	1,26	1,58
Porcentaje de Vacíos (%)	40,15	42,39	44,64

Fuente. Los Autores

Al comparar las características presentes tanto en el agregado grueso de 3/4" como en el de 3/8", se observa que no existe una diferencia notoria en los valores de peso específico o gravedad específica entre los dos agregados, por esta razón este parámetro no se puede tener en cuenta para el análisis de los resultados. Por otra parte, tanto el porcentaje de vacíos como el de absorción son más altos para los agregados cuyo tamaño máximo es 3/8" que para aquellos con tamaño máximo 3/4".

En la tabla 7 se muestra el análisis granulométrico realizado al agregado fino y por consiguiente el modulo de finura de la arena con la cual se trabajó en cada una de las 6 mezclas.

Tabla 7. Análisis Granulométrico del agregado fino (Arena proveniente de Pescadero, Santander)

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% PASANTE
4	12,8	1,28	1,28	98,72
8	24,8	2,48	3,76	96,24
16	78	7,8	11,56	88,44
30	223,2	22,32	33,88	66,12
50	354,8	35,48	69,36	30,64
100	197,7	19,77	89,13	10,87
FONDO	108,6	10,86	99,99	0,01
TOTAL	999,9	99,99	PESO MUESTRA	1000 gr
Modulo de finura: 2,09				

Fuente. Los Autores

ETAPA 2: Diseño de mezcla

En las tablas 8 y 9 se presentan las dosificaciones empleadas para la fabricación de 14 probetas para cada una de las mezclas. Se tomo como base de cálculo 1m³ de concreto.

Tabla 8. Dosificación de la mezcla de concreto para un tamaño máximo de agregado grueso de 3/4"

MATERIAL	RELACIÓN AGUA/CEMENTO					
	0,4		0,5		0,6	
(Kg)	Kg	(%)	Kg	(%)	Kg	(%)
Agua	4,928	8,45	4,928	8,5	4,928	8,53
Cemento	12,32	21,13	9,856	16,99	8,21	14,21
Ag. Grueso	25,58	43,88	25,58	44,12	25,58	44,28
Ag. Fino	15,47	26,54	17,62	30,39	19,05	32,98

Tabla 9. Dosificación de la mezcla de concreto para un tamaño máximo de agregado grueso de 3/8"

MATERIAL	RELACIÓN AGUA/CEMENTO					
	0,4		0,5		0,6	
(Kg)	Kg	(%)	Kg	(%)	Kg	(%)
Agua	5,544	9,63	5,544	9,7	5,544	9,74
Cemento	13,87	24,12	11,09	19,41	9,24	16,23
Ag. Grueso	19,15	33,3	19,15	33,51	19,15	33,64
Ag. Fino	18,95	32,95	21,36	37,38	22,99	40,39

Fuente. Los Autores

Al comparar las tablas 8 y 9 se puede observar como las mezclas de concreto con tamaño máximo de 3/4" presentan un contenido mayor de este agregado grueso, lo que sugiere valores de VPU mayores según lo expresado por Malhotra [55]. Esto puede deberse a la menor área superficial que presenta este tamaño de

agregado contrario de lo que ocurre con el agregado de 3/8" cuya área superficial es mayor lo que insinúa valores de VPU menores [56].

Por otra parte, en lo que respecta a la resistencia se podría decir que debido al alto contenido de cemento que presentan los concretos elaborados con tamaño máximo de 3/8", es de esperarse valores altos en esta propiedad mecánica. Sin embargo, es importante señalar que estas mezclas necesitan un contenido mayor de agua debido a que el tamaño máximo de agregado grueso es menor.

ETAPA 3: Elaboración de probetas

La tabla 10 muestra la distribución de las 6 mezclas realizadas por cada tamaño de agregado para las tres relaciones agua/cemento, fabricando en total 84 probetas de las cuales se evaluaron 72.

Tabla 10. Distribución empleada para la realización de las mezclas utilizadas.

Mezcla	Tamaño máximo de Agregado	Relación Agua/Cemento	Número de probetas
1	3/4"	0,4	14
2		0,5	14
3		0,6	14
4	3/8"	0,4	14
5		0,5	14
6		0,6	14
Número de cilindros totales			84

Fuente. Los Autores

ETAPA 4: Proceso de fraguado y Curado

Estos procesos se llevaron a cabo siguiendo lo establecido en la metodología experimental. La figura 12 muestran imágenes de los procesos de fraguado y curado de las mismas.

Figura 12. Proceso de endurecimiento. a) Fraguado realizado por 24 horas. b) Proceso de curado realizado bajo condiciones (100% Humedad y temperatura ambiente)



a) Fraguado realizado por 24 horas.



b) Proceso de curado realizado bajo condiciones (100% Humedad y temperatura ambiente)

4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de: inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.

4.2.1 Inspección visual.

Durante este análisis se tuvo en cuenta cinco factores principalmente:

- Cambios de peso

Al pesar cada probeta se observó que sin importar cual fuera la relación agua/cemento, ni el tamaño máximo de agregado grueso, todas las probetas aumentaban aproximadamente entre 0.03 a 0.050gr en peso durante el tiempo de curado (ver figura 13), este aumento se debe a las condiciones bajo las cuales se realizó esta etapa (humedad del 100%). Además, cabe resaltar que el peso obtenido de las probetas se realizó en estado S.S.S (Superficie Saturada Seca) para poder realizar las pruebas correctamente. Las diferencias de peso se presentan en los anexos C y D.

Figura 13. Pesado de las probetas



- Cálculos dimensionales

A cada una de las probetas elaboradas se les midió el diámetro (ver figura 14), después de extraerlas de la piscina de curado, esto con el fin de determinar el área de aplicación de carga, necesario para los cálculos en la prueba mecánica. Los valores promedios de los diámetros y áreas se presentan en el anexo E y F.

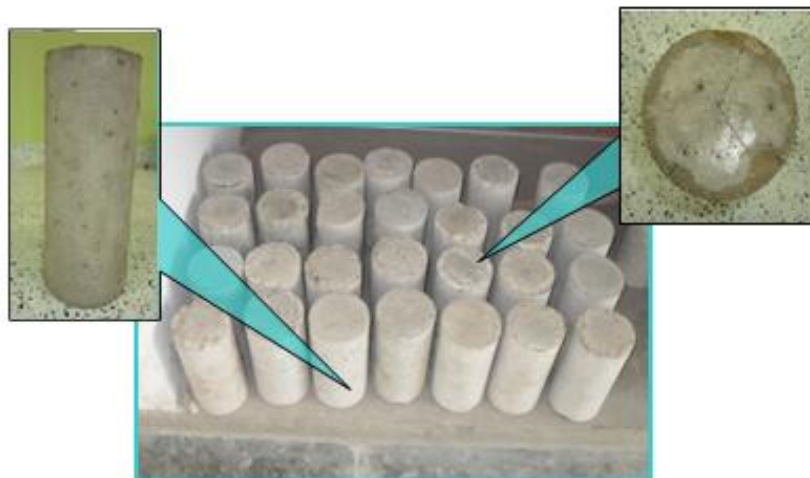
Figura 14. Determinación del diámetro de las probetas.



- Estado superficial

Al observar una a una las probetas se encontró que la mayoría presentaban un estado superficial aceptable en lo que respecta al cuerpo, pero se observó que en las caras paralelas había superficies rugosas y poco uniformes así como descascaramiento. Lo anterior se produjo en el emparejamiento de la mezcla de concreto durante la fabricación de la probeta (ver figura 9b.) y al realizar el proceso de desencofrado de las mismas. Ver figura 15.

Figura 15. Estado superficial de las probetas a ensayar.



Debido a lo anterior, fue necesario lijar estas caras con el fin de obtener superficies homogéneas para las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.

- Grietas

En general, las probetas solo presentaron problemas de tipo superficial aunque en una de ellas se observó una grieta longitudinal que se tuvo en cuenta al momento de realizar la prueba de compresión ya que era de esperarse que la falla se diera en la misma dirección.

- Porosidad superficial

Las figuras 16 y 17 permiten comprobar lo indicado en la bibliografía consultada, pues a medida que aumenta la relación agua/cemento se observó una mayor porosidad superficial, producida por el mayor contenido de agua presente en la mezcla.

Figura 16. Probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/4” para cada una de las relaciones agua/cemento.

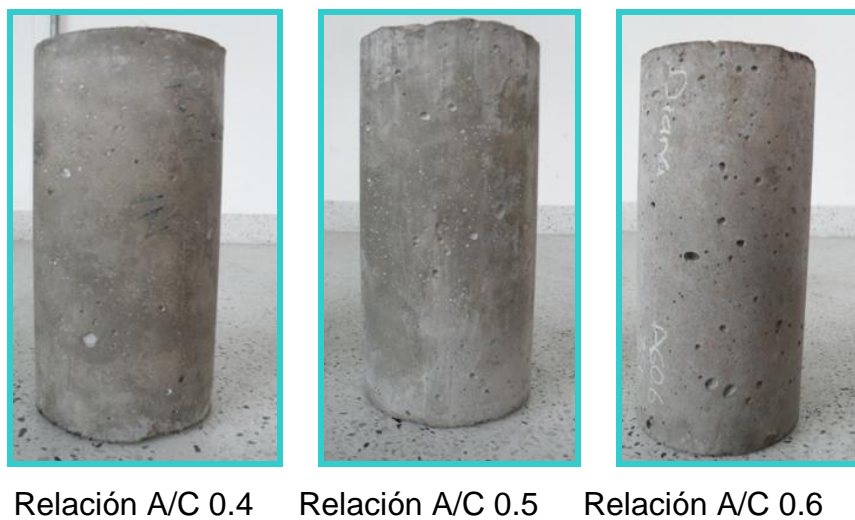


Figura 17. Probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/8" para cada una de las relaciones agua/cemento.



Relación A/C 0.4

Relación A/C 0.5

Relación A/C 0.6

4.2.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

Las tablas 11 y 12 presentan los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico realizada a tres probetas por día (días 7, 14, 21, 28 de curado) para cada relación agua/cemento y dos tamaños de agregado.

A partir de las tablas 11 y 12 se puede observar un aumento en los valores de velocidad de pulso a medida que aumenta el tiempo de curado para cada relación agua/cemento, por otra parte a medida que aumenta esta relación se presenta una disminución en los valores de VPU, lo mismo ocurre tanto en el agregado grueso de 3/4" como en el agregado de 3/8". Lo cual concuerda con la bibliografía consultada.

En cuanto al tamaño de agregado se aprecian mayores valores de VPU para los agregados con tamaño máximo de 3/4", lo cual se encuentra acorde con lo planteado en la sección 4.1 Etapa 2.

En general se podría decir que los valores más altos de velocidad de pulso se consiguieron al trabajar con la mezcla cuyo tamaño máximo de agregado era de 3/4" para una relación agua/cemento de 0.4 y 28 días de curado, el valor de esta velocidad fue 4266.7 m/s.

Tabla 11. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico para muestras de concreto con tamaño máximo de agregado de 3/4".

	TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO 3/4"			
RELACIÓN A/C	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO			
	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
0,4	4091,3	4238,5	4263,16	4266,7
0,5	3963,6	4143,2	4159,21	4247,7
0,6	3716,16	3922,8	4024,8	4098,6

Tabla 12. Resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico para muestras de concreto con tamaño máximo de agregado de 3/8".

	TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO 3/8"			
RELACIÓN A/C	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO			
	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
0,4	3965,5	4036,7	4124,8	4259,1
0,5	3827,31	3946,8	4032,44	4074,22
0,6	3481,9	3624	3747,7	3840,6

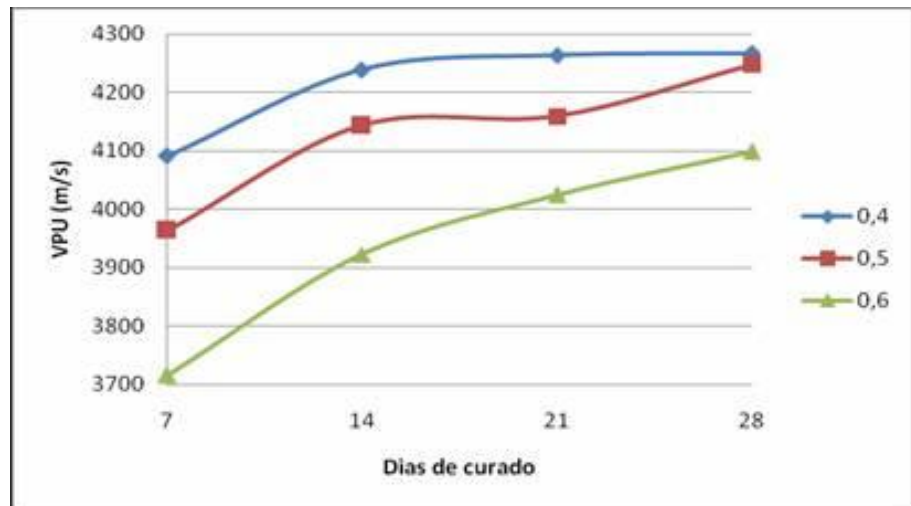
Fuente. Los Autores

Los gráficos 1 y 2 presentan la evolución de la VPU para diferentes relaciones agua/cemento a lo largo de tiempo de curado. De estas figuras se puede observar que a medida que disminuye la relación A/C, la magnitud de la VPU aumenta de forma representativa tanto para el agregado de 3/4" como para el agregado de 3/8". Lo anterior puede explicarse a través del peso unitario (masa/volumen) del

concreto, variable que afecta directamente las medidas de velocidad [57], dado que un peso unitario alto producido por una relación A/C menor permitiría un desplazamiento más adecuado de la onda ultrasónica generando un ascenso en las medidas de velocidad.

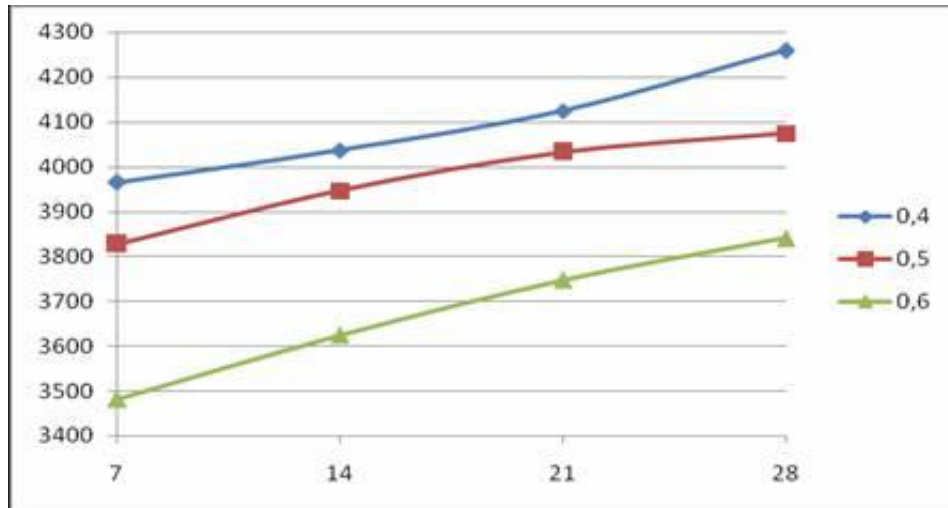
De igual manera se observa que la VPU presenta un incremento importante en los primeros catorce días de curado. A edades mayores a catorce días, la pendiente de la curva disminuye hasta aproximadamente los 28 días. En el rango entre 21 y 28 días, la pendiente de la curva tiende a estabilizarse indicando que el incremento de la velocidad de pulso ultrasónico para cualquiera de las mezclas de concreto ya no es significativo.

Gráfico 1. Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/4".



Fuente. Los Autores

Gráfico 2. Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/8".



Fuente. Los Autores

Los gráficos 3, 4 y 5 presentan la evolución de la VPU a lo largo del tiempo de curado, para mezclas de concreto realizadas con diferente tamaño máximo de agregado. Estos gráficos muestran un VPU menor para aquellos concretos fabricados con tamaño máximo de agregado de 3/8" sin importar cual sea la relación agua/cemento, esto comprueba lo indicado en la sección anterior, la cual muestra como este tamaño de agregado presenta un alto porcentaje de vacíos y mayor área superficial lo que produce dispersión en la energía de propagación de la onda ultrasónica, obteniéndose valores de VPU menores que los presentados por los concretos fabricados con tamaño máximo de 3/4".

Grafico 3. Valores de velocidad de pulso ultrasónico para concretos con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.4

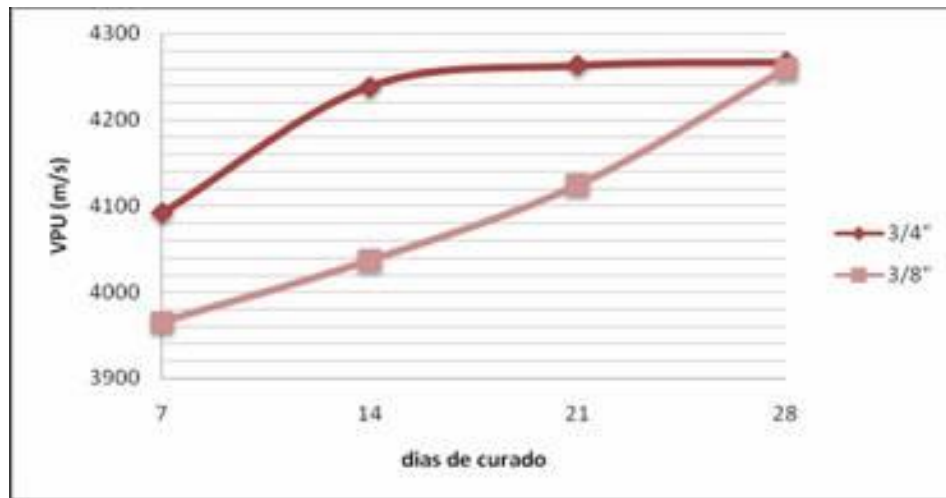
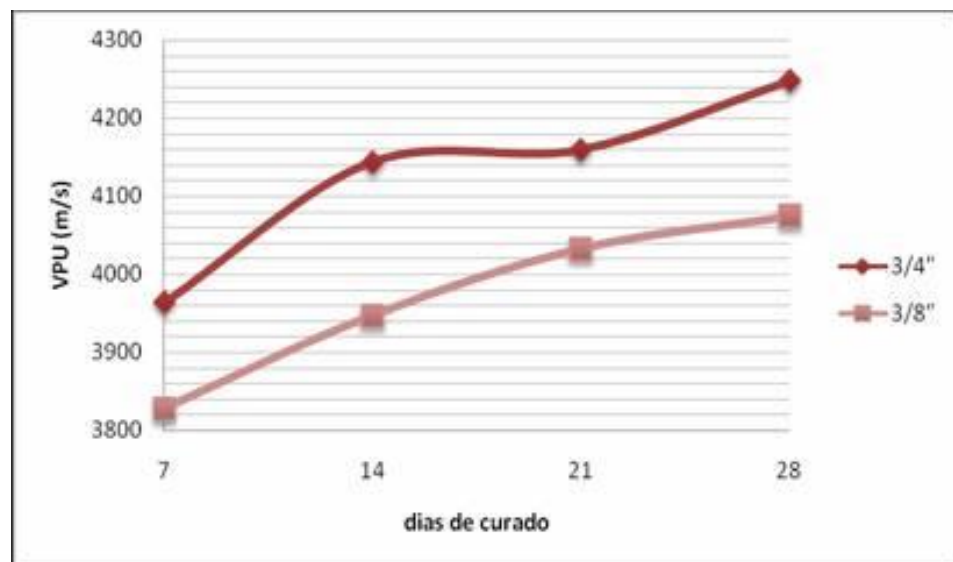
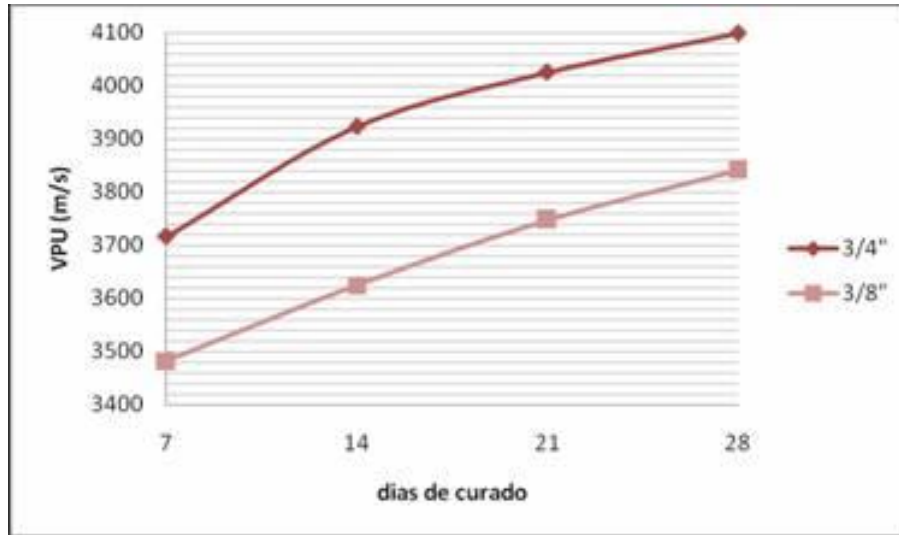


Grafico 4. Valores de velocidad de pulso ultrasónico para concretos con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.5



Fuente. Los Autores

Grafico 5. Valores de velocidad de pulso ultrasónico para concretos con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.6

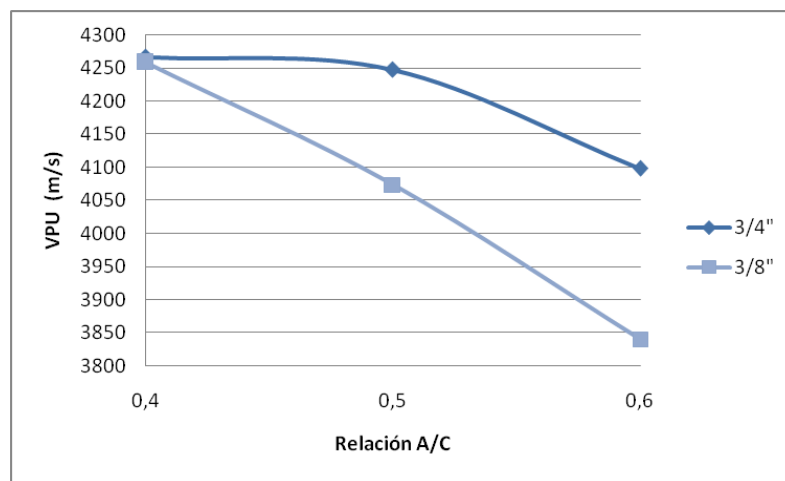


Fuente. Los Autores

En el grafico 6 se presenta la variación de la velocidad de pulso ultrasónico a 28 días de curado para cada una de las relaciones agua/cemento según el tamaño máximo de agregado. En este gráfico así como en los gráficos 3,4 y 5 se puede observar como el efecto del tamaño de agregado sobre la técnica es altamente pronunciado, dado que para relaciones a/c mayores los valores de velocidad de pulso para cada uno de los agregados varían en gran proporción, el factor que se cree generó estos cambios es la variación de las propiedades físicas de cada uno de los agregados y la estrecha relación que existe entre estas propiedades con el contenido de agua presente en la mezcla. El aumento en la cantidad de agua para concretos fabricados con tamaño máximo de 3/8", generó la formación de vacíos que obstaculizaron el paso de la onda producto del agua en exceso que no participó de las reacciones de hidratación. Por otra parte y en lo que refiere a los valores obtenidos de velocidad de pulso para los concretos con relación agua/cemento 0.4, se podría decir que aunque era de esperarse un diferencia relativamente alta entre los valores de velocidad para cada uno de los tamaños, el

contenido de agua presente en la mezcla con agregado cuyo tamaño máximo era menor logró reaccionar completamente con el cemento lo que evitó la formación de estos vacíos que generaban cambios representativos en la trayectoria de la onda.

Grafico 6. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico con la relación a/c en concretos con tamaños máximos de 3/4" y 3/8" a 28 días de curado



Fuente. Los Autores

En general el concreto fabricado y curado bajo las condiciones de esta investigación se puede clasificar como de buena calidad según la tabla 3, lo que sugiere que los datos obtenidos a partir de él son totalmente veraces y pueden ser herramienta de análisis.

4.2.3 Ensayo de resistencia a la compresión.

Las tablas 13 y 14 presentan los resultados obtenidos de resistencia a la compresión realizados a tres probetas por día para cada relación agua/cemento y dos tamaños de agregado los días 7, 14, 21 y 28 respectivamente.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (MPa), calculándolos de la siguiente ecuación.

$$\sigma = F/A$$

Ecuación 2

Donde, σ es el esfuerzo en el concreto, F es la fuerza aplicada y A es el área de la probeta en estudio.

A partir de las tablas 13 y 14 se puede observar un aumento en los valores de resistencia a la compresión a medida que aumenta el tiempo de curado para cada relación agua/cemento. Por otra parte, a medida que aumenta esta relación se presenta una disminución en los valores de resistencia, lo mismo ocurre tanto en el agregado grueso de 3/4" como en el agregado de 3/8".

Tabla 13. Registro de resistencia a la compresión para un concretos con tamaño máximo de agregado de 3/4"

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO 3/4"				
RELACIÓN A/C	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
	7	14	21	28
0,4	24,623	29,99	31,764	33,494
0,5	15,694	19,724	24,633	27,246
0,6	11,513	12,131	15,966	16,941

Tabla 14. Resultados de resistencia a la compresión para concretos con tamaño máximo de agregado de 3/8"

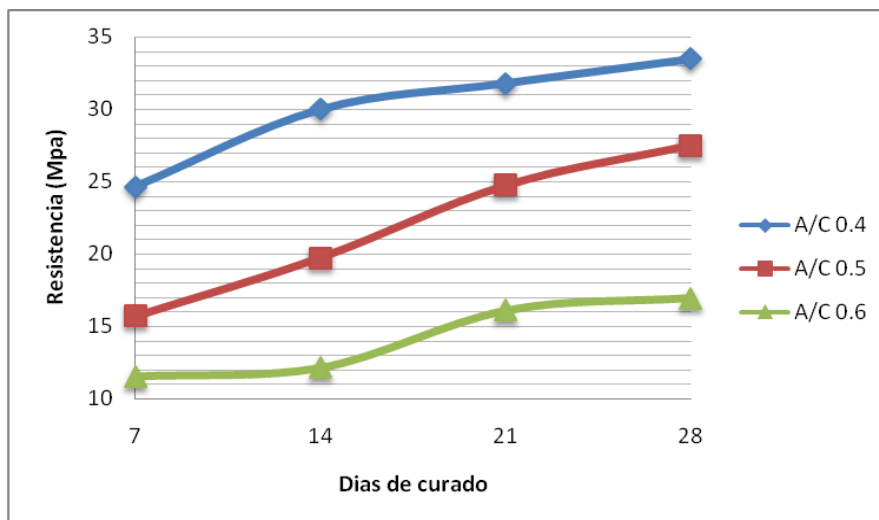
TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO 3/8"				
RELACIÓN A/C	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
	7	14	21	28
0,4	23,843	31,041	33,412	33,883
0,5	16,585	20,826	23,694	27,374
0,6	9,379	11,787	13,875	16,138

Fuente. Los Autores

Al comparar las tablas anteriormente mencionadas, la resistencia a la compresión máxima alcanzada a los 28 días fue de 33.88 MPa y se obtuvo en la mezcla de concreto con relación A/C de 0.4 para un tamaño máximo de agregado de 3/8”.

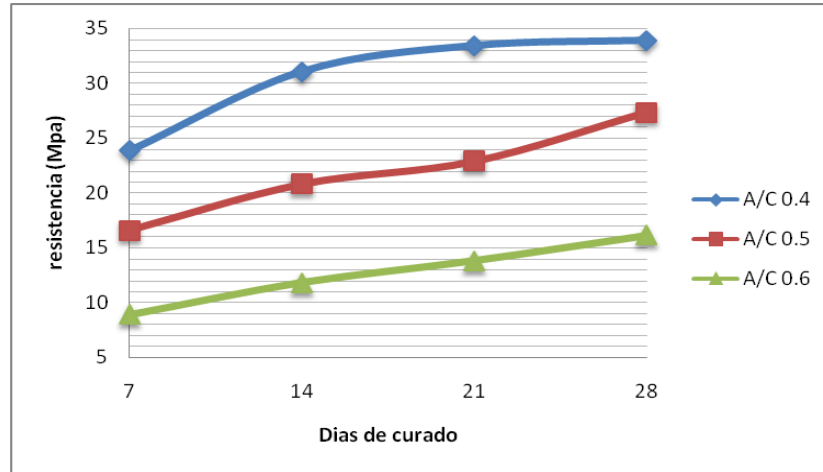
Las graficas 7 y 8 muestran el incremento de la resistencia a la compresión del concreto a medida que transcurren los días de curado, esto se debe a durante este lapso de tiempo las reacciones de hidratación se van completando permitiendo que el concreto desarrolle en sus propiedades mecánicas. Además cabe resaltar que al realizar un curado húmedo se producen las condiciones más favorables para que estas propiedades sean óptimas [58].

Grafico 7. Desarrollo de la resistencia a la compresión de un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/4” a diferentes edades.



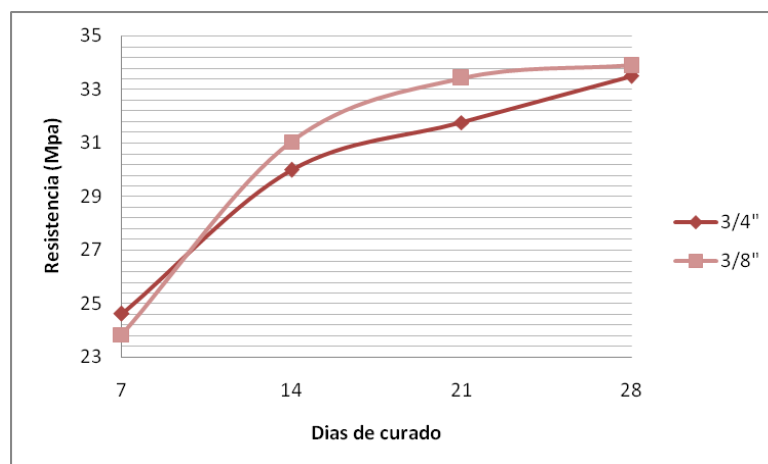
Fuente. Los Autores

Grafico 8. Desarrollo de la resistencia a la compresión de un concreto con tamaño máximo de agregado de 3/8" a diferentes edades.



Los gráficos 9 a 11, presentan el efecto derivado del cambio en el tamaño máximo del agregado sobre la resistencia a la compresión. Se observa que la variación en resistencia entre los tamaños es muy ligera durante el tiempo de curado.

Grafico 9. Valores de resistencia a la compresión para concretos fabricados con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento 0.4



Fuente. Los Autores

Grafico 10. Valores de resistencia a la compresión para concretos fabricados con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.5

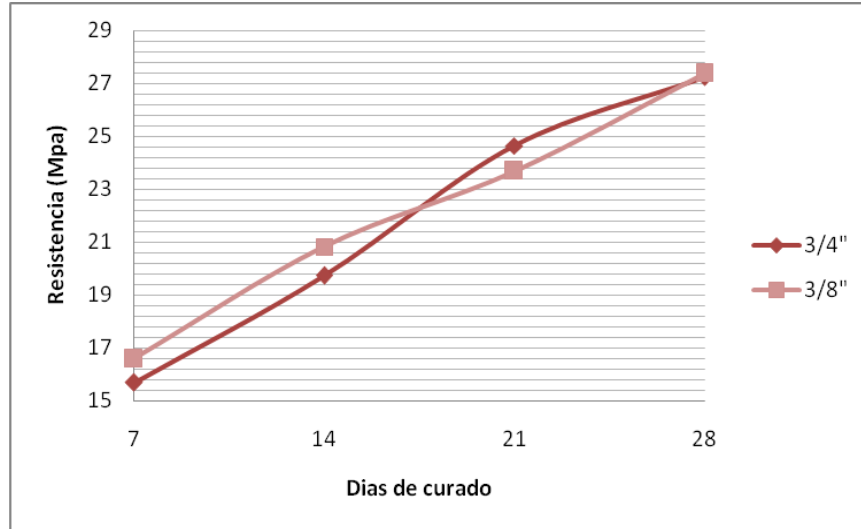
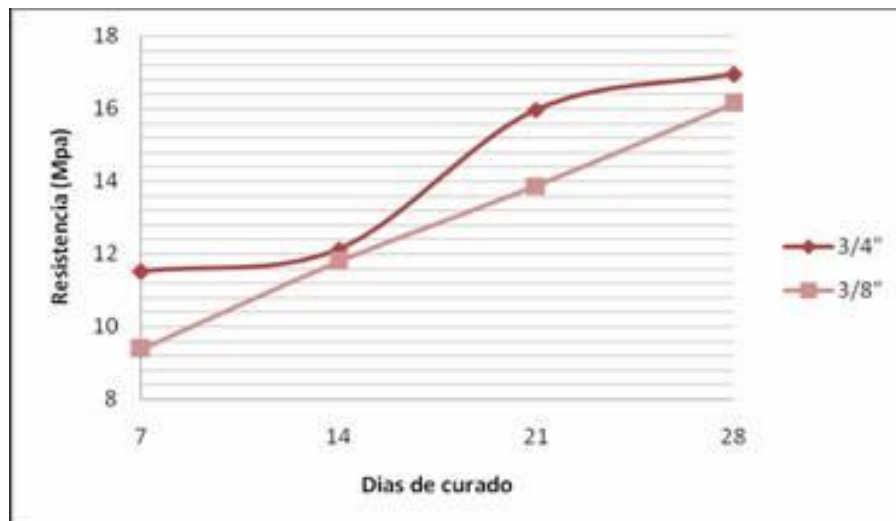


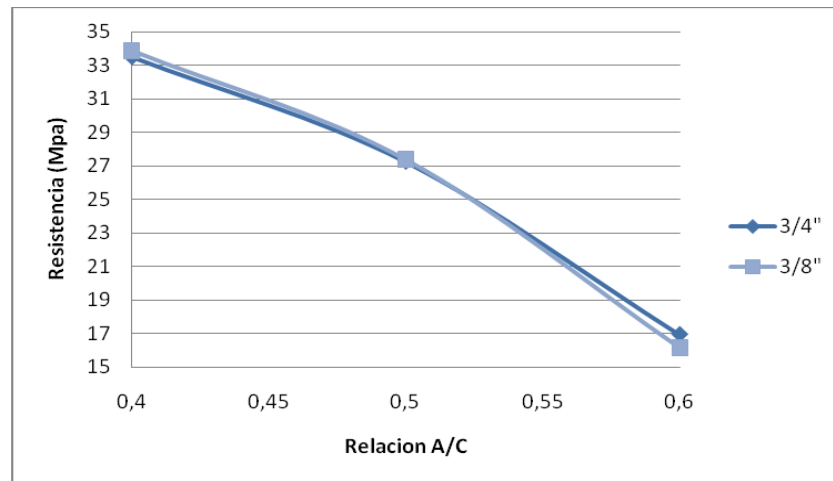
Grafico 11. Valores de resistencia a la compresión para concretos fabricados con diferentes tamaños máximos de agregado y relación agua/cemento de 0.6



Fuente. Los Autores

En el grafico 12 se presenta la variación de la resistencia a la compresión a 28 días de curado para cada una de las relaciones agua/cemento según el tamaño máximo de agregado. En este gráfico así como en los gráficos 9,10 y 11 se puede observar como el tamaño máximo de agregado para esta investigación no tiene un efecto pronunciado sobre los resultados obtenidos del ensayo destructivo debido a que como se muestra en el gráfico los dos tamaños de agregado grueso ($3/4''$ y $3/8''$) muestra un comportamiento ligeramente similar. Esto puede deberse a que no existe una diferencia significativa entre los dos tamaños máximo de agregado grueso utilizados [59]. Además de lo anterior, la similitud en los valores de resistencia puede deberse a que existió una compensación, en las mezclas utilizadas, entre los factores analizados que influyen en la resistencia tales son: tamaño y cantidad de agregado grueso, porcentaje de vacíos y material cementante.

Grafico 12. Variación de la resistencia a la compresión con la relación a/c en concretos con tamaños máximos de $3/4''$ y $3/8''$ a los 28 días de curado



Fuente. Los Autores

Es importante aclarar que durante la prueba de compresión, las líneas de falla generadas en las probetas se presentaron como líneas inclinadas alrededor del

eje de aplicación de carga, esto se debe principalmente a la fuerza que ejercían las dos bases del equipo limitando el movimiento de la probeta en el eje y. Este tipo de falla se puede observar en la figura 18.

Figura 18. Falla presentada por las probetas después de realizar la prueba de compresión.



4.3 CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

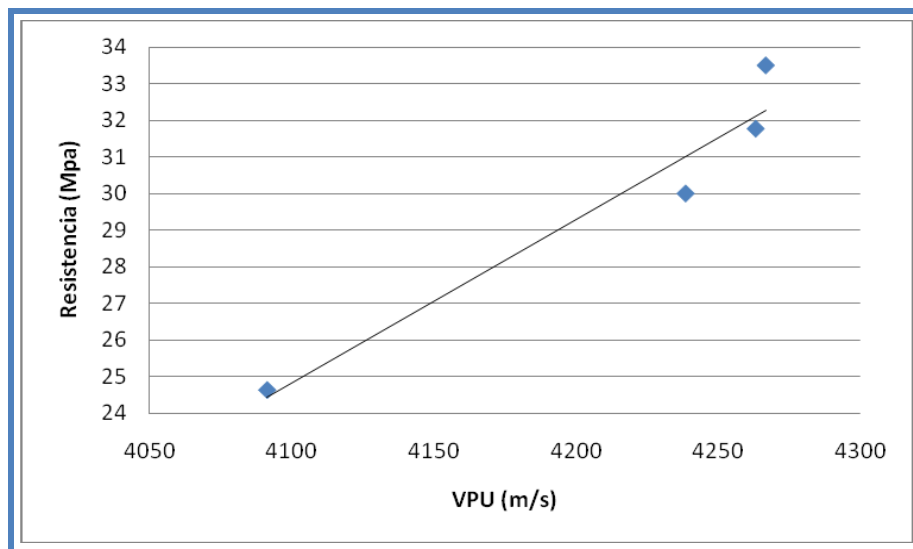
En las graficas 13 a la 18 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la compresión versus los valores de velocidad de pulso ultrasónico. Las ecuaciones presentadas a continuación se ajustan a un modelo matemático lineal debido al alto grado de correlación conseguido para el intervalo de datos manejados. Donde X representa las medidas de velocidad de pulso ultrasónico (m/s) y Y representa la resistencia a la compresión (MPa), las tablas de esta correlación se encuentran en el anexo G.

- En el gráfico 13, se relaciona la VPU versus la resistencia a la compresión, presenta los datos experimentales y la curva de ajuste lineal obtenida, el coeficiente de R^2 fue 0,9392, a partir de la siguiente ecuación:

$$y = 0,0446x - 158,16$$

Ecuación 3

Grafica 13. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,4 y tamaño máximo de agregado 3/4"



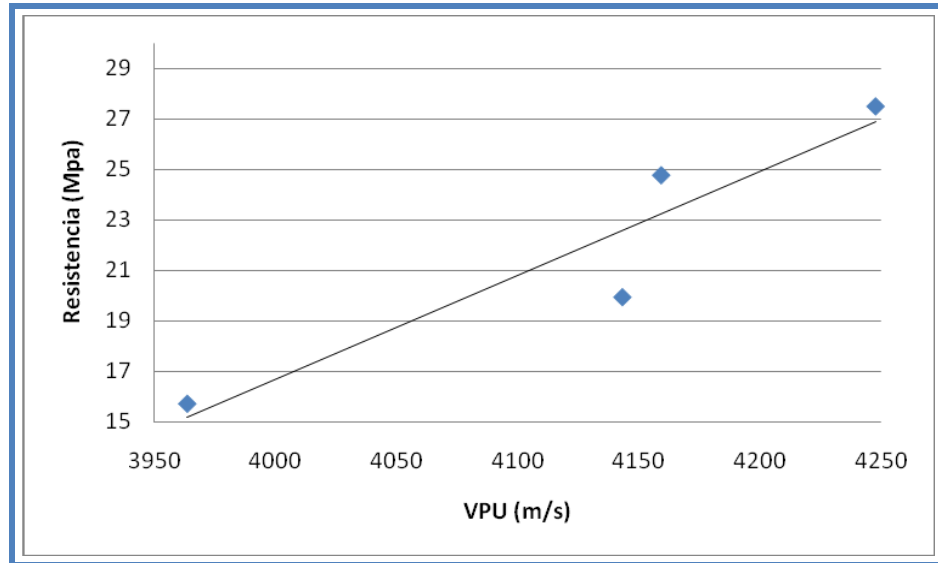
Fuente. Los Autores

- En el gráfico 14 se obtuvo un coeficiente de correlación de ($R^2 = 0,8658$), para un concreto con relación agua/cemento de 0.5 y tamaño máximo de agregado de 3/4". Este valor muestra la estrecha relación que existe entre las dos variables por medio de la siguiente ecuación:

$$y = 0,041x - 147,4$$

Ecuación 4

Grafica 14 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,5 y tamaño máximo de agregado 3/4"



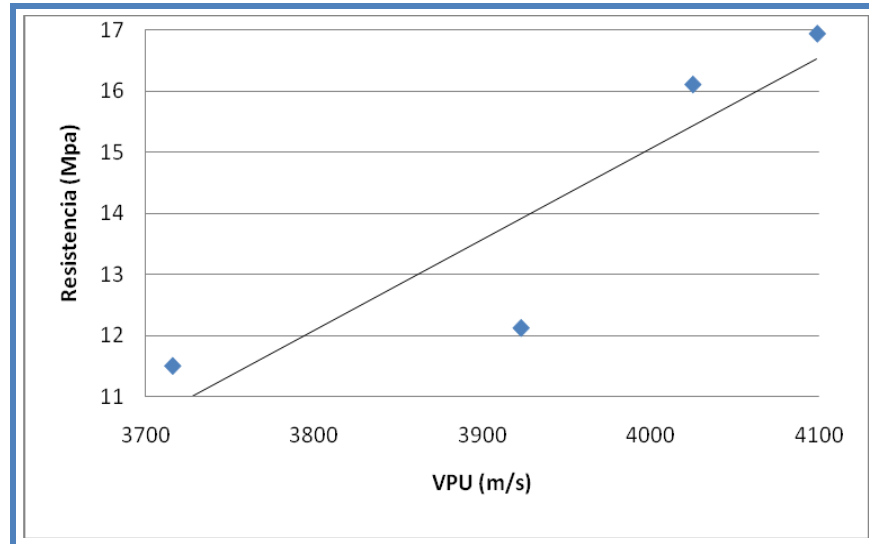
Fuente. Los Autores

- Para el gráfico 15 se encontró un coeficiente de correlación de ($R^2 = 0,8121$), lo cual sugiere que es posible conocer los valores de resistencia a la compresión mediante la siguiente ecuación a través de valores conocidos de velocidad de pulso ultrasónico para las mismas condiciones.

$$y = 0,0149x - 44,611$$

Ecuación 5

Grafica 15 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,6 y tamaño máximo de agregado 3/4"

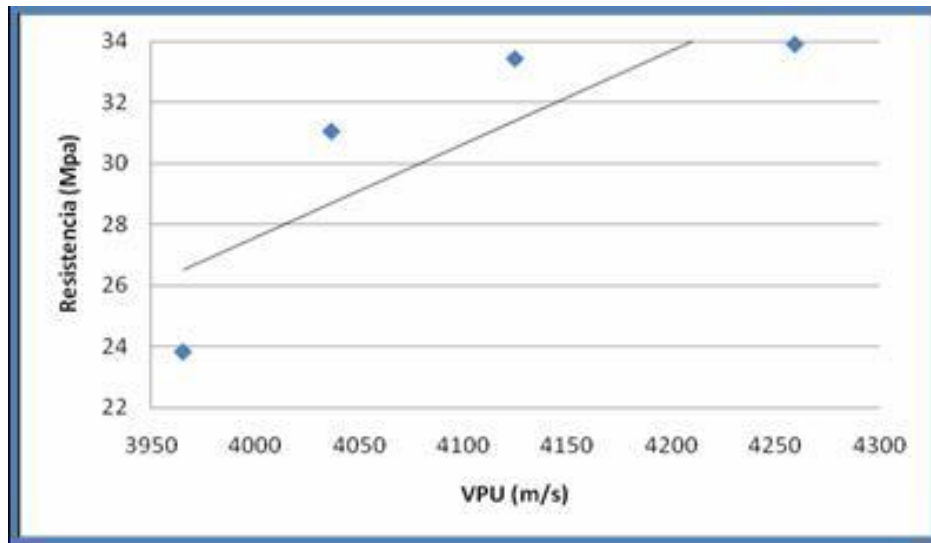


- En el gráfico 16 se obtuvo un coeficiente de correlación de ($R^2= 0.71$), a partir de la ecuación siguiente, cabe resaltar que este coeficiente es el más bajo a comparación de las otras mezclas estudiadas, por lo tanto, se podría decir que los valores obtenidos a partir de esta formula no son del todo confiable pero se pueden utilizar considerando un porcentaje de error.

$$y = 0,0307x - 95,154$$

Ecuación 6

Grafica 16. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,4 y tamaño máximo de agregado 3/8"



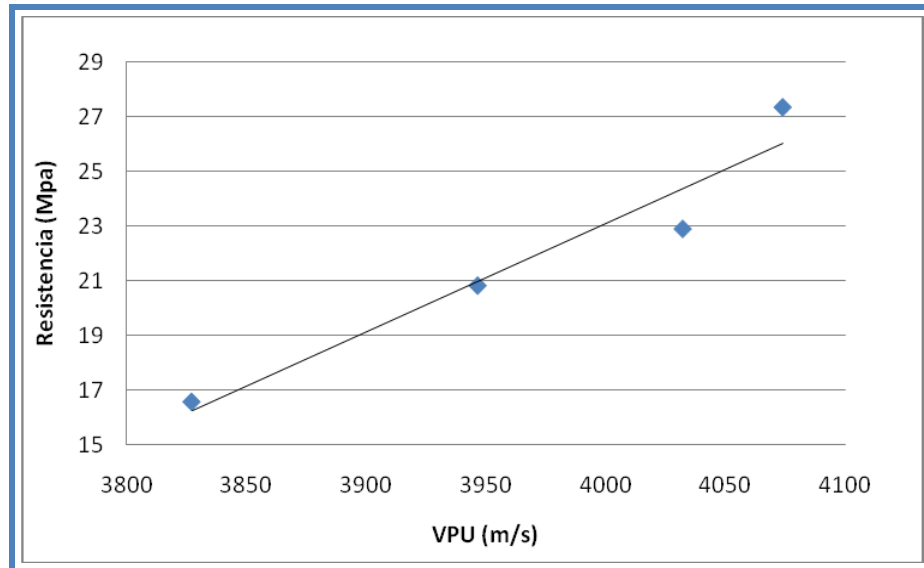
Fuente. Los Autores

- En el gráfico 17, se obtuvo un coeficiente de correlación de ($R^2 = 0,9327$), lo que confirma que es posible determinar la resistencia a la compresión del concreto a varias edades para una relación agua/cemento de 0.5 y tamaño máximo de agregado de 3/8", mediante el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico. Para tal efecto se puede utilizar la siguiente expresión.

$$y = 0,0396x - 135,29$$

Ecuación 7

Grafica 17. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,5 y tamaño máximo de agregado 3/8"



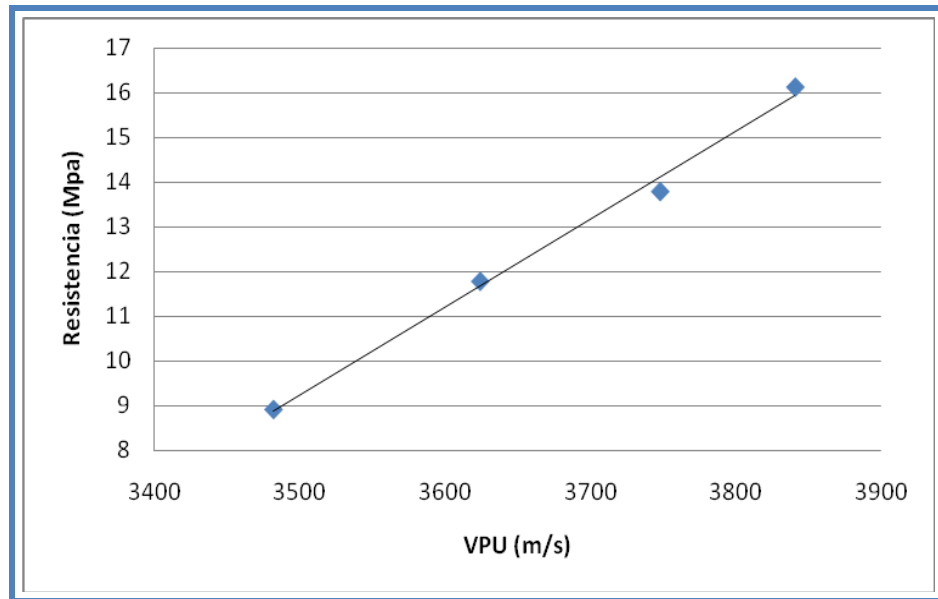
Fuente. Los Autores

- En el gráfico 18 se obtuvo un coeficiente de correlación de ($R^2 = 0,9946$), para un concreto con relación agua/cemento de 0.6 y tamaño máximo de agregado de 3/8". Es importante reconocer que este es el coeficiente más alto a comparación de las otras mezclas, por lo tanto los valores sugeridos de resistencia a partir de la siguiente ecuación son altamente confiables.

$$y = 0,0196x - 59,501$$

Ecuación 8

Grafica 18. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades en concreto con relación A/C de 0,6 y tamaño máximo de agregado 3/8"



Fuente. Los Autores

En general se podría decir que se obtuvieron altos coeficientes de correlación lo que confirma que es posible determinar la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades de curado a partir del uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Después de realizar las pruebas y recopilar los datos para cada una de las variables estudiadas, se realizó el análisis estadístico a fin de comprobar la veracidad de los resultados obtenidos así como la interacción entre las variables y la influencia de las mismas sobre la técnica de ultrasonido y resistencia a la compresión.

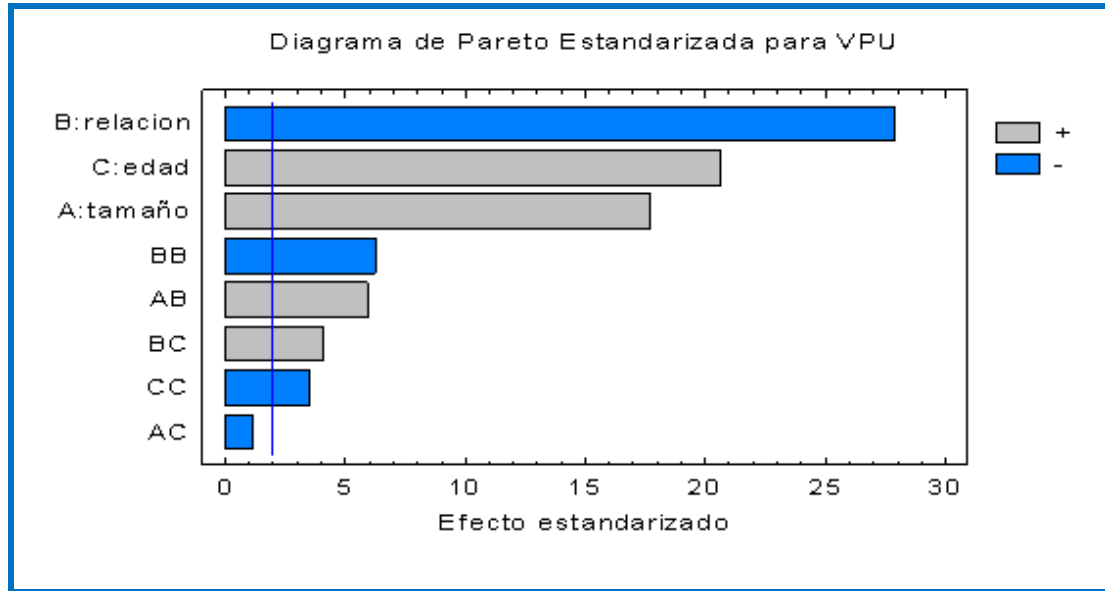
Este análisis se realizó con el paquete estadístico STATGRAPHICS obteniendo a partir de él los diagramas de Pareto y gráficas de Efectos Principales.

4.4.1 Análisis del diagrama de Pareto y Efectos principales para la velocidad de pulso ultrasónico.

Las graficas 19 y 20, muestra de forma ordenada cuales son las principales variables que afecta la técnica no destructiva, en que magnitud y cuál es su influencia.

Al analizar la gráfica 19 se puede concluir que de las tres variables estudiadas, la relación agua/cemento es la de mayor influencia sobre la VPU y que su efecto es negativo, lo cual era de esperarse ya que como se presentó en los resultados a medida que aumenta la relación A/C disminuye la velocidad. Por otra parte, se observa que tanto el tamaño máximo de agregado grueso como el tiempo de curado tienen un efecto positivo sobre la técnica, es decir, al trabajar con tamaños máximos mayores a medida que aumenta el tiempo de curado la velocidad de pulso va aumentar. Este comportamiento se puede observar también en los gráficos 3, 4 y 5 del análisis de resultados.

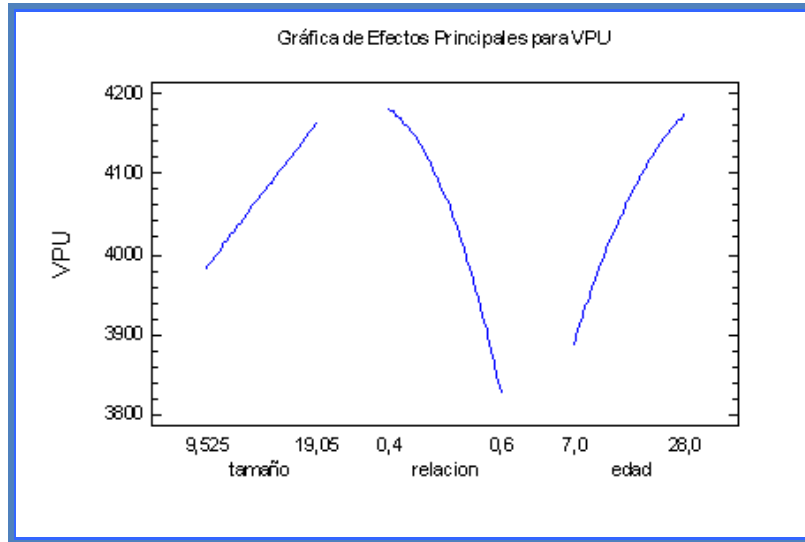
Grafica 19. Interacción entre las variables (Diagrama de Pareto Estandarizado) para las mediciones de Velocidad de Pulso Ultrasónico.



Fuente. Los Autores

Con la grafica 20 de efectos principales se comprueba el comportamiento de estas variables puesto que la gran pendiente negativa indica el efecto negativo de la relación A/C sobre la velocidad y las pendientes positivas tanto de la variable tamaño máximo de agregado como tiempo de curado presentan el efecto positivo de cada una de ellas sobre la técnica. Además en el anexo H Se presenta la interacción entre cada una de estas variables.

Grafica 20. Gráfico de Efectos Principales (tamaño de agregado, relación agua cemento y tiempo de curado) para las mediciones de Velocidad de Pulso Ultrasónico.



Fuente. Los Autores

4.4.1.1 Correlación matemática. La siguiente expresión es la ecuación ajustada conocida como polinomio respuesta, la cual relaciona la variable respuesta (Velocidad de Pulso Ultrasónico) en función de las tres variables principales (tamaño máximo de agregado, tiempo de curado y relación agua/cemento) y sus interacciones. El coeficiente de correlación para esta ecuación es $R^2=0.95919$.

La ecuación del modelo ajustado por el paquete estadístico STATGRAPHICS es:

$$\text{VPU (m/s)} = 3432,42 - (17,1351 \cdot T) + (3352,36 \cdot R) + (12,067 \cdot E) + (78,0267 \cdot T \cdot R) - (0,162971 \cdot T \cdot E) - (6791,02 \cdot R^2) + (33,1815 \cdot R \cdot E) - (0,366981 \cdot E^2)$$

Ecuación 9

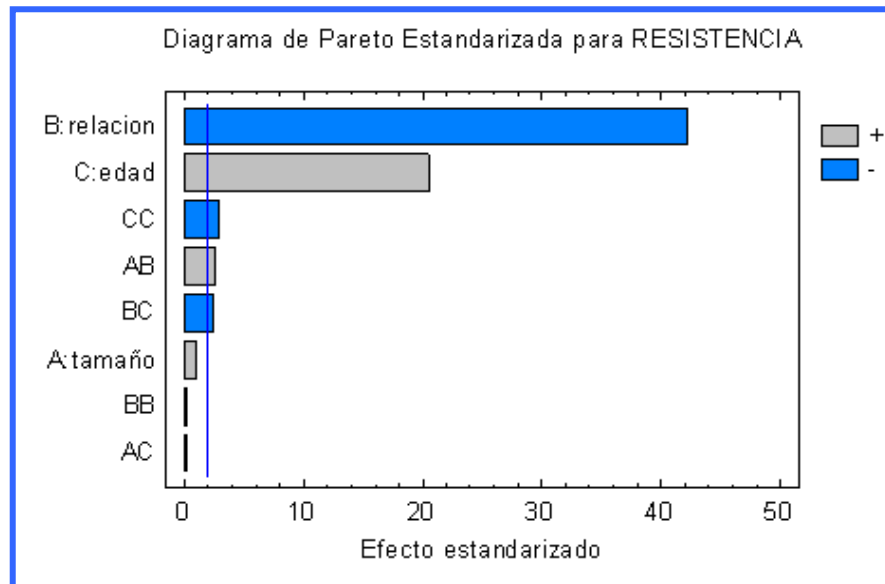
Donde: T: tamaño máximo de agregado (mm)
R: relación agua/cemento
E: edad de curado (días)

4.4.2. Análisis del diagrama de Pareto y Efectos principales sobre la Resistencia a la Compresión.

Los graficas 21 y 22, muestra de forma ordenada cuales son las principales variables que afecta la técnica destructiva, en que magnitud y cuál es su influencia.

La grafica 21 describe lo planteado en la sección 4.2.3 Del presente capitulo, pues muestra como la relación agua/cemento aunque afecta de forma negativa es la variable con mayor influencia sobre la resistencia a la compresión. Esto comprueba lo observado en lo gráfico 12, donde se tiene un descenso en la resistencia a medida que aumenta la relación A/C. Por otra parte, este diagrama señala el efecto positivo sobre esta propiedad mecánica por parte del tiempo de curado, observado en los gráficos 7 y 8. Ya que a medida que la edad aumenta la resistencia también lo hace.

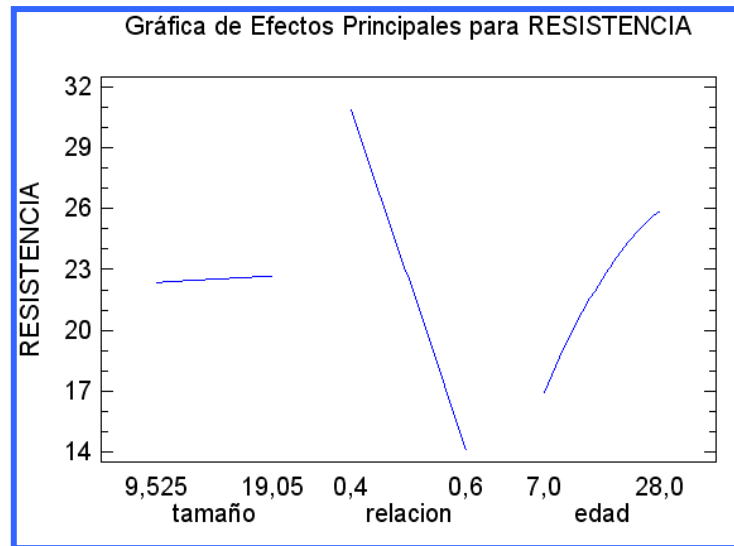
Grafica 21. Interacción entre las variables (Diagrama de Pareto Estandarizado) para el ensayo de Resistencia a la Compresión (MPA)



Fuente. Los Autores

Sin embargo, cabe resaltar que contrario a lo que ocurre con la velocidad de pulso ultrasónico, variables como el tamaño máximo de agregado y sus interacciones no tiene mayor influencia sobre la resistencia. En la gráfica de Efectos principales (ver grafica 22), se comprueba lo anterior al obtener para el tamaño máximo de agregado un valor de pendiente cercano a cero, contrario es lo que ocurre con las variables: relación agua/cemento y tiempo de curado, donde se tienen pendientes altamente pronunciadas.

Grafica 22. Gráfico de Efectos Principales (tamaño de agregado, relación agua cemento y tiempo de curado) sobre el ensayo de Resistencia a la Compresión



Fuente. Los Autores

En el anexo I se puede observar las gráficas de interacción de las variables para la resistencia a la compresión.

4.4.2.1 Correlación matemática. La expresión 10 es la ecuación ajustada conocida como polinomio respuesta, la cual relaciona la variable respuesta (Resistencia a la compresión) en función de las tres variables principales (tamaño

máximo de agregado, tiempo de curado y relación agua/cemento) y sus interacciones. El coeficiente de correlación para esta ecuación es $R^2=0.96985$.

El polinomio respuesta para la resistencia a la compresión es el siguiente:

$$\text{RESISTENCIA (MPa)} = 54,111 - (0,505732*T) - (81,7457*R) + (1,08963*E) + (1,10285*T*R) - (0,000699666*T*E) - (7,64573*R^2) - (0,60397*R*E) - (0,0100062*E^2)$$

Ecuación 10

Donde: T: tamaño Max de agregado (mm)
 R: relación agua/cemento
 E: edad de curado (días)

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente en concretos sin refuerzo elaborados según las variables planteadas en este proyecto y curados bajo condiciones estándar se puede concluir que:

Al interpretar los valores de VPU para las diferentes relaciones agua/cemento se encontró que a medida que aumentaba esta relación los valores de VPU eran menores tanto para el agregado grueso de 3/4" como para el agregado de 3/8". Lo anterior puede explicarse por la mayor cantidad de agua con relación a la cantidad de cemento presente en la mezcla, lo cual se traduce en mayor tiempo de recorrido del haz sonoro ya que el agua sobrante (agua que no participa de las reacciones de hidratación) permitiría la formación de vacíos los cuales obstaculizan el viaje de la onda ultrasónica. Comportamiento similar ocurre para los valores obtenidos de resistencia a la compresión.

En lo referente al tiempo de curado estudiado en la presente investigación se puede concluir que a partir del día 7 se tiene un aumento significativo en las medidas de velocidad alcanzado el valor mayor el día 28. De manera similar es el comportamiento de la resistencia a la compresión con respecto a esta variable, lo cual se debe principalmente a que las reacciones de hidratación se han ido completando, lo que permite el desarrollo de las propiedades del material.

Se observó que el cambio en el tamaño máximo de agregado modifica los valores de velocidad dado que tamaños máximos menores presentan mayor área superficial lo que produce valores de VPU menores debido al aumento en los tiempos de vuelo.

No se encontró un efecto significativo por parte del tamaño máximo de agregado sobre la resistencia a la compresión. La similitud entre los valores obtenidos para

los dos tamaño de agregado grueso puede deberse a una compensación entre los factores analizados, como son: tamaño y cantidad de agregado grueso, porcentaje de vacíos y material cementante. Esto concuerda con lo esperado ya que el diseño de mezcla se realizó para obtener la misma resistencia.

Según el análisis estadístico de las tres variables estudiadas, la relación agua/cemento es la única cuyo efecto es negativo y además presenta la mayor influencia sobre la velocidad de pulso ultrasónico, pues un aumento en esta relación produce un descenso en los valores obtenidos de velocidad. Por otra parte, tanto la edad de curado como el cambio en el tamaño máximo de agregado tienen un efecto positivo debido a que se obtienen valores mayores de velocidad en concretos cuyo tamaño máximo sea de 3/4" a una edad de 28 días.

Puesto que de estudios anteriores se ha clasificado el concreto según su calidad a partir de la VPU, es de gran ayuda conocer cual es el efecto de variables como: la relación agua/cemento, el tamaño máximo de agregado y el tiempo de curado sobre esta técnica, ya que si se conocen cuales son las condiciones más favorables en el diseño se puede obtener un concreto cuya clasificación sea la más alta en cuanto calidad.

6. RECOMENDACIONES

Al término del presente trabajo se recomienda lo siguiente:

Utilizar una dosificación de acuerdo a la resistencia propuesta inicialmente para cada una de las mezclas de concreto a estudiar, manteniendo las proporciones estables de los materiales no estudiados y generando variación en aquellos parámetros a analizar, esto con el fin de evitar cambios en el ensayo no destructivo generados por elementos independientes de la investigación.

Utilizar el ensayo de porosidad en las probetas de concreto como prueba paralela a la VPU y resistencia a la compresión, lo que permitiría un mejor análisis en los resultados y mayores posibilidades de conocimiento en el comportamiento de la técnica.

Por ultimo, es necesario complementar la investigación en el campo de los ensayos no destructivos, al considerar variables tales como: uso de refuerzo, otras condiciones de curado, empleo de aditivos y adiciones, modificación del modulo de finura del agregado fino, logrando así determinar el comportamiento de la VPU ante diferentes parámetros.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SOLÍS R; MORENO Erick. y R William. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Universidad Autónoma de Yucatán, México. Revista técnica de ingeniería. Vol. 8, no. 002. (2004). p. 41-42.
- [2] NAWY G. Edward. Concrete Constrution Enginnering Handbook. Taylor and Francis Group. Second edition. 2008. p. 21-5; 21-16.
- [3] MALHOTRA V. M. Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Septiembre, 2002. p. 110
- [4] 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. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Venezuela. Vol. 26, no. 1. (2003). p. 44-55.
- [5] SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Tercera Edición. Bogotá: Bhandar Editores LTDA. 1996. p. 19-24.
- [6] KUMAR MEHTA P; MONTEIRO Paulo J.M. Concrete. Microstructure, Propertis and Materials. Tercera edición. McGraw- Hill. 2006. p. 10-15.
- [7] FUNDAMENTOS DEL CONCRETO. < Disponible en: www.arqhys.com/fundamentosconcreto.html > Visitado en abril del 2010.
- [8] SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 22.
- [9] Ibid., p. 27
- [10] DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO. < Disponible en: <http://www.destinourbe.com/breve-descripcion-del-proceso-de-fabricacion-del-cemento.html> > Visitado en mayo del 2010.
- [11]____. ASTM C 150- 04 (2004). Standard specification for Portland Cement. United States. ASTM international - American Society for Testing and Materials.

- [12] EL AGUA DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/EI%20Agua%20del%20Concreto> >
Visitado en mayo de 2010.
- [13]____. ASTM C 94/C 94M – 09: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM - American Society for Testing and Materials.
- [14] Diseño y Control de Mezclas de Concreto—1ª Edición, 2004, Capítulo 5, páginas de 103- 134.
- [15] P. KUMAR MEHTA, Op. cit. 254
- [16] MATERIALES Y DOSIFICACIÓN <Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/diaz_m_f/capitulo2.pdf >
Visitado en mayo de 2010
- [17] CHAN YAM, José Luís. Solís Carcaño. Moreno, Eric Iván. “Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto” Chan J., et. al. / Ingeniería 7-2 (2003) p. 39-46
- [18] SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero, Op.,. Cit., p. 96 – 97.
- [19] SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología y Propiedades. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004. p. 92.
- [20]____. NTC 77 (1995). Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis granulométrico. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [21]____. NTC 78 (1995). Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [22]____. NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [23]____. NTC 176 (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [24]____. NTC 237 (1995). Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC - Norma Técnica Colombiana.

- [25]** MEZCLAS DE CONCRETO < Disponible en: <http://www.arqhys.com/contenidos/mezcla-concreto.html> > Visitado en mayo de 2010.
- [26]** SAMUEL, Laura Huanca. Diseño de Mezclas de Concreto. Puno – Perú: Universidad Nacional del Altiplano. Marzo 2006. p. 13.
- [27]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 226 – 240.
- [28]** FRAGUADO DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html> > Visitado en mayo de 2010.
- [29]** EL CONCRETO EN LA OBRA. PROBLEMAS, Causas y Soluciones., IMCYC (Instituto Mexicano del Concreto y el Cemento), Junio 2006. p. 20-22.
- [30]** SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Concretos y Morteros “Manejo y Colocación en obra”. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004. p. 27.
- [31]** CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO - LA RESISTENCIA < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/Caracteristicas%20del%20Concreto-Resistencia> > Visitado en mayo de 2010.
- [32]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 131.
- [33]** Ibid., p. 131-132.
- [34]** CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO: Resistencia < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/Caracteristicas%20del%20Concreto-Resistencia> > Visitado en mayo de 2010.
- [35]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 133-134.
- [36]** LUCO, Luis Fernando. Importancia del Curado en la Calidad del Hormigón de Recubrimiento. Parte I: Análisis Teórico de los Efectos del Secado Prematuro. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Mayo 2009.
- [37]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 138.

- [38] SOLÍS R y 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. Op. Cit, p. 44- 55.
- [39] _____. ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM - American Society of testing for materials.
- [40] POPOVICS S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic. Pulse velocity relationship. Materials Evaluation. Febrero 2001. p. 123–130.
- [41] SANCHEZ de GUZMAN, Diego, Concretos y Morteros “Manejo y Colocación en obra”, Op. Cit., p 156.
- [42] Ibid., p. 156
- [43] MALHOTRA V. M. Op. Cit., p. 101-102.
- [44] SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero. Op. Cit, p. 211.
- [45] Ibid. p. 105-106.
- [46] SOLÍS R; MORENO Erick. y R William. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. p. 41-42.
- [47] _____. NTC 121 (1995). Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [48] _____. NTC 321 (1995). Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [49] ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA “Acueducto Metropolitano de Bucaramanga” <Disponible en: http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/control_calidad_bga2010.pdf > visitada en junio del 2010.
- [50] ICONTEC 550 Y 673. Método para ensayos de cilindros de concreto a la compresión" ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [51] ICONTEC 1377 (1995). Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

- [52]** MALHOTRA V. M. (1985). "Non-destructive testing of concrete structures". International Atomic Energy Agency. Training course series No. 17. Vienna, 2002. pg. 44-46
- [53]** ASTM C 597-02 (2002). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States. ASTM international - American Society of testing for materials.
- [54]** ASTM C39/C39M-04 (2004). United States. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM international - American Society for Testing and Materials.
- [55]** MALHOTRA V. M. Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Septiembre, 2002.
- [56]** SOLÍS R y 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.
- [57]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 210.
- [58]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 134.
- [59]** SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 136.
- [60]** CAÑAS LAZO. Manuel Antonio, RENATA MARTINEZ. Manuel Edgardo. Comparación de Diferentes Métodos de Diseño de Mezclas de Concreto Hidráulico en el Salvador con Aplicación Particular a Pavimentos.
<Disponible en: http://www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/jornadas/01ibermac_pdf/07_Hormigon/Canas2.pdf >
- [61]** Fraguado del Concreto. <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html>

ANEXOS

ANEXO A. Metodología para el diseño de mezcla

PASO I. Selección del asentamiento. La consistencia de un concreto se refiere a su estado de fluidez, es decir, qué tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando se encuentra en estado fresco, la medida más directa de esta propiedad se obtiene con la selección del asentamiento apropiado. Por ende, la buena escogencia del asentamiento lleva a obtener una mezcla en estado fresco con mayor manejabilidad y que funciona de acuerdo al sistema de colocación y compactación sugeridas. Permitiendo así conseguir un concreto cuyas propiedades en estado endurecido sean las mejores. La tabla 2, presenta los tipos de asentamiento según la consistencia de la mezcla en estado fresco, para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación.

Tabla 1. Asentamientos recomendados para diversos tipos de estructuras y sistemas de colocación.

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

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

PASO II. Selección de la relación agua-cemento. Debido a la gran importancia que tiene la relación agua/cemento dentro del diseño de mezcla de concreto, su selección se fundamenta principalmente en requisitos correspondientes a propiedades como: Resistencia, durabilidad y acabado. Puesto que el valor de resistencia a la compresión varía según sean los diferentes tipos de agregados y cementos a pesar de mantener la misma relación agua/cemento, se hace necesario estudiar variables fundamentales como: tamaño de agregado, textura superficial, forma, tiempo y tipo de curado o inclusión de algunos aditivos. Para determinar cual es la relación agua-cemento más adecuada.

PASO III. Estimación del contenido de agua. Para poder determinar la cantidad necesaria de agua a utilizar se debe tener en cuenta que el agua dentro de la mezcla de concreto cumple dos funciones: la primera es la de hidratar el cemento, y la segunda es la de producir la fluidez necesaria. Por lo tanto, la estimación de esta cantidad está sujeta al tipo de asentamiento que se quiera producir y el tamaño máximo de agregado con el cual se va a trabajar. La tabla 3, proporciona estimaciones de la cantidad de agua necesaria en la mezcla de concreto según el tamaño máximo de agregado y el asentamiento con aire incluido y sin él.

Tabla 2. Agua en Kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados.

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	10mm.	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
5 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire (%)	3	2.3	2	1.5	1	0.5	0.3

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	10mm.	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	180	175	165	160	145	140	135
5 a 10	200	190	180	175	165	155	150
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160
Contenido de aire (%)	8	7	6	5	4.5	4	3.5

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

PASO IV. Estimación del contenido de cemento. La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene a partir de la relación agua cemento y del contenido de agua encontrado en el paso anterior. Por medio de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{a}{a/c}$$

Ecuación 1

PASO V. Estimación del contenido de agregado grueso. La cantidad de agregado grueso necesario, para la mezcla de concreto se determina a partir de la tabla 4. Esta tabla presenta el coeficiente b/bo en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso y del modulo de finura del agregado fino. Este coeficiente b/bo es la relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

Tabla 3. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo de agregado (mm)	Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
13	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Tecnoconcreto. Diseño de mezclas.

Conocido b/b_0 , se calcula el peso absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto. Según la siguiente formula:

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

Ecuación 2

Siendo b = volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.
 b_0 = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto
 b/b_0 = Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso (Tabla 4).

PASO VI. Estimación del contenido de agregado fino. El volumen de agregado fino a utilizar en la mezcla se calcula al sumar el volumen de cada uno de los componentes presentes en la mezcla para luego restarlos con un metro cúbico de concreto (Base de calculo), según la ecuación 3 [60].

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

Ecuación 3

Donde: V_{af} = Volumen de agregado fino

V_a = Volumen de agua

V_c = Volumen de cemento

V_{ag} = Volumen de agregado grueso (Cantidad de agregado grueso/
Densidad aparente ag)

Este volumen se multiplica por la densidad aparente del agregado fino determinada en la caracterización, con el fin de calcular su cantidad en Kilogramos.

PASO VII. Fraguado. El fraguado puede definirse como el lapso de tiempo necesario para que la mezcla pase de un estado fluido a un estado sólido, debido a las reacciones químicas que se producen cuando se ponen en contacto el cemento con el agua de mezclado, causando un endurecimiento paulatino de la mezcla. El fraguado ocurre al exponer las probetas al aire libre durante mínimo 10 horas en las que se busca obtener una parte del endurecimiento que será completado con los 28 días del proceso de curado [61].

PASO VIII. Curado Húmedo. El curado es el proceso natural por medio del cual el concreto madura y desarrolla propiedades mecánicas típicas del estado endurecido bajo condiciones de temperatura y humedad. En el tiempo durante el cual se lleva a cabo este proceso se desarrollan una serie de reacciones químicas de hidratación entre el cemento y el agua. Se ha comprobado que curando en húmedo se tienen las condiciones más favorables para el proceso así como mejores propiedades mecánicas.

Según la American Concrete Institute y la Portland Cement Association “El curado tiene una influencia significativa sobre las propiedades del concreto endurecido,

tanto en el interior como en su superficie, tales como la resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen y resistencia al hielo- deshielo y sustancias anticongelantes. El desarrollo de resistencia superficial se puede reducir significativamente cuando el curado es defectuoso”.

Durante esta etapa las probetas se someten a condiciones estándar de temperatura y humedad, es decir, a una temperatura de 23°C y 100% humedad.

ANEXO B. Diseño de una mezcla con tamaño máximo de agregado de 3/8” con relación agua/cemento 0.4

Para poder realizar el diseño fue necesario contar con información como: Análisis granulométrico de los agregados, peso unitario compactado y peso específico de los agregados (fino y grueso), porcentaje de absorción de los agregados (fino y grueso) y peso específico del cemento, entre otros. La información fue tomada en gran parte de la caracterización de la materia prima según la tabla 9 y 10.

A partir de estos datos se inició el diseño de mezcla con la selección del asentamiento según la tabla 1 del anexo 1, basándose en una consistencia media para el concreto en estado fresco, cuya aplicación avala obras en general como pavimentos compactados a mano, losas, muros, etc. Por lo tanto, el asentamiento adecuado fue de 5 a 10 cm.

Con el asentamiento ya seleccionado y el tamaño máximo de agregado de 3/8 (9.525mm), se determinó que la cantidad de agua necesario para la mezcla era 225Kgm, según la tabla 2 del anexo A. A fin de obtener un concreto sin aire incluido.

Puesto que la cantidad de agua estimada fue de 225Kg y la relación agua/cemento se considero era 0.4, el contenido de cemento por unidad de volumen de concreto fue de 563Kg/l determinada a partir de la ecuación 1 del anexo A.

La cantidad de agregado grueso se determinó mediante la tabla 3 del anexo 1, al obtener el coeficiente b/b_0 a partir del tamaño máximo nominal del agregado grueso que en este caso era de 3/8 y el modulo de finura del agregado fino que según la tabla 6 es de 2.09. Con 0.53 como el coeficiente b/b_0 se procedió a calcular la cantidad de agregado grueso necesario para un metro cúbico de

concreto con la ecuación 2. La cual multiplica b/b_0 por el peso unitario compactado del agregado grueso obtenido en la caracterización (tabla 9). A partir de esta multiplicación se determinó que el contenido de agregado grueso era de 777Kg.

Para conocer el contenido de agregado fino fue necesario determinar el volumen de cada uno de los componentes presentes en la mezcla (Agua, agregados y cemento). Luego y por medio de la ecuación 3 se calculó el contenido de agregado fino para un volumen de agua de 225 L, un volumen de agregado grueso de 298.85 L Y un volumen de cemento de 185.81 L. Resultando un volumen de 290.34l, este valor se multiplicó por 2.65Kg/l el cuál representa la densidad de este agregado determinada en la caracterización (Tabla 9). Esta multiplicación permitió conocer que el contenido de agregado fino necesario para la mezcla era 769 Kg.

ANEXO C. Registro de los cambios en peso para las probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/4”

PESOS PARA PROBETAS CON 3/4"												
DÍA	PROBETAS A/C 0,4				PROBETAS A/C 0,5				PROBETAS A/C 0,6			
	Nº	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO	Nº	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO	Nº	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO
7	1	4,088	4,125	0,037	13	4,034	4,069	0,035	25	4,012	4,05	0,038
	2	3,992	4,027	0,035	14	4,006	4,04	0,034	26	4,012	4,046	0,034
	3	4,121	4,157	0,036	15	4,022	4,055	0,033	27	4,003	4,03	0,027
14	4	4,023	4,066	0,043	16	4,019	4,05	0,031	28	3,979	4,012	0,033
	5	4,014	4,053	0,039	17	4,035	4,068	0,033	29	3,929	3,957	0,028
	6	3,989	4,029	0,04	18	4,056	4,086	0,03	30	3,963	3,995	0,032
21	7	4,015	4,074	0,059	19	4,012	4,049	0,037	31	3,962	3,996	0,034
	8	4,041	4,087	0,046	20	3,972	4,011	0,039	32	3,95	3,989	0,039
	9	4,102	4,149	0,047	21	3,987	4,028	0,041	33	3,919	3,955	0,036
28	10	4,035	4,079	0,044	22	3,992	4,031	0,039	34	4,002	4,041	0,039
	11	4,115	4,162	0,047	23	3,996	4,007	0,011	35	3,973	4,011	0,038
	12	4,086	4,136	0,05	24	3,997	4,037	0,04	36	4,008	4,047	0,039

ANEXO D. Registro de los cambios en peso para las probetas fabricadas con tamaño máximo de 3/8".

PESOS PARA PROBETAS CON 3/8"												
DÍAS	PROBETAS A/C 0,4				PROBETAS A/C 0,5				PROBETAS A/C 0,6			
	Nº	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO	Nº	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO	Nº	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO
7	1	4,032	4,071	0,039	13	3,948	3,975	0,027	25	3,909	3,941	0,032
	2	3,997	4,032	0,035	14	3,951	3,983	0,032	26	3,877	3,906	0,029
	3	3,945	3,982	0,037	15	3,923	3,955	0,032	27	3,881	3,91	0,029
14	4	4,039	4,082	0,043	16	3,968	4,008	0,04	28	3,923	3,96	0,037
	5	4,003	4,046	0,043	17	3,933	3,973	0,04	29	3,873	3,908	0,035
	6	3,988	4,035	0,047	18	3,948	3,987	0,039	30	3,901	3,939	0,038
21	7	4,004	4,053	0,049	19	3,943	3,988	0,045	31	3,898	3,939	0,041
	8	4,01	4,059	0,049	20	3,921	3,968	0,047	32	3,847	3,89	0,043
	9	3,963	4,013	0,05	21	3,916	3,962	0,046	33	3,899	3,942	0,043
28	10	4,005	4,057	0,052	22	3,951	4,001	0,05	34	3,86	3,904	0,044
	11	3,986	4,04	0,054	23	3,959	4,009	0,05	35	3,894	3,938	0,044
	12	4,014	4,067	0,053	24	4,017	4,067	0,05	36	3,882	3,928	0,046

ANEXO E. Cálculo del área para las probetas con tamaño de agregado máximo de 3/4"

PROBETAS A/C 0,4			PROBETAS A/C 0,5			PROBETAS A/C 0,6		
Nº	DIÁMETRO	ÁREA	Nº	DIÁMETRO	ÁREA	Nº	DIÁMETRO	ÁREA
	(cm)	(cm ²)		(cm)	(cm ²)		(cm)	(cm ²)
1	10,3459	84,0688	13	10,4009	84,965	25	10,4956	86,5187
2	10,3279	83,7765	14	10,3553	84,2205	26	10,4586	85,9098
3	10,3613	84,318	15	10,3286	83,7873	27	10,4449	85,6854
4	10,3303	83,8144	16	10,3503	84,1392	28	10,4019	84,9813
5	10,3539	84,1989	17	10,3479	84,1013	29	10,3416	83,9984
6	10,3479	84,1013	18	10,3609	84,3127	30	10,3506	84,1446
7	10,3569	84,2477	19	10,3623	84,3344	31	10,3279	83,7765
8	10,3393	83,9605	20	10,3666	84,405	32	10,3389	83,9551
9	10,3633	84,3507	21	10,3623	84,3344	33	10,3546	84,2097
10	10,3606	84,3073	22	10,3613	84,3182	34	10,3556	84,226
11	10,3516	84,1609	23	10,3486	84,1121	35	10,3583	84,2694
12	10,3393	83,9605	24	10,3519	84,1663	36	10,3683	84,4321

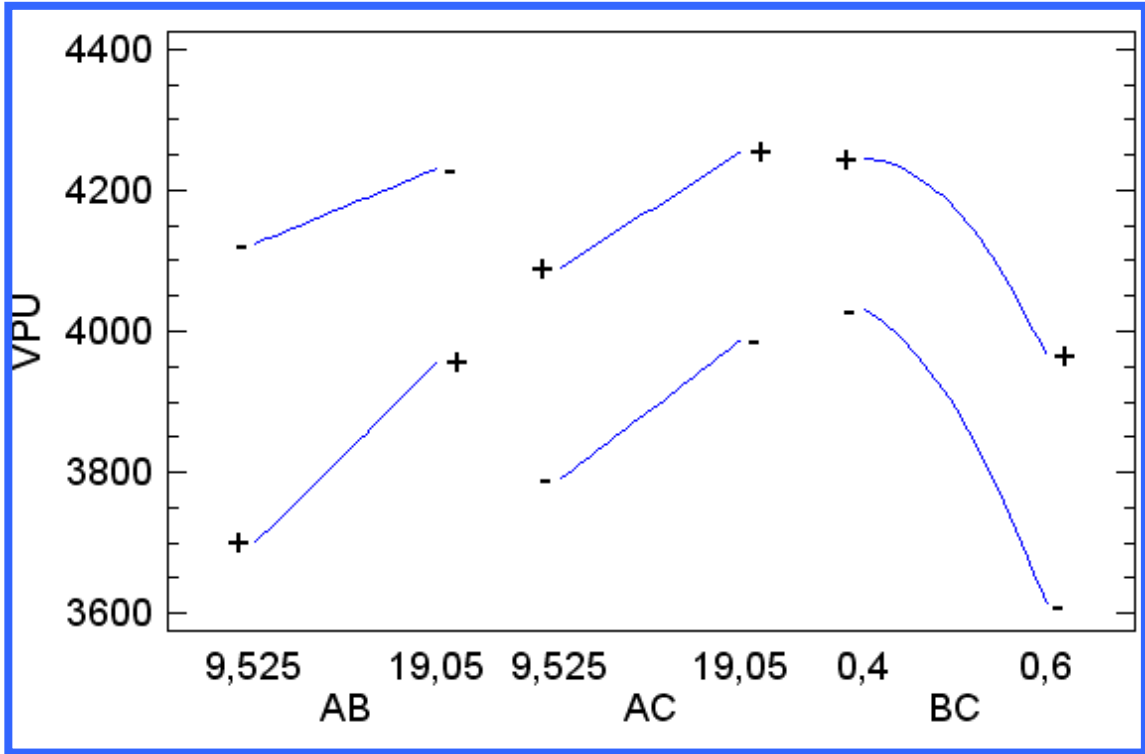
ANEXO F. Cálculo del área para las probetas con tamaño de agregado máximo de 3/8"

PROBETAS A/C 0,4			PROBETAS A/C 0,5			PROBETAS A/C 0,6		
Nº	DIÁMETRO (cm)	ÁREA (cm ²)	Nº	DIÁMETRO (cm)	ÁREA (cm ²)	Nº	DIÁMETRO (cm)	ÁREA (cm ²)
1	10,3436	84,0308	13	10,3443	84,0417	25	10,3423	84,0092
2	10,4443	85,6745	14	10,3806	84,633	26	10,3433	84,0255
3	10,3559	84,2314	15	10,3683	84,4321	27	10,3386	83,9497
4	10,3366	83,9172	16	10,3503	84,1392	28	10,3419	84,0038
5	10,3606	84,3073	17	10,3513	84,1555	29	10,3393	83,9605
6	10,3333	83,8631	18	10,3533	84,188	30	10,3563	84,2368
7	10,3483	84,1067	19	10,3686	84,4376	31	10,3573	84,2531
8	10,3563	84,2368	20	10,3714	84,4837	32	10,3519	84,1663
9	10,3479	84,1013	21	10,3386	83,9497	33	10,3479	84,1013
10	10,3493	84,123	22	10,3639	84,3616	34	10,3633	84,3516
11	10,3573	84,2531	23	10,3609	84,3127	35	10,3479	84,1013
12	10,3596	84,291	24	10,3606	84,3073	36	10,3663	84,4006

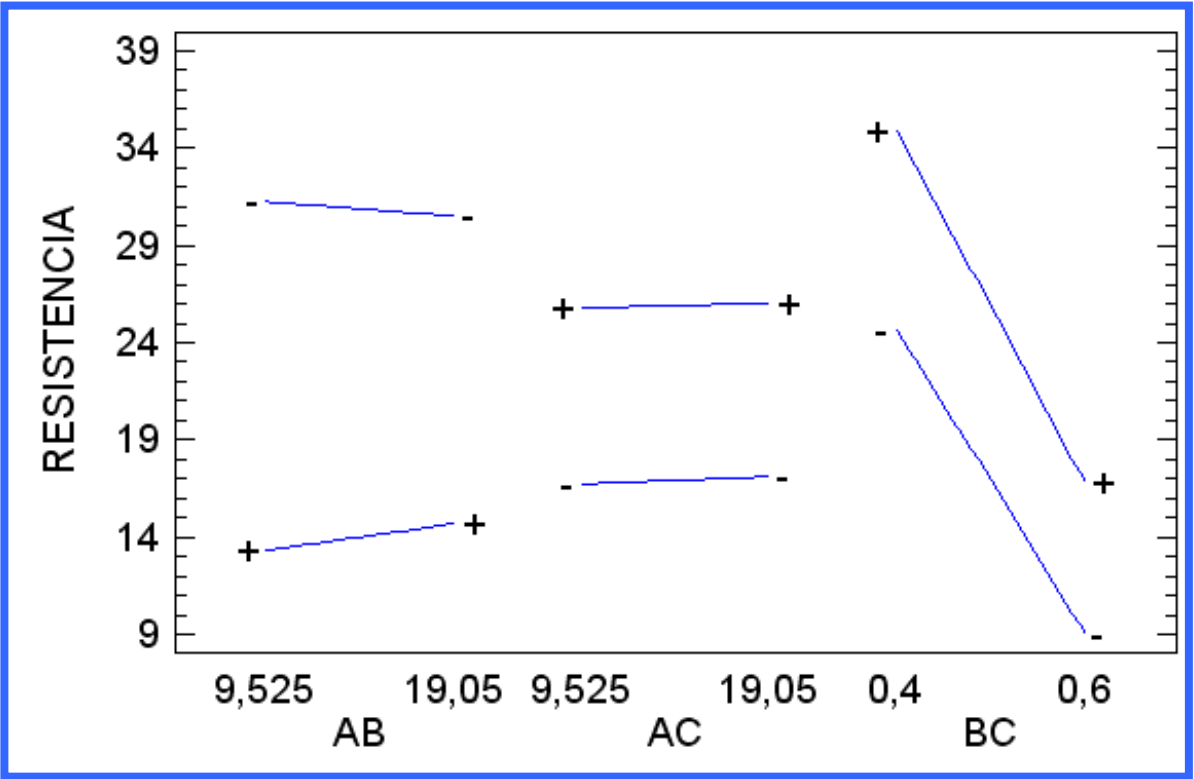
ANEXO G Tabla de correlación entre las medidas de velocidad de pulso contra resistencia a la compresión para cada una de las mezclas.

TAMAÑO	RELACIÓN	DÍAS	ULTRASONIDO	RESISTENCIA
3/8"	0,4	7	3965,5	23,84
		14	4036,7	31,04
		21	4124,8	33,41
		28	4259,1	33,88
	0,5	7	3827,31	16,58
		14	3946,8	20,82
		21	4032,44	22,89
		28	4074,22	27,33
	0,6	7	3481,9	8,91
		14	3624	11,78
		21	3747,7	13,79
		28	3840,6	16,13
3/4"	0,4	7	4091,3	24,62
		14	4238,5	29,99
		21	4263,16	31,76
		28	4266,7	33,49
	0,5	7	3963,6	15,69
		14	4143,2	19,92
		21	4159,21	24,76
		28	4247,7	27,49
	0,6	7	3716,16	11,51
		14	3922,8	12,13
		21	4024,8	16,11
		28	4098,6	16,94

ANEXO H. Grafica de interacción entre las variables relación agua/cemento, tamaño máximo de agregado y tiempo de curado sobre la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.



ANEXO I. Grafica de interacción entre las variables relación agua/cemento, tamaño máximo de agregado y tiempo de curado sobre el ensayo de resistencia a la compresión.



ANEXO J. Grafica de superficie de respuesta para la edad de 28 días.

En esta gráfica se presenta un porcentaje de deseabilidad de acuerdo a cada una de las mezclas para las dos técnicas consideradas. En esta figura se observa que para una mezcla con relación agua/cemento de 0.4 y tamaño máximo de agregado de 3/8" se consiguen los valores más altos en resistencia y velocidad de pulso ultrasónico.

