

**CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL CONCRETO, LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO  
ULTRASÓNICO.**

**DURÁN MORENO EDWIN RAÚL  
PEÑA SANTOS DEYCI YAMILE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2010**

**CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL CONCRETO, LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO  
ULTRASÓNICO.**

**AUTORES:**

<b>DURÁN MORENO EDWIN RAÚL</b>	<b>2021152</b>
<b>PEÑA SANTOS DEYCI YAMILE</b>	<b>2031915</b>

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

**DIRECTORA:**

**Msc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTÍZ**

**CODIRECTOR:**

**Ph.D. RICARDO CRUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2010**

## DEDICATORIA

*A Dios, por llenarme de fortalezas, alegrías y bendiciones día a día; por permitir que sobresaliera a todos los tropiezos para llegar a cumplir esta meta tan grande y por que sigas acompañándome durante mi camino.*

*A mi madre Margoth Moreno en el cielo, porque a pesar que no estés hoy compartiendo conmigo este logro y alegría, se que tu estarás muy feliz y orgullosa de mí. Fuiste siempre una motivación muy grande para mí por tu enorme entrega a la familia.*

*A mi padre Raúl Durán, porque nos ha demostrado el valor de hacer bien las cosas y las recompensas que da la vida a quien lo hace, por brindarme la oportunidad de superarme y por toda la paciencia y comprensión.*

*A mi tía Dilia, a Mi hermana Jhoanna y a mis sobrinos Camila y Sebastián que son las personas que me brindan alegría, esperan mucho de mí y me acompañan todo el tiempo.*

*A mi compañera, por su amistad, su paciencia y por todo el apoyo para sobresalir de las dificultades durante el camino de este éxito personal para ambos.*

*A mis tíos y primos porque su apoyo ha sido de gran valor.*

*A mis amigos de infancia, a los de Futsalá, y los de La Universidad por que se que son las personas con las que cuento con su apoyo incondicional.*

***Edwín Raúl Durán Moreno***

## DEDICATORIA

*En primer lugar a papito Dios, que ha sido no sólo mi fuente de vida, sino mi guía y fortaleza en todo momento. A la virgencita, que nunca me desampara, cuida de mí y de mis seres queridos.*

*A mis padres, Myriam y José, porque son la razón de mi vida, por su inmenso amor, esfuerzo, dedicación, por sus buenos consejos, por su incansable lucha para ofrecernos una mejor vida e inculcarnos los valores inquebrantables del ser humano. A mis hermanos, Yoly, Maye, Mauro, Chiky, Marce y Harlen; porque con ellos aprendí la importancia y el valor de la familia, porque siempre han creído en mí, por su apoyo, por brindarme tantas alegrías y estar conmigo cuando más los necesito.*

*A Fabian, por su amor y comprensión, por permanecer a mi lado a pesar de las dificultades, porque me ayudó a perseverar en mi sueño profesional, por ser la persona con la que quiero compartir mi vida y por enseñarme que todo lo que deseamos puede ser realidad.*

*A Edwin, por soportarme durante tanto tiempo, por mostrarme que la humildad y la sencillez son las virtudes más grandes de una persona, por su alegría, apoyo incondicional y su actitud positiva.*

*A mis amigos, en especial a Yanid, Juanchis, Yuli V, Yuli K, JuanK y Diego, por brindarme una amistad limpia y desinteresada, por su buena compañía y estar conmigo en los momentos más difíciles de mi carrera.*

*Al profe Arnaldo, quien ha sido un gran maestro y amigo, porque he podido contar con él siempre, por su sabiduría y afecto.*

***Deycí Yamile Peña Santos.***

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por acogernos como parte de su familia y formarnos como profesionales íntegros.

A la Escuela de Ingeniería Civil, por permitirnos el uso de las instalaciones del edificio de Caracterización de materiales para la construcción, de los equipos y materiales necesarios en la realización de este trabajo y en especial, a los técnicos Jairo Hernández y Jaime Cadena por su valiosa colaboración, paciencia y calidad humana.

Al grupo de investigación en desarrollo y tecnología de nuevos materiales GIMAT, por hacernos partícipes y permitirnos contribuir en una de sus investigaciones, por la adquisición del equipo de ultrasonido y por su ayuda oportuna durante todo el proyecto.

A la profesora Luz Amparo Quintero, al profesor Ricardo Cruz y al Ingeniero Julián Herrera Ortiz, por su tiempo, apoyo, orientación y por compartir con nosotros sus conocimientos; los cuales fueron de vital importancia durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A todos nuestros profesores de la escuela de ingeniería metalúrgica: Luz Amparo Quintero, Julio Pedraza, Arnaldo Alonso, Custodio Vásquez, Orlando Gómez, Elcy Córdoba, Walter Pardavé, Jaime González, Gustavo Neira, Afranio Cardona, Iván

Uribe y Luis Orlando Aguirre; por ser nuestros guías y amigos, por los innumerables aportes a nuestras vidas y por acrecentar el amor hacia nuestra carrera.

También queremos agradecer de forma muy especial a los técnicos y trabajadores de nuestra escuela: Ambrosio Carrillo, Mario Navarrete, Javier Quintana, Daniel Garavito, Fermín Gómez, Alcira Navas y Orlando Buitrago; por su inmensa colaboración, disposición, amistad y por su incondicionalidad en la solución de los inconvenientes presentados durante el transcurso de nuestra carrera.

A nuestros compañeros y amigos por brindarnos los mejores momentos y por compartir con nosotros los más desafortunados.

Por último, pero no menos importante, a nuestras familias, por su inmenso amor, ayuda, comprensión y apoyo en todos los momentos de nuestras vidas y por el sustento económico necesario en nuestra formación profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	28
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	30
1.2 OBJETIVOS .....	32
1.2.1 General:.....	32
1.2.2 Específicos: .....	32
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	33
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO.....	33
2.1.1 Componentes de la mezcla: .....	33
2.1.1.1 Cemento: .....	34
2.1.1.2 Agua: .....	34
2.1.1.3 El agregado fino.....	36
2.1.1.4 Agregado grueso: .....	37
2.1.1.5 Aire: .....	38
2.1.2 Propiedades del concreto: .....	38
2.1.2.1 Estado fresco:.....	38
2.1.2.2 Endurecido:.....	40
2.1.3 Proceso de fabricación del concreto:.....	41
2.1.4 Química del concreto:.....	42
2.1.4.1 Reacciones químicas del concreto: .....	44

2.2	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	47
2.2.1	VPU: .....	47
2.2.1.1	Principio de la técnica.....	49
2.2.1.2	Factores que afectan la VPU.....	44
3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	47
3.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	48
3.2	CAPACITACIÓN.....	48
3.3	PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE PROBETAS A ENSAYAR.....	49
3.3.1.1	Cemento Portland tipo I: .....	49
3.3.1.2	Agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga: .....	49
3.3.1.4	Agregado grueso: .....	49
3.3.1.5	Agregado fino: .....	50
3.3.2	Diseño de mezcla: .....	50
3.3.3	Ensayos preliminares:.....	50
3.3.4	Elaboración de probetas: .....	51
3.4	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	54
3.4.1	Contenido de agua (CA): .....	54
3.4.1.1	Probetas curadas en agua:.....	54
3.4.1.2	Probetas curadas al aire: .....	54
3.4.2	Preparación superficial de las probetas: .....	54
3.4.3	Medidas de VPU .....	55
3.5	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	56
3.6	ESTABLECIMIENTO DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL CONCRETO, LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO .....	58

3.7	INFORME FINAL.....	58
3.7.1	Análisis de resultados:.....	58
3.7.2	Presentación del informe final:.....	58
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
4.1	PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR.....	59
4.1.1	Identificación y caracterización de materiales:.....	59
4.1.1.1	Cemento:.....	59
4.1.1.2	Agua:.....	60
4.1.1.3	Agregados:.....	61
4.1.2	Diseño de mezcla:.....	63
4.1.3	Ensayos preliminares:.....	65
4.1.4	Elaboración de probetas:.....	67
4.2	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	68
4.2.1	Contenido de agua (CA):.....	68
4.2.2	Preparación superficial de las probetas:.....	76
4.3	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	84
4.3.1	Resistencia a la compresión en probetas curadas en Agua:.....	84
4.3.2	Resistencia a la compresión en probetas curadas al aire:.....	87
4.4	CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO.....	92
4.4.1	Correlación para probetas curadas en agua:.....	92
4.4.2	Curadas en aire:.....	94
4.5	CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO.....	96
4.5.1	Curadas en agua:.....	96

4.5.2	Curadas en aire: .....	98
4.6	CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO.... .....	101
4.6.1	Curadas en agua: .....	101
4.6.2	Curadas en aire: .....	102
4.7	CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, EL CONTENIDO DE AGUA Y LA VPU. ....	105
4.7.1	Probetas curadas en agua.....	106
4.7.2	Probetas curadas al aire: .....	107
5.	CONCLUSIONES .....	110
6.	RECOMENDACIONES.....	112
	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	ANEXOS.....	117

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Propiedades del concreto en estado fresco.....	39
<b>Tabla 2.</b> Fases, proporciones y formulas químicas de los compuestos del cemento. ....	44
<b>Tabla 3.</b> Compuestos del clinker y sus características. ....	44
<b>Tabla 4.</b> Clasificación del concreto según la velocidad de pulso.....	49
<b>Tabla 5.</b> Efecto de la temperatura en la transmisión de pulso ultrasónico.....	44
<b>Tabla 6.</b> Efecto de las dimensiones del espécimen en la transmisión de pulso. ..	45
<b>Tabla 7.</b> Características del cemento usado en la preparación de la mezcla. ....	59
<b>Tabla 8.</b> Resultados de los análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga .....	60
<b>Tabla 9.</b> Resultados de las características evaluadas para los agregados fino y grueso.....	62
<b>Tabla 10.</b> Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto con una relación a/c de 0.5.....	64
<b>Tabla 11.</b> Cantidades necesarias por componente en la elaboración de 37 probetas.....	65
<b>Tabla 12.</b> Contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar, a diferentes tiempos de curado.....	69
<b>Tabla 13.</b> Parámetros del modelo obtenido para el contenido de agua vs. Tiempo en condiciones estándar. ....	71
<b>Tabla 14.</b> Contenido de agua en las probetas curadas al aire, en diferentes tiempos de curado. ....	73
<b>Tabla 15.</b> Parámetros del modelo obtenido para el contenido de agua vs. Tiempo en condiciones ambientales.....	75

<b>Tabla 16.</b> Diámetros promedio para los cilindros de concreto curados en agua y en aire.....	76
<b>Tabla 17.</b> Parámetros de operación para el equipo de baja frecuencia PUNDIT PLUS .....	77
<b>Tabla 18.</b> Promedio de velocidades de pulso para cada día de curado en agua. .	77
<b>Tabla 19.</b> Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. Tiempo de curado en condiciones estándar.....	79
<b>Tabla 20.</b> Variación de la VPU con el tiempo de curado, en probetas curadas al aire.....	80
<b>Tabla 21.</b> Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. Tiempo de curado en condiciones ambientales.....	82
<b>Tabla 22.</b> Valores de resistencia a la compresión en probetas curadas en condiciones estándar a diferentes tiempos de curado.....	84
<b>Tabla 23.</b> Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. Tiempo en condiciones estándar.....	87
<b>Tabla 24.</b> Valores de resistencia a la compresión en probetas curadas en condiciones ambientales a diferentes tiempos de curado.....	88
<b>Tabla 25.</b> Parámetros del modelo obtenido para resistencia a la compresión vs. Tiempo en condiciones ambientales.....	90
<b>Tabla 26.</b> Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. El contenido de agua en condiciones estándar.....	93
<b>Tabla 27.</b> Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. El contenido de agua en condiciones ambientales.....	95
<b>Tabla 28.</b> Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en condiciones estándar.....	98
<b>Tabla 29.</b> Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en condiciones ambientales.....	100
<b>Tabla 30.</b> Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. La VPU en condiciones estándar.....	102

<b>Tabla 31.</b> Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. La VPU en condiciones ambientales. ....	104
<b>Tabla 32.</b> Parámetros del modelo obtenido para la correlación entre resistencia a la compresión, la VPU y el contenido de agua en condiciones estándar .....	107
<b>Tabla 33.</b> Parámetros del modelo obtenido para la correlación entre resistencia a la compresión, la VPU y el contenido de agua en condiciones ambientales. ....	108

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Proporciones aproximadas de la mezcla por volumen de concreto. ....	33
<b>Figura 2.</b> Influencia de un exceso de agua de la mezcla en la resistencia y la consistencia. ....	35
<b>Figura 3.</b> Granulometría de los agregados finos. ....	37
<b>Figura 4.</b> Granulometría de los agregados gruesos. ....	38
<b>Figura 5.</b> Resistencia a la compresión en función de la edad, para una variedad de condiciones de curado. ....	41
<b>Figura 6.</b> Fases Belita, Aluminato (Celita) y Alita en el concreto. ....	43
<b>Figura 7.</b> Productos internos y externos de un grano de cemento. ....	46
<b>Figura 8.</b> Etapas en la hidratación del cemento. ....	46
<b>Figura 9.</b> Método directo ....	50
<b>Figura 10.</b> Método semi-directo.....	50
<b>Figura 11.</b> Método indirecto ....	50
<b>Figura 12.</b> Esquema detallado de la metodología experimental seguida en el proyecto. ....	47
<b>Figura 13.</b> Equipo de ultrasonido FARNELL PUNDIT plus, modelo PC 1006.....	48
<b>Figura 14.</b> Proceso de elaboración de las probetas. ....	53
<b>Figura 15.</b> Modelo del dispositivo creado para la correcta ubicación de los palpadores. ....	56
<b>Figura 16.</b> Contenido de agua vs. Tiempo de curado en probetas curadas en agua. a) Contenido de agua promedio para cada día de ensayo. b) Modelo obtenido con nivel de confianza a partir de un software estadístico Statgraphics. 70	70
<b>Figura 17.</b> Contenido de agua vs. Tiempo de curado en probetas curadas al aire a) Contenido de agua promedio para cada día de ensayo. b) Modelo obtenido con nivel de confianza a partir de un software estadístico.....	74

<b>Figura 18.</b> Variación de la velocidad de pulso ultrasónico VPU con el tiempo, en probetas curadas en agua. ....	78
<b>Figura 19.</b> Variación de la VPU con el tiempo, en probetas curadas al aire. ....	81
<b>Figura 20.</b> Comparación de la VPU vs. Tiempo en diferentes condiciones de curado. ....	83
<b>Figura 21.</b> Variación de la resistencia a la compresión en probetas curadas en agua para diferentes tiempos de curado. ....	86
<b>Figura 22.</b> Variación de la resistencia a la compresión en probetas curadas al aire para diferentes tiempos de curado. ....	89
<b>Figura 23.</b> Comparación de la resistencia a la compresión vs. Tiempo en diferentes condiciones de curado. ....	91
<b>Figura 24.</b> Variación de la VPU vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar. ....	92
<b>Figura 25.</b> Variación de la VPU vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones ambientales. ....	94
<b>Figura 26.</b> Variación de la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar. ....	97
<b>Figura 27.</b> Variación de la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones ambientales. ....	99
<b>Figura 28.</b> Variación de la resistencia a la compresión vs. La VPU, en probetas curadas en condiciones estándar. ....	101
<b>Figura 29.</b> Variación de la resistencia a la compresión vs. La VPU, en probetas curadas en condiciones ambientales. ....	103
<b>Figura 30.</b> Comparación de la resistencia a la compresión vs. La VPU en diferentes condiciones de curado. ....	104
<b>Figura 31.</b> Comparación entre los valores de resistencia a la compresión observados en los ensayos y los predichos por el modelo ajustado, en probetas curadas en condiciones estándar. ....	106

**Figura 32.** Comparación entre los valores de resistencia a la compresión observados en los ensayos y los predichos por el modelo ajustado, en probetas curadas en condiciones ambientales.....108

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	<b>pág.</b>
<b>Fotografía 1.</b> Compresor Black & Decker .....	51
<b>Fotografía 2.</b> Moldes plástico.....	51
<b>Fotografía 3.</b> Desencofrado de los moldes plásticos a presión.....	53
<b>Fotografía 4.</b> Preparación superficial de las probetas.....	55
<b>Fotografía 5.</b> Palpadores de 54 KHz.....	56
<b>Fotografía 6.</b> Toma de VPU .....	56
<b>Fotografía 7.</b> Máquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER.....	57
<b>Fotografía 8.</b> Agregados finos y gruesos provenientes de la zona de pescadero.	61
<b>Fotografía 9.</b> Resultado del ensayo de materia orgánica del agregado fino. ....	62
<b>Fotografía 10.</b> Dispositivo diseñado para la ubicación correcta de los palpadores. .....	66
<b>Fotografía 11.</b> Probetas curadas en piscina y en condiciones ambientales .....	67

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Formato de informe con los resultados obtenidos en la distribución granulométrica de los agregados.....	117
<b>Anexo B.</b> Diseño de mezcla del concreto. ....	118

## GLOSARIO

**AGUA DE AMASADO:** participa en las reacciones de hidratación del cemento y confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.

**AGUA DE CURADO:** tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura.

**CONCRETO FRESCO:** es aquel recién preparado cuyo estado es plástico y moldeable en el cual no se produce el fraguado ni el endurecimiento y adopta la forma del encofrado.

**CURADO:** es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de calor y de agua para compensar las pérdidas por evaporación de la misma durante el fraguado.

**DISPERSIÓN:** fenómeno ocurrido cuando parte de la energía de la onda es absorbida y se extiende como una nueva onda esférica en todas las dimensiones, con el obstáculo de la misma magnitud de la longitud de onda como punto central.

**FRENTE DE ONDA:** frente de entrada del pulso detectado por los aparatos de medición.

**GEL:** se denomina así al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento. Comprende masa de cemento hidratado, hidróxido de calcio cristalino y poros gel.

**ONDA LONGITUDINAL:** también llamada onda de compresión, es aquella donde la dirección de oscilación de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda.

**PASTA:** es el producto resultante de mezclar el cemento con agua; es la encargada de lubricar la masa antes de endurecer, separar y llenar los vacíos entre las partículas de agregado y adherirse fuertemente a ellas.

**POROS CAPILARES:** son los espacios originalmente ocupados por el agua en el concreto fresco, los cuales en el proceso de hidratación del cemento no han sido ocupados por el gel.

**POROS GEL:** se forman durante el proceso de formación del gel, son las partículas de aire que quedan atrapadas dentro de él, aisladas unas de otras y se presentan independientemente de la relación agua-cemento.

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

**RETRACCIÓN DEL CONCRETO:** es la contracción de volumen del concreto por la pérdida paulatina de agua en el mismo, especialmente durante el proceso de fraguado.

**SUPERFICIE SATURADA SECA (SSS):** la condición en la cual los poros permeables de las partículas de agregado son llenados con agua llevada a cabo por sumergido en agua por un periodo de tiempo prescrito, pero sin agua libre en la superficie de las partículas.

## RESÚMEN

**TITULO:** CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL CONCRETO, LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO.\*

**AUTORES:** DURÁN MORENO EDWIN RAÚL,  
PEÑA SANTOS DEYCI YAMILE.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concreto, Curado, Contenido de Agua, Resistencia a la Compresión, Velocidad de Pulso Ultrasónico.

**RESUMEN:** Durante el mezclado, el concreto se comporta como un material plástico que va cambiando sus propiedades a través del tiempo, de manera que al finalizar el fraguado, se comporta como un cuerpo sólido, con cierta resistencia a la compresión y rigidez. Sin lugar a duda, la etapa esencial en su fabricación es el curado, proceso durante el cual, el material gradualmente adquiere las propiedades mecánicas definitivas a partir de reacciones de hidratación, que ocurren entre la pasta de cemento y el agua. Para lograr que las propiedades definitivas sean las deseadas, es fundamental proporcionarle al concreto óptimas condiciones de curado, que garanticen en mayor proporción la ocurrencia de las reacciones de hidratación que confieren la resistencia a la compresión del material. En el presente trabajo se realizó un estudio del comportamiento del contenido de agua, la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión durante la etapa de curado; en probetas cilíndricas de concreto de 200 x 100 mm, fabricadas a partir de una mezcla de cemento Portland tipo I, con una relación agua cemento ( $a/c$ ) = 0.5; en diferentes condiciones de curado. Los especímenes fueron evaluados simultáneamente por el método directo de velocidad de pulso ultrasónico y por ensayos de compresión en los días 2, 3, 6, 9, 14, 21 y 28; hallándose una correlación entre las variables mencionadas, que permiten conocer el comportamiento del material bajo cada condición de estudio. La presente investigación, pretende brindar un aporte que permita la aplicación de un control sobre las propiedades mecánicas a edades tempranas del concreto y poder predecir la resistencia a la compresión del material a los 28 días después de su fabricación, mediante técnicas no destructivas.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Msc. Luz Amparo Quintero. Codirector: Ph.D. Ricardo Cruz.

## ABSTRACT

**TITLE:** CORRELATION BETWEEN WATER CONTENT OF CONCRETE, COMPRESSIVE STRENGTH AND ULTRASONIC PULSE VELOCITY.\*

**AUTORS:** DURAN MORENO EDWIN RAÚL,  
PEÑA SANTOS DEYCI YAMILE\*\*

**KEY WORDS:** Concrete, Hardenning, Water Content, Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity.

**ABSTRACT:** During the mixing, the concrete has a plastic behavior which changes its properties over time, so that the end of the setting, it behaves like a solid body with a certain compressive strength and stiffness. Undoubtedly, a key stage in its manufacturing is the curing process, where the material gradually gets the final mechanicals properties, due to the hydration reactions, which occur between the cement paste and water. To make sure that final properties will be the required, is necessary to provide the optimum conditions for hardening; it could guarantee in a greater proportion the occurrence of hydration reactions that confer the compression resistance at material. This paper presents a study about the behavior of water content, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) and compressive strength; through the curing. The concrete samples are cylinders of diameter 100 and 200 mm height; made up of Portland cement type I, with a water/cement (a/c) ratio of 0.5; in different hardenning conditions. The specimens were assessed by UPV method and compressive strength testing on days 2, 3, 6, 9, 14, 21 and 28, founding correlations between the variables mentioned above, which lets to know about the concrete properties under each conditions of study. The objective of the present research is give a contribution that allows the implementation of mechanicals properties control at early ages of concrete, so, could thus be used to predict the evolution of compressive strength up to 28 days after cast, by Non Destructive Techniques (NDT).

\* Research Work

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

## INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos, el hombre ha construido todo tipo de estructuras en concreto que hoy en día son consideradas maravillas del mundo como por ejemplo el coliseo romano y el Partenón en Grecia. En la actualidad, el concreto es uno de los materiales más importantes y constituyen la mayor parte de la infraestructura en el mundo, por ello la importancia de estudiar su comportamiento, la aplicación de nuevas tecnologías de fabricación y su monitoreo o inspección; puesto que de su integridad dependen vidas humanas, factores económicos y el desarrollo de la infraestructura de un país.

El concreto durante su proceso de fabricación está expuesto a varios factores que pueden afectar su durabilidad y resistencia a la compresión, por lo cual, es importante tener en cuenta sus condiciones de curado (etapa posterior al vaciado del concreto hasta los primeros 28 días) y tener control de la temperatura y la humedad, siendo este último un factor clave para el desarrollo de las propiedades de la mezcla.

Aunque actualmente los ensayos destructivos aportan una gran cantidad de información de este material, el uso de END como el ultrasonido, que en las últimas décadas se aplica a los concretos por medio de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), juegan un papel fundamental al permitir realizar un monitoreo, sin alterar sus condiciones y propiedades mecánicas; es por esta razón, que cada vez más, se está implementando la aplicación nuevas técnicas no destructivas en la búsqueda de métodos más efectivos y económicos de inspección, permitiendo controles más rápidos y confiables.

El presente trabajo de investigación espera mediante la aplicación de la técnica no destructiva de velocidad del pulso ultrasónico, correlacionar el contenido de agua, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en un concreto, durante el proceso de curado, proponiendo una expresión matemática que pueda predecir la resistencia final bajo las condiciones de curado estudiadas.

# 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto por ser un material heterogéneo dependen en gran medida de sus constituyentes (cemento, agregados finos y gruesos y el contenido de agua, entre otros), que provocan gran variación en dichas propiedades. Estos factores tienen su influencia fundamental durante la etapa de curado del concreto, la cual tiene por objetivo evitar un secado prematuro del mismo. El contenido de agua juega un papel predominante en la ocurrencia de las reacciones químicas en las edades tempranas del material, que es el tiempo durante el cual se adquiere la mayor resistencia a la compresión de las mezclas.

Para garantizar las propiedades del concreto, es necesario inspeccionarlo en sus primeras etapas que son las fundamentales. La falta de controles estrictos en la industria de la construcción sobre los factores que afectan la calidad del concreto, se ha convertido en la causa de pérdidas económicas y humanas entre las más destacadas. La necesidad de un método sencillo y confiable para la estimación de estas propiedades en edades tempranas del concreto, ha sido decisivo para desarrollar la técnica de velocidad del pulso ultrasónico aplicable a estos materiales.

De acuerdo con los requerimientos básicos de la industria, se ha determinado que el control del contenido de agua durante el proceso de curado, es un factor crítico si se quieren obtener las propiedades mecánicas de servicio, para las cuales una estructura fue diseñada; ya que sin un adecuado contenido de agua, los materiales cementantes del concreto, no pueden llevar a cabo la reacción química denominada “hidratación” y no se forma la pasta aglutinadora que envuelve cada partícula de los agregados finos y gruesos (arena y grava), razón por la cual, la

mezcla no alcanzará las propiedades potenciales, para formar un producto de calidad que soporte los esfuerzos de servicio y que sea resistente al ataque de agentes agresivos que afecten su integridad y funcionamiento.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 General:

Establecer una correlación entre el contenido de agua del concreto, la resistencia a la compresión y la velocidad del pulso ultrasónico.

### 1.2.2 Específicos:

- ✚ Establecer la influencia del contenido de agua sobre la velocidad del pulso ultrasónico en diferentes tiempos de curado.
- ✚ Determinar el efecto del contenido de agua del concreto sobre la resistencia a la compresión a diferentes tiempos de curado.
- ✚ Correlacionar el contenido de agua, la resistencia a la compresión y la velocidad del pulso ultrasónico.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

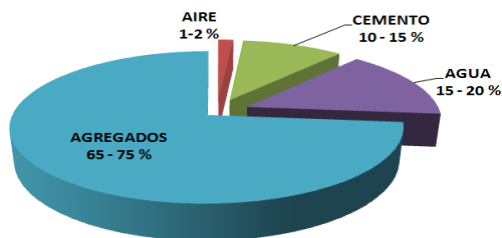
### 2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

El concreto es una mezcla que por medio de complejas reacciones químicas de hidratación entre el agua y el cemento, llegan a endurecerse y a formar un sólido capaz de soportar grandes esfuerzos a compresión, pero bajos frente a los esfuerzos de tensión; razón por la cual se refuerzan de tal forma que en conjunto, puede absorber todo tipo de esfuerzos (compresión, tensión o flexión), lo que le permite desempeñarse como un gran material estructural [7].

Su velocidad de fraguado, facilidad de colocación, apariencia adecuada según su aplicación e impermeabilidad, hacen del concreto aún más versátil y sobre todo más económico que otros materiales de construcción.

**2.1.1 Componentes de la mezcla:** La mezcla de concreto se compone de un material aglutinante (cemento), un material de relleno (agregados finos y gruesos), agua y aire que queda atrapado dentro de la mezcla; de la cantidades, propiedades y efectos de cada uno de ellos, depende el comportamiento del concreto y sus propiedades finales. En la figura 1 se muestra aproximadamente las proporciones por volumen de concreto según referencias consultadas<sup>[37]</sup>.

**Figura 1:** Proporciones aproximadas de la mezcla por volumen de concreto.



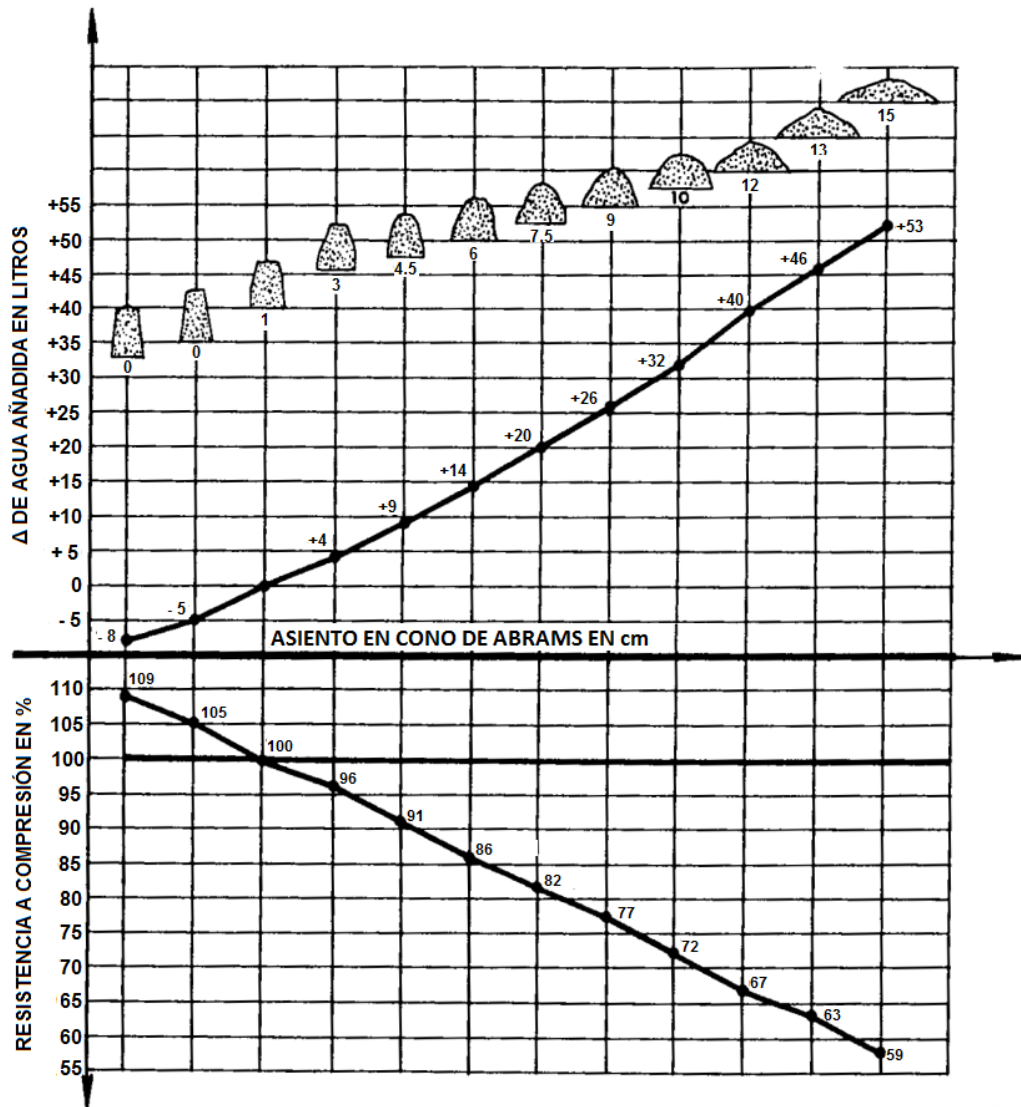
Fuente: Los Autores.

**2.1.1.1 Cemento:** El Cemento es el producto de la molienda entre el clinker y el yeso (algunas veces adiciones de Puzolana, escoria, etc.). Hoy en día el conocimiento sobre el cemento en cuanto a composición, características y comportamiento, permite fabricar cementos con propiedades específicas. Se clasifican de acuerdo a la norma NTC 30<sup>[20]</sup>, la cual sigue los lineamientos de la norma ASTM C 150<sup>[5]</sup>; para el presente trabajo de investigación, se utilizó cemento portland tipo I usado generalmente en estructuras, edificios, prefabricados, pisos, etc.

**2.1.1.2 Agua:** El agua en la mezcla tiene dos funciones muy importantes, por un lado, participa en las reacciones de hidratación del cemento, desarrollando su capacidad ligante; por el otro, confiere al concreto la manejabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.

**a) Agua de mezclado:** se adiciona junto con los agregados y el cemento. Al mezclarla con el cemento, se crea una pasta hidratada que permite una lubricación adecuada cuando se encuentra en estado plástico el concreto y a partir de esta, ocurren una serie de reacciones produciendo un gel de cemento. El agua influye en la resistencia final del concreto y la consistencia de la mezcla (figura 2), por lo cual, la cantidad de agua debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, ya que el agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos (poros capilares) que disminuirán la resistencia; pero tampoco debe disminuirse excesivamente puesto que pueden obtenerse masas poco trabajables.

**Figura 2.** Influencia de un exceso de agua de la mezcla en la resistencia y la consistencia.



Fuente: hormigón armado 14 edición.

**b) Agua de curado:** es el agua suministrada después que ha fraguado el concreto; esta agua garantiza la completa hidratación de los granos de cemento, manteniendo saturado el concreto hasta que los productos de la hidratación ocupen los espacios donde se encontraba el agua de saturación.

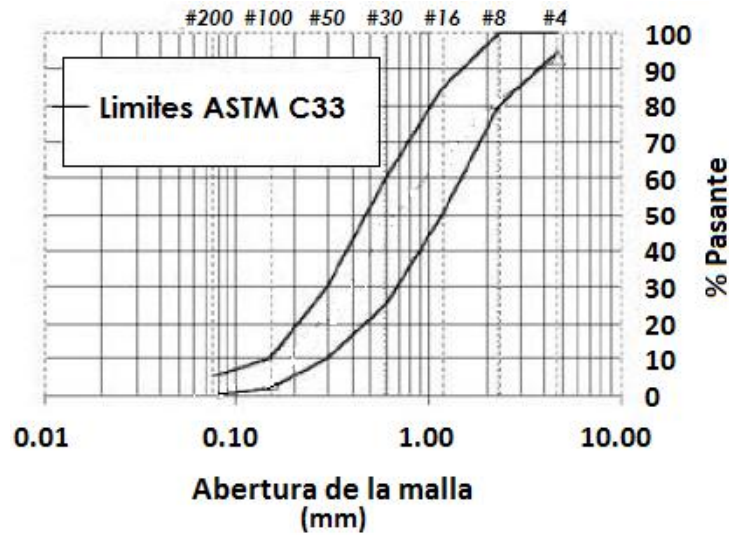
Tanto en el agua de mezclado como en el agua de curado, no solo importan las cantidades sino también su calidad fisicoquímica, por ello, deben estar dentro de ciertos parámetros establecidos en la norma NTC 3459<sup>[19]</sup>, para un eficaz desempeño de su función. Algunos factores<sup>[16]</sup> que inciden en la calidad del agua utilizada en la elaboración del concreto se exponen a continuación:

- La concentración de sólidos disueltos deben ser inferior a 2000 ppm, de lo contrario puede afectar la resistencia del concreto.
- La presencia de Carbonatos o Bicarbonatos de Sodio y de Potasio en el agua, puede hacer que reaccionen con el cemento y produzcan un rápido fraguado (una alta cantidad afecta la resistencia).
- La presencia de cloruros, puede producir corrosión en la estructura.
- Los sulfatos de sodio deben estar en una proporción menor a 10.000 ppm para evitar el ataque por sulfatos.
- Un pH mayor a 3 para evitar los problemas de manejo de la mezcla.

**2.1.1.3 El agregado fino:** El agregado fino o arena actúa como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos dándole manejabilidad al concreto; una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado.

Un buen agregado fino debe cumplir ciertas requisitos especificados en la norma ASTM C33<sup>[6]</sup> como: contar con un modulo de finura entre 2,3 y 3,1 para evitar segregación del agregado grueso cuando la arena es muy fina u obtienen mezclas ásperas cuando la arena es muy gruesa (por esta razón deben ser bien gradados para que puedan llenar todos los espacios y producir mezclas más compactas); además, se tiene en cuenta la presencia de materia orgánica, arcillas y otras sustancias perjudiciales en la arena, que puedan llegar a interrumpir parcial o totalmente el proceso de fraguado del cemento. En la figura 3 se puede observar los límites de granulometría dentro de los cuales deben estar los agregados finos.

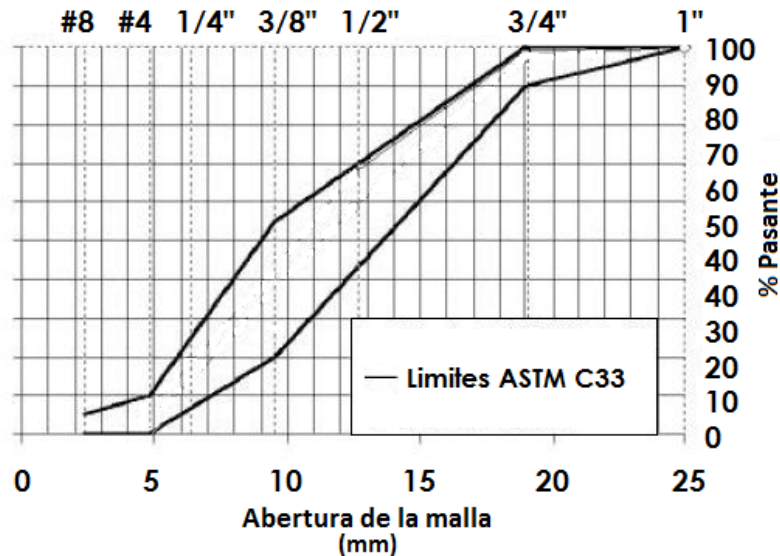
**Figura 3.** Granulometría de los agregados finos.



Fuente: <http://www.scielo.org.mx/img/revistas/iit/v7n3/a02f3.jpg>

**2.1.1.4 Agregado grueso:** muchas de las características del concreto dependen de sus propiedades, de allí la importancia de una buena gradación con tamaños intermedios entre 2 y 64 mm <sup>[15]</sup>; la falta de de dos o más tamaños sucesivos puede producir problemas de segregación. Deben poseer un tamaño máximo adecuado a las condiciones de la estructura y se debe evitar el uso de agregados planos o alargados que puedan producir bajas masas unitarias, baja resistencia mecánica y tendencia a colocarse horizontalmente formándose bajo su superficie, bolsas de agua que dejan espacios vacíos después del fraguado, trayendo como consecuencia una notable reducción de la resistencia del concreto. Se recomienda una densidad aparente entre 2.3 y 2.9 gr/cm<sup>3</sup> <sup>[15]</sup>, que mejora su calidad, su absorción (1 a 5%), su durabilidad y la resistencia al desgaste (100 N/mm<sup>2</sup>). Finalmente el agregado grueso debe tener una superficie rugosa, limpia y sin capa de arcilla. En la figura 4 se muestra los límites entre los cuales deben estar los agregados gruesos.

Figura 4. Granulometría de los agregados gruesos.



Fuente: <http://www.scielo.org.mx/img/revistas/iit/v7n3/a02f3.jpg>

**2.1.1.5 Aire:** Cuando el concreto es mezclado, es imposible evitar que el aire quede atrapado; por ello, la importancia de realizar una buena compactación durante el proceso de fabricación de las muestras de concreto, que ayuda a reducir la cantidad de aire incorporado, evitando espacios vacíos (diámetros mayores a 1 mm) que disminuyen la resistencia, reducen el área efectiva de los elementos y causan mal aspecto [7].

**2.1.2 Propiedades del concreto:** el concreto puede encontrarse en estado fresco o en estado endurecido y es muy importante conocer las características en cada uno ellos, ya que éstas determinan su desempeño.

**2.1.2.1 Estado fresco:** Las propiedades tales como manejabilidad, contenido de agua, contenido de aire, segregación, exudación y masa unitaria, deben permitir un

adecuado llenado (moldes o las formaletas) y una masa homogénea con mínimas cantidades de burbujas de aire y agua atrapada. Es importante no olvidar realizar controles de calidad a estas propiedades, ya que son la única herramienta para tomar decisiones rápidas durante su colocación y obtener las propiedades adecuadas en estado endurecido y garantizar su calidad. En la tabla 1 presentan algunas generalidades de las propiedades.

**Tabla 1.** Propiedades del concreto en estado fresco.

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
NOMBRE	GENERALIDADES
<b>Manejabilidad</b>	Hace referencia al trabajo necesario para vencer la fricción entre los componentes durante el proceso de fabricación, transporte, colocación, compactación y acabado.
<b>Segregación</b>	Consiste en la separación del agregado grueso y los demás componentes, dejando de ser su distribución y comportamiento uniforme y homogéneo.
<b>Exudación</b>	Es otro tipo de exudación, en la cual el agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del concreto recién colocado, es debido a que los componentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua durante el proceso de fraguado.
<b>Masa Unitaria</b>	El control de esta propiedad, principalmente se emplea para poder determinar el rendimiento real de la mezcla de concreto.
<b>Contenido de Aire</b>	Se ubica en los poros no saturables de los agregados, forman burbujas entre los componentes del concreto. El aire es atrapado durante el mezclado o incorporados intencionalmente.
<b>Contenido de Agua</b>	Su control es muy importante puesto que ayuda a tener una estimación de resistencia y durabilidad una vez frague y endurezca y confirmar si la relación agua- cemento es acorde a la diseñada.

Fuente: Los Autores<sup>1</sup>.

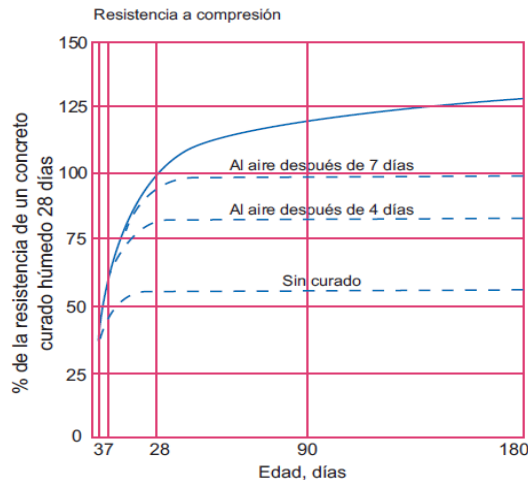
<sup>1</sup> Información basada de: Asociación Colombiana De Productos De Concreto-ASOCRETO. Tecnología y Propiedades. Segunda Edición. 1997.

En la práctica y para el presente trabajo de investigación, se usó como criterio de aceptación del concreto en estado fresco, el ensayo de asentamiento (Cono de Abrams) para la manejabilidad del concreto; basados en la norma NTC 396<sup>[23]</sup>. El asentamiento es una medida de la consistencia y hace referencia a la fluidez del concreto en estado plástico, indicando que tan seca o húmeda está la mezcla.

**2.1.2.2 Endurecido:** Las propiedades físicas adquiridas durante la etapa de curado por el concreto, lo hacen un material de gran aplicación. Dentro esas propiedades se destaca principalmente su desempeño a la compresión, sin desconocer aquellas como la porosidad y el módulo elástico, entre otras.

**a) Resistencia a la compresión:** Su determinación brinda un medio de evaluar la calidad del concreto y se define como la máxima resistencia a carga axial que soporta. Normalmente se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (MPa ó en  $\text{kgf/cm}^2$ ). El factor clave que influye de manera significativa en la resistencia a la compresión, es la relación a/c; también intervienen otros como el tipo y calidad del cemento, características de los agregados, condiciones de humedad durante el curado y edad del concreto. En la figura 5 se presenta la influencia del curado sobre la resistencia final a la que puede llegar el concreto; observándose que al curar permanentemente al aire, se producen menores resistencias a la compresión y a medida que aumenta el tiempo que permanece en curado húmedo, también se incrementa la resistencia a la compresión desarrollada por el material<sup>[9]</sup>.

**Figura 5.** Resistencia a la compresión en función de la edad, para una variedad de condiciones de curado.



Fuente: [http://www.sika.com.co/co-curado\\_concreto.pdf](http://www.sika.com.co/co-curado_concreto.pdf)

**2.1.3 Proceso de fabricación del concreto:** En el proceso de fabricación del concreto se pueden distinguir dos etapas: durante la primera etapa (etapa previa a la elaboración de la mezcla) se realiza una caracterización de los materiales, con la cual, se llega a conocer la información necesaria para realizar un adecuado diseño de mezcla, buscando principalmente un concreto fácil de trabajar, con buena resistencia a la compresión, buena durabilidad y sobre todo económico. En la segunda etapa, se elabora la mezcla seguida del fraguado, donde se pasa de un comportamiento plástico a uno elástico (algunos factores que inciden en el tiempo de fraguado son la composición química, la finura del cemento, la cantidad de agua de mezclado y la temperatura ambiente a la que es sometida la mezcla). Por último, la etapa de curado es de especial interés para la presente investigación; durante este proceso, el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece a través del tiempo como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor<sup>2</sup>. Sin embargo,

<sup>2</sup> ACI Committee 308 R "Guide to Curing Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 2001.

es importante contar con suficiente disponibilidad de agua, puesto que las reacciones de hidratación solo son posibles en espacios saturados, donde seguirán ocurriendo, hasta que los espacios disponibles de los poros se llenen de productos de la hidratación o hasta que no haya mas cemento para hidratar.

**2.1.4 Química del concreto:** Consiste en el estudio de las distintas reacciones que se llevan a cabo durante el fraguado y el endurecimiento del concreto. Desde el punto de vista químico, el objetivo que tienen las materias primas del cemento al entrar en contacto con el agua, es interactuar entre sí, hasta lograr como producto final una roca artificial endurecida.

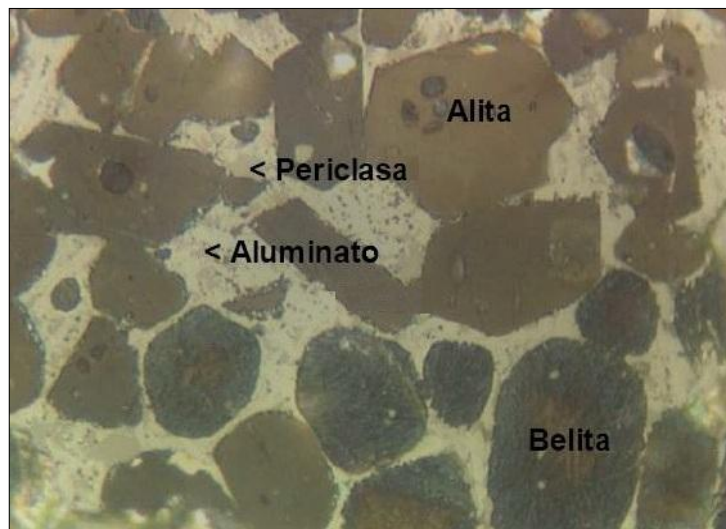
Un aspecto a tener en cuenta, es que los compuestos del cemento nunca se encuentran en estado puro; razón por la cual fue necesario dar un nombre a esas formas impuras comúnmente conocidas como fases:

- Alita: con alto contenido de Silicato Tricálcico  $\text{Ca}_3\text{SiO}_2$ , es la principal fase del clinker y de ella depende en muy buena parte la resistencia mecánica. Al ponerse en contacto con el agua, se endurece en corto tiempo presentando un alto calor de hidratación, que afecta la resistencia inicial y el fraguado.
- Belita: Tiene un alto contenido de Silicato Bicálcico  $\text{Ca}_2\text{SiO}_2$ , que al entrar en contacto con el agua reacciona lentamente. Posee un bajo calor de hidratación y aporta a la resistencia del concreto solo a partir del séptimo día de fabricación.
- Celita o aluminatos: Tiene alto contenido de Aluminato Tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) con algunas inclusiones de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{MgO}$ . Contribuye con un alto calor de hidratación y una alta resistencia inicial. Sus contenidos se limitan entre el 5-15%, por que confiere al concreto propiedades negativas, como la disminución de la resistencia al ataque de sulfatos y producir cambios volumétricos.

- Otras fases menores como la cal libre (CaO), la periclasa (MgO),  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ , están también presentes. La principal atención hay que dirigirla hacia las fases  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , también conocidas como álcalis, por que reaccionan con algunos agregados creando productos que desintegran el concreto y afectan la velocidad con que adquieren la resistencia.

Las fases Alita y Belita representan un 75% del cemento y son las que determinan el desarrollo de la resistencia del concreto <sup>[7]</sup>. En la figura 6 se puede observar las tres fases principales del cemento y las tablas 2 y 3 presentan un resumen de las características de los componentes del cemento, su formula química y las proporciones presentes.

**Figura 6.** Fases Belita, Aluminato (Celita) y Alita en el concreto.



Fuente: CEMENTO PORTLAND. GENERALIDADES<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Tomada de: <<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/Guia-Quimica-Industrial-II-Cal-Cemento.pdf>>.

**Tabla 2.** Fases, proporciones y formulas químicas de los compuestos del cemento.

COMPUESTO	FORMULA QUÍMICA	FORMULA ABREVIADA	FORMA IMPURA	%
<i>Silicato tricálcico</i>	$(\text{CaO})_3 \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Alita	45-75
<i>Silicato dicálcico</i>	$(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Belita	7-32
<i>Aluminato tricálcico</i>	$(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Celita	0-13
<i>ferroaluminato tetracálcico</i>	$(\text{CaO})_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$		0-18
<i>Yeso</i>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$		2-10

Fuente: Los Autores<sup>4</sup>.

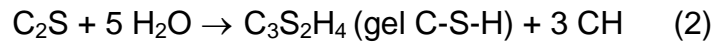
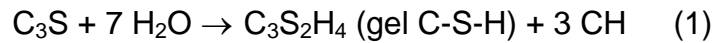
**Tabla 3.** Compuestos del clinker y sus características.

PROPORCIÓN DE COMPONENTE	FRAGUADO	RESISTENCIA	CONTRIBUCIÓN RESISTENCIA	CALOR DE HIDRATACIÓN	ESTABILIDAD QUÍMICA
$\text{C}_3\text{S}$	Rápido	Rápido	Alto a poca edad	Alto	Buena
$\text{C}_2\text{S}$	Lento	Lento	Alto a mayor edad	Regular	Muy Buena
$\text{C}_3\text{A}$	Muy Rápido	Muy Rápido	Poco	Muy alto	Mala
$\text{C}_4\text{AF}$	Lento	Lento	Muy poco	Bajo	Buena

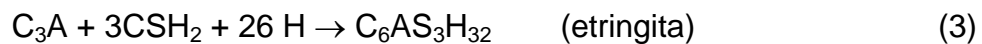
Fuente: Cementos BIO BIO<sup>[11]</sup>.

**2.1.4.1 Reacciones químicas del concreto:** Para garantizar que ocurran las reacciones de hidratación, es necesario mantener la temperatura del concreto por encima de los 5°C. La hidratación de los silicatos de calcio forma un tipo de gel hidratado (C-S-H) e Hidróxido de Calcio (CH), de acuerdo con las reacciones (1) y (2). Este gel frágil, amorfo y poroso se convierte en la matriz del concreto contribuyendo a la resistencia.

<sup>4</sup> Información basada en: <[http://translate.google.com.co/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Portland\\_cement](http://translate.google.com.co/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Portland_cement)>



Las reacciones de los aluminatos y ferroaluminatos ocurren en dos etapas, como se presenta en (3) y (4): en la primera, el yeso ( $\text{CSH}_2$ ) actúa como retardante del fraguado, dando origen al  $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$  – etringita ( $\text{Af}_t$ ), que crece en forma de agujas hasta que se consume todo el yeso. En la segunda etapa, los aluminatos reaccionan con la etringita para formar los  $3\text{C}_4\text{ASH}_{12}$  - monosulfoaluminatos ( $\text{Af}_m$ ), que se alojan en los poros de la matriz de C-S-H al igual que el Hidróxido de Calcio (CH).

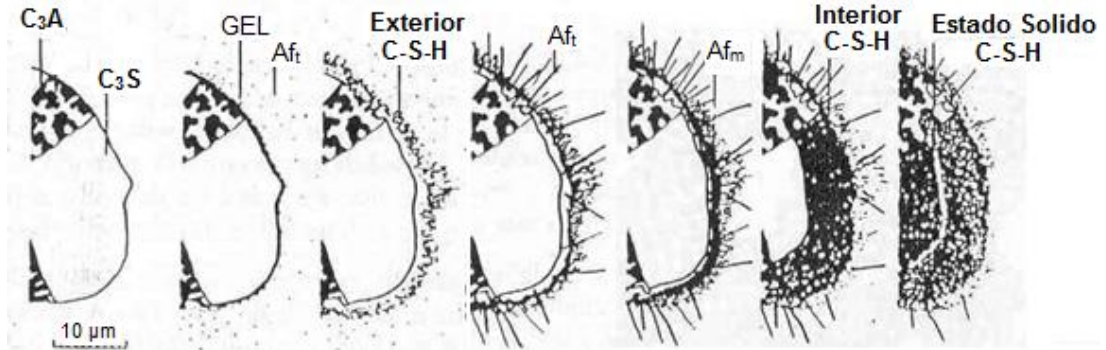


Durante las reacciones de ferroaluminatos de calcio se generan más Hidróxidos de calcio e Hidróxidos de hierro (III), como se muestra en (5) y (6).



En la figura 7 se muestra un resumen ilustrado del proceso de hidratación de un grano de cemento con los productos internos y externos.

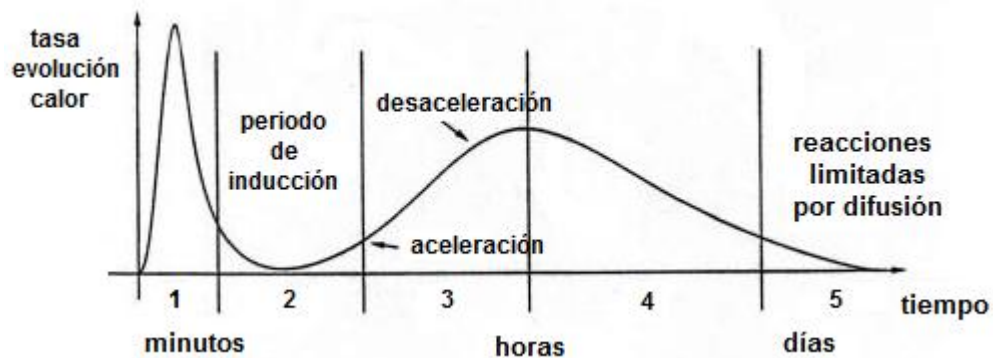
**Figura 7.** Productos internos y externos de un grano de cemento.



Fuente: Material: Cemento portland. Ing. Ernesto F. Bravo e Ing. Antonio E. Cornejo

La hidratación no ocurre a una tasa fija, en la figura 8 se pueden observar 5 etapas en la hidratación de cemento: la primera comprende una preinducción en la cual, ocurre una hidratación rápida al entrar en contacto las partículas de cemento con el agua, liberando una gran cantidad de calor. En la segunda etapa llamada inducción, ocurre una reducida hidratación. La tercera etapa presenta una aceleración al comenzar el proceso de fraguado del concreto, posteriormente, la cuarta etapa consiste en una desaceleración de la hidratación a medida que el material hidratado cubre las partículas. Por último, las reacciones se ven limitadas por la lenta difusión de las especies dentro de la densa red de poros<sup>[35]</sup>.

**Figura 8.** Etapas en la hidratación del cemento.



Fuente: Microestructura del cemento<sup>[35]</sup>.

## 2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Tienen como objetivo conocer la calidad del concreto sin que resulte afectada la estructura y son materia de continuo estudio y desarrollo. Existen gran variedad de ensayos no destructivos, pero cada uno de ellos van encaminados a determinar ciertas características (dureza, densidad, módulo elástico, etc), que a su vez permiten obtener una estimación de la resistencia del concreto. Hoy en día los que presentan un desarrollo más importante, son los métodos Esclerométricos, de resonancia y VPU, siendo este último método el usado para el presente trabajo de investigación:

**2.2.1 VPU:** La medición de la velocidad ultrasónica, es un método alternativo para evaluación de concretos y se empezó a desarrollar hace más de medio siglo. En la actualidad, esta técnica es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su simplicidad y versatilidad. El carácter heterogéneo del concreto, provoca gran variabilidad en sus propiedades físicas; dando lugar a que no exista un único valor de la velocidad para cada valor de la resistencia a la compresión<sup>[40]</sup>.

La onda se propaga en el concreto a partir de excitaciones vibratorias de forma longitudinal o de compresión, transversal o cortante y superficial o de Rayleigh; estas se ven influenciadas por aquellas propiedades del concreto que determinan su comportamiento elástico y su resistencia mecánica. Igualmente, a medida que el concreto madure o se deteriore, los cambios que ocurren con el tiempo en la estructura se reflejan en un incremento o reducción de la VPU<sup>[26]</sup>.

La propagación de las ondas sonoras está vinculada a la materia, de manera que debe existir un material sólido, líquido o gaseoso, para que ocurra. Dicho de otra forma, la onda sonora no es más que la propagación de las vibraciones de las partículas del material elástico. En líquidos y gases solo pueden propagarse ondas longitudinales; ya que estos medios no ofrecen ninguna resistencia a los esfuerzos

cortantes, las ondas transversales (ondas de corte) no pueden hacerlo. En materiales sólidos, se pueden propagar ondas longitudinales y transversales, así como todas sus combinaciones.

Si una onda incide normalmente en la interfase de dos materiales, una parte de la energía es transmitida al otro material, mientras que otra parte será reflejada. Las proporciones de energía transmitida y reflejada dependen de la impedancia de los dos materiales <sup>[14]</sup>. La impedancia acústica se puede calcular como:

$$Z = \rho * C \quad (7)$$

Donde, **Z** = impedancia acústica  
**ρ** = densidad del material del medio considerado.  
**C** = velocidad del sonido del medio considerado.

Si la impedancia acústica de los dos medios son iguales ( $Z_1 = Z_2$ ), no hay reflexión y el sonido pasa a través de la interfase sin alterarse <sup>[14]</sup>.

Un aporte muy importante se realizó en 1985 por el señor V. Mohan Malhotra, quien por primera vez, introdujo un criterio de aceptación de los concretos en base a la VPU como se muestra en la tabla 4. Durante muchos años, se ha tratado de obtener un modelo que permita predecir la resistencia con base en la VPU, pero por la influencia de múltiples factores como diferencias en los agregados y en las proporciones de la mezcla, así como la falta de controles en las obras de construcción, se ha llegado a varios modelos diferentes sin establecerse un único modelo de comportamiento.

**Tabla 4.** Clasificación del concreto según la velocidad de pulso

<i>Velocidad de la onda longitudinal (m/s)</i>	<i>Condición del hormigón</i>
$V > 4\ 575$	Excelente
$4\ 575 > V > 3\ 660$	Bueno
$3\ 660 > V > 3\ 050$	Cuestionable
$3\ 050 > V > 2\ 135$	Pobre
$V < 2\ 135$	Muy pobre

Fuente: Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno y William R. Castillo <sup>[40]</sup>.

Esta técnica puede ser aplicada para determinar la uniformidad del concreto en un elemento o entre elementos, la medición de cambios en las propiedades del concreto a través del tiempo, la correlación de la VPU con la resistencia mecánica del concreto, el modulo elástico, el modulo dinámico de poisson, la detección de grietas, vacios y otros defectos.

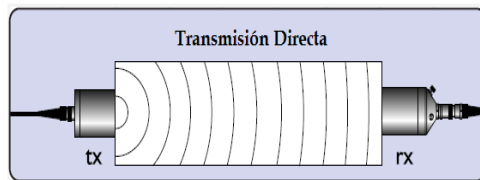
**2.2.1.1 Principio de la técnica:** El pulso de vibraciones longitudinales es producido por un transductor electroacústico (emisor) y luego de atravesar una longitud conocida (L), el pulso de vibraciones es convertido por otro transductor electroacústico (receptor) en una señal electroacústica. Circuitos electrónicos dentro de los aparatos de medición permiten calcular el tiempo de transito del pulso (T). La velocidad de pulsa (V) se expresa normalmente en km/s o m/s y viene dada por la expresión:

$$V = \frac{L}{T} \quad (8)$$

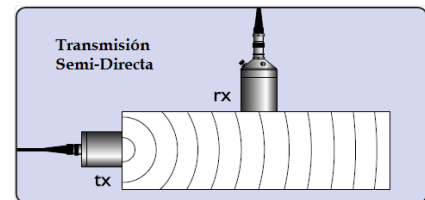
Donde:        L: Longitud de la trayectoria  
                  T: Tiempo requerido por el pulso para atravesarla

Bajo este principio actúan los equipos para las mediciones de VPU, incluido el Modelo PUNDIT Pluss, producido por CNS Farnell utilizado en el presente trabajo de investigación. Estos equipos transmiten ondas mecánicas de baja frecuencia y utilizan transductores cuyo rango varía entre los 25 a 150 kHz para la realización de los ensayos de VPU en concretos.

Los métodos por los cuales se puede medir la velocidad de pulso ultrasónico son: directo, indirecto y semidirecto. Para el presente trabajo de investigación, se utilizó el método directo para tomar las VPU en las probetas de concreto. En las figuras 9, 10 y 11, se presenta la posición de los palpadores para cada método.

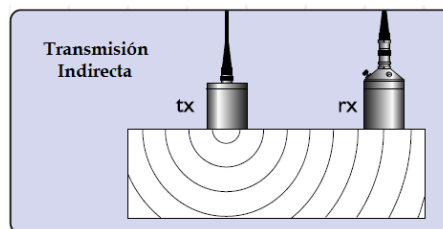


**Figura 9.** Método directo



**Figura 10.** Método semi-directo

**Figura 11.** Método indirecto



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

De ser posible, se recomienda usar siempre el **método directo**, puesto que la energía entre los transductores o palpadores es máxima y la precisión de la medición solo depende de la exactitud con que se mida longitud de la trayectoria.

**2.2.1.2 Factores que afectan la VPU:** si se quieren obtener resultados reproducibles y que dependan exclusivamente de las propiedades del concreto, es necesario tener en cuenta ciertos factores como la humedad, la temperatura del concreto, la longitud de la trayectoria, la forma y el tamaño de los especímenes, contenido, tipo y tamaño de los agregados, tipo de cemento, relación a/c y edad del concreto <sup>[33]</sup>.

**a) Contenido de humedad:** Su influencia se debe principalmente al efecto de las diferentes condiciones de curado en la hidratación del cemento y otras a la presencia de agua libre en los poros. Es importante que estos efectos sean cuidadosamente considerados al estimar la resistencia.

**b) Temperatura del concreto:** las variaciones en la temperatura no tienen un efecto significativo sobre la velocidad de pulso ultrasónico, siempre y cuando se encuentren dentro de un rango de 10°C a 30°C <sup>[33]</sup>. Existen algunas correlaciones que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Efecto de la temperatura en la transmisión de pulso ultrasónico.

Temperatura	Factores de correlación en la medida de VPU	
	Concreto Seco al Aire	Concreto Saturado en Agua
°C	%	%
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

Fuente: Handbook Nondestructive Testing Concrete.

**c) Longitud de la trayectoria:** el efecto de los cambios en la longitud de la trayectoria sobre la velocidad de pulso, no es tenido en cuenta; pero cuando la longitud de la trayectoria es muy pequeña, la VPU se ve influenciada debido a la heterogeneidad natural del concreto. Se recomienda que para concretos con tamaño máximo nominal de 20 mm o menores la trayectoria mínima sea de 100mm y para agregados entre 20 mm y 40 mm sea de 150 mm <sup>[33]</sup>.

**d) Forma y tamaño del espécimen:** La velocidad de pulso es independiente de la forma y el tamaño del espécimen, siempre y cuando la menor dimensión lateral del elemento sea mayor que la longitud de onda del pulso; por debajo de este valor, la VPU puede verse reducida considerablemente; esta reducción depende de la relación entre la menor dimensión lateral y la longitud de la onda. La tabla 6 que se presenta a continuación, relaciona la mínima dimensión que debe tener el espécimen de acuerdo a la frecuencia de los transductores y la velocidad de pulso <sup>[33]</sup>.

**Tabla 6.** Efecto de las dimensiones del espécimen en la transmisión de pulso.

<i>Frecuencia del Transductor</i>	<i>Velocidad de Pulso en el Concreto (km/s)</i>		
	<i>V<sub>c</sub> = 3,5</i>	<i>V<sub>c</sub> = 4,0</i>	<i>V<sub>c</sub> = 4,5</i>
	<b><i>Dimensión Lateral Mínima permisible</i></b>		
<b>kHz</b>	mm	mm	mm
<b>24</b>	146	167	188
<b>54</b>	65	74	83
<b>82</b>	43	49	55
<b>150</b>	23	27	30

Fuente: Norma Técnica Colombiana norma NTC 4325

**e) Tamaño de los agregados, tipo y contenido:** La velocidad de pulso es afectada significativamente por el tipo y la cantidad de agregados. Para una

misma mezcla de concreto y con la misma resistencia a la compresión, concretos con agregados redondeados presentan las velocidades de pulso más bajas, mientras que las piedras trituradas las más altas <sup>[32]</sup>. Las velocidades de pulso son mayores en los agregados que en la pasta de cemento.

**f) Tipo de cemento:** en la presente investigación no tiene influencia significativa sobre la velocidad de pulso, ya que se trabajó con un solo tipo de cemento. Lo que si influye es el índice de la hidratación para diversos cementos, pues si el grado de hidratación aumenta, el módulo de la elasticidad y la velocidad del pulso también lo harán <sup>[33]</sup>.

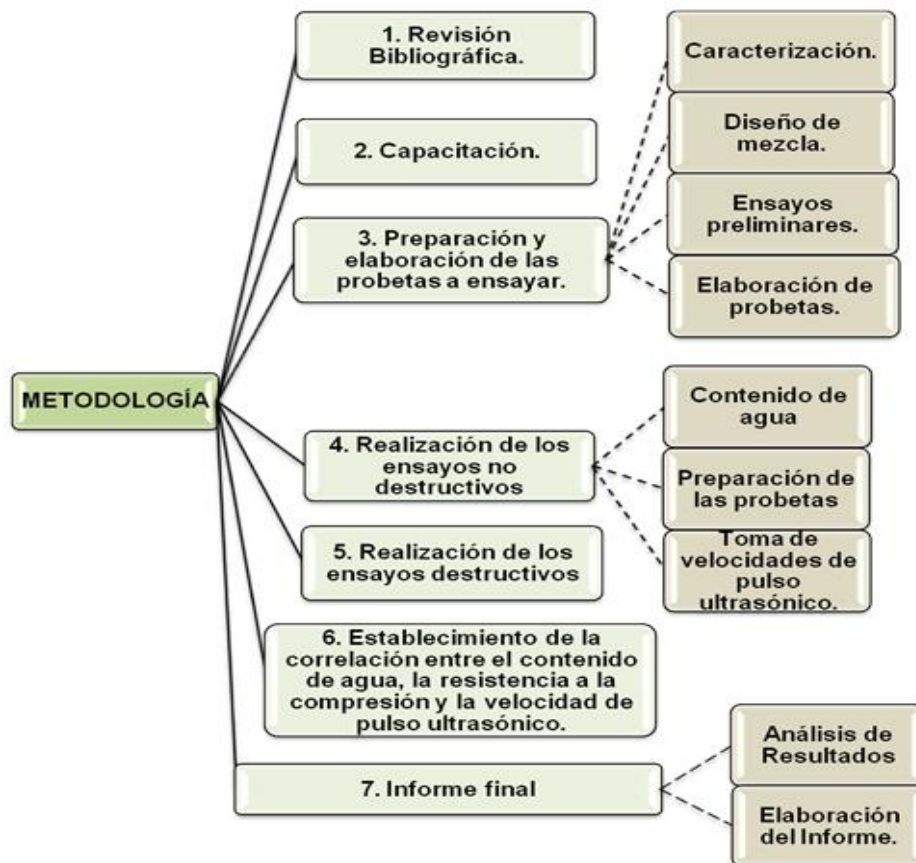
**g) Relación a/c:** tiene una relación inversamente proporcional, es decir, un aumento en la relación a/c lleva a una disminución en la velocidad de pulso, en la resistencia a la compresión y en la flexión <sup>[33]</sup>.

**h) Edad del concreto:** el comportamiento de la velocidad de pulso frente a la edad del concreto, es similar al de la resistencia contra el tiempo, primero presenta un aumento rápido y posteriormente se estabiliza <sup>[33]</sup>.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología que se planteó para el desarrollo del presente trabajo consta de siete etapas: Revisión bibliográfica, Capacitación, Preparación y Elaboración de las probetas a ensayar, Realización de los ensayos no destructivos y destructivos, Establecimiento de la correlación entre el contenido de agua, la resistencia a la compresión y la velocidad del pulso ultrasónico; por último el Informe final. A continuación en la figura 12 se presentan detalles de cada una de las etapas desarrolladas.

**Figura 12.** Esquema detallado de la metodología experimental seguida en el proyecto.



Fuente: Los Autores.

### 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa se llevó a cabo durante todo el desarrollo del proyecto. Se analizó la información hallada en artículos, libros, normas técnicas, trabajos de grado e información en Internet; lo cual permitió adquirir y afianzar conocimientos sobre los concretos y técnicas tanto destructivas (resistencia a la compresión) como no destructivas (velocidad de pulso ultrasónico, VPU) empleadas para la evaluación del material. Adicionalmente se estudiaron las variables que influyen en los resultados obtenidos con estas técnicas.

### 3.2 CAPACITACIÓN

Para el desarrollo del presente proyecto fue necesario realizar un entrenamiento en el manejo adecuado del equipo de ultrasonido de baja frecuencia, para evaluación de concretos, **CNS FARNELL PUNDIT plus**, modelo PC 1006 (figura 13), existente en el laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Esta etapa se desarrolló durante un período de dos meses.

**Figura 13.** Equipo de ultrasonido FARNELL PUNDIT plus, modelo PC 1006



Fuente: <http://www.jroma.pt/images/punditplus.jpg>

### **3.3 PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE PROBETAS A ENSAYAR**

Para llevar a cabo esta etapa se realizaron las siguientes actividades: Identificación y caracterización de materiales, diseño de mezcla, ensayos preliminares y elaboración de probetas. A continuación se presentan detalles de cada una de ellas.

**3.3.1 Identificación y caracterización de materiales:** Para la elaboración de las probetas se utilizaron los siguientes materiales: Cemento Portland Tipo I (comercial), Agregado grueso y fino color gris, proveniente de Pescadero (Santander) y Agua Potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Las pruebas realizadas a cada uno de los materiales se indican a continuación:

**3.3.1.1 Cemento Portland tipo I:** a este material se le determinó su peso específico de acuerdo con la norma NTC 221, los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

**3.3.1.2 Agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga:** el análisis de calidad del agua utilizada en este proyecto cumple con los requerimientos de la norma NTC 3459 y se presenta en el siguiente capítulo. La información fue tomada desde el sitio web: [www.amb.com.co](http://www.amb.com.co), del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

**3.3.1.4 Agregado grueso:** a este material se le determinó las gravedades específicas y el porcentaje de absorción (normas NTC 176 - ASTM C 127-93), masa unitaria suelta, compactada y % de vacíos (normas NTC 92 - ASTM C 29 M-

92) y finalmente, el tamaño máximo y máximo nominal (normas NTC 77 - ASTM C 136-92).

**3.3.1.5 Agregado fino:** de la misma forma que al agregado grueso, se le realizó el ensayo para las gravedades específicas y el porcentaje de absorción (normas NTC 237 - ASTM C128-93)), masa unitaria suelta, compactada y % de vacíos (normas NTC 92 - ASTM C 29 M-92) y de granulometría (determinación del modulo de finura, normas NTC 77 - ASTM C 136-92). Adicionalmente se determinó la materia orgánica presente (norma NTC 127).

Los resultados obtenidos de todos los ensayos indicados se presentan en el capítulo 4.

**3.3.2 Diseño de mezcla:** De acuerdo a los datos obtenidos en la actividad anterior, se elaboró el diseño de la mezcla de concreto que se empleó para el estudio, con una relación de agua-cemento a/c de 0.5, siguiendo la guía metodológica del laboratorio de caracterización de materiales para construcción. Las especificaciones del diseño se reportan en el capítulo de resultados.

**3.3.3 Ensayos preliminares:** una vez obtenido el diseño de mezcla, se requirió la realización de hasta veinte probetas para adquirir la destreza necesaria en la elaboración de las mismas, con el propósito de reducir errores en el proceso de fabricación. Por esta razón, se adquirieron moldes plásticos prefabricados con el fin de lograr un dimensionamiento uniforme en los cilindros de concreto.

A estas muestras se le aplicaron pruebas tanto destructivas como no destructivas a diferentes tiempos de curado, que permitieron establecer ciertos parámetros de

operación, para la determinación del contenido de agua en las probetas y la preparación de las superficies para la toma de velocidades de pulso ultrasónico VPU. Con el fin de lograr una mejor manipulación de los palpadores y por lo tanto mayor precisión en la lectura de los datos de la velocidad de pulso ultrasónico, se diseñó un dispositivo que garantizara la correcta ubicación de los mismos.

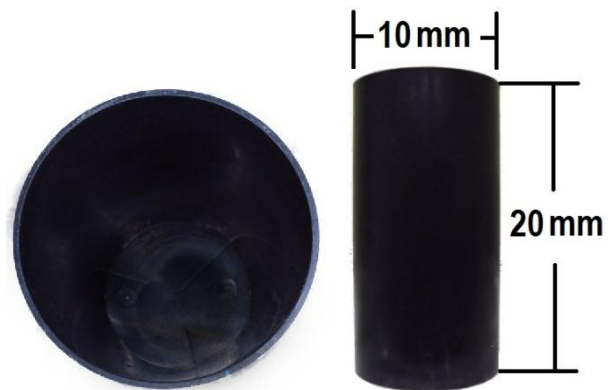
Los resultados obtenidos en esta actividad se presentan en el siguiente capítulo.

**3.3.4 Elaboración de probetas:** terminados los ensayos preliminares y con base en el diseño, se elaboraron de una sola mezcla 37 cilindros con dimensiones de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, de acuerdo con la norma NTC 1377, y se fundieron en moldes plásticos con un tiempo de fraguado de 24 horas (norma NTC 890). Pasado este tiempo, se desencofraron usando un compresor de aire a una presión de 50 Psi (sugerida por el proveedor de los moldes plásticos).

**Fotografía 1.** Compresor Black & Decker



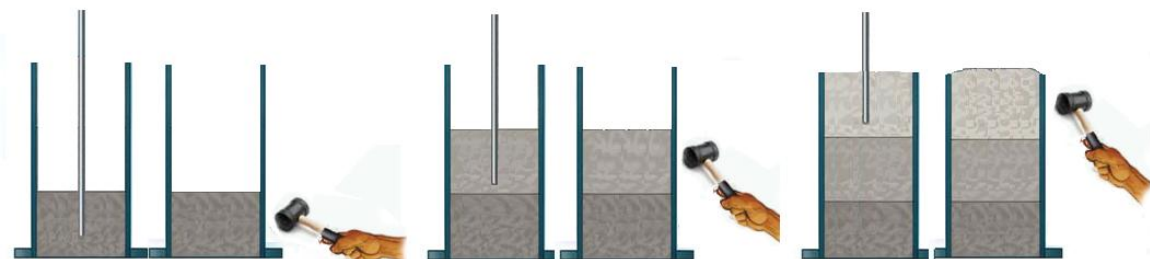
**Fotografía 2.** Moldes plástico



Fuente: Los Autores.

esta actividad se realizó en las instalaciones del centro de caracterización de materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander; a partir de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares y en el diseño de mezcla siguiendo los lineamientos de la norma NTC 1377 de elaboración y curado de las probetas, para cuyo objetivo se procedió de la siguiente manera: se prepararon los materiales de la mezcla de concreto, pesándolos en una balanza, con una precisión de  $\pm 0,001$  kg; posteriormente, los moldes plásticos se recubrieron internamente con una capa ACPM (aceite comprimido para motor), la cual cumple la función de lubricante, facilitando el desencofrado de las probetas. Una vez listo los materiales se procedió a mezclarlos de la siguiente forma: primero, el agregado fino se mezcla con el cemento, luego, se le añade el agregado grueso y por último el agua de la mezcla (un buen mezclado es fundamental para garantizar homogeneidad y mejor consistencia de las probetas). Lista la mezcla se realizó el llenado de los moldes plásticos en 3 capas iguales; cada capa requirió un apisonado de 25 golpes distribuidos uniformemente en el área transversal de la probeta, los cuales fueron dados con una varilla compactadora corta de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud, según lo especifica la norma NTC 1377 para los moldes cilíndricos con esas dimensiones. Adicionalmente, se utilizó el martillo de goma para golpear lateralmente el molde en cada capa, con el fin de eliminar burbujas de aire y llenar los espacios vacíos entre los agregados. En la figura 14, se muestra de forma ilustrada el proceso de elaboración.

**Figura 14.** Proceso de elaboración de las probetas.



Compacte varillando 25 veces uniformemente en cada capa y luego golpee ligeramente los lados del molde de 10 a 15 veces.

Fuente: Los Autores.

Fabricadas las 37 probetas y pasadas 24 horas de fraguado, se desencofraron utilizando un compresor de aire a una presión de 50 psi<sup>5</sup>, como se muestra en la fotografía 3.

**Fotografía 3.** Desencofrado de los moldes plásticos a presión



Fuente: Los Autores.

<sup>5</sup> Presión recomendada por el fabricante de los moldes plásticos.

### **3.4 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

La realización de los ensayos no destructivos (contenido de agua y VPU) se llevaron a cabo para los siguientes tiempos de curado: 2, 3, 6, 9, 14, 21 y 28 días. En cada uno de estos tiempos se ensayaron tres probetas curadas en agua, y dos curadas en condiciones ambientales. Esta etapa se dividió principalmente en tres actividades: Contenido de agua, Preparación superficial de las probetas, y Medida de velocidades de pulso ultrasónico.

**3.4.1 Contenido de agua (CA):** El contenido de agua en las probetas se determinó mediante la diferencia de peso de cada una de las muestras utilizando una balanza electrónica de la siguiente manera:

**3.4.1.1 Probetas curadas en agua:** Cada día de ensayo, se tomaron aleatoriamente tres probetas de la pila y se dejaron escurrir durante cinco minutos, luego de los cuales, se procedió a secar cada una con una lanilla hasta una lograr una SSS, y posteriormente se tomaron los pesos para cada una de ellas.

**3.4.1.2 Probetas curadas al aire:** Paralelamente a las probetas curadas en agua, cada día de ensayo se tomaron aleatoriamente dos probetas y se procedió a leer su peso en la balanza electrónica.

**3.4.2 Preparación superficial de las probetas:** Posteriormente, se preparó la superficie de las probetas puliendo sus caras planas con una piedra de esmeril y lija de agua No. 80, hasta obtener una superficie totalmente lisa y libre de asperezas con el fin de lograr un acoplamiento adecuado de los palpadores (ver fotografía 4). Una vez pulidas, se les tomó el diámetro a cada una de ellas

empleando un calibrador digital ( $\pm 0,01$  mm de precisión) para determinar el área superficial necesaria en el cálculo de la resistencia a la compresión. Estos diámetros fueron promediados y los respectivos valores se encuentran en la tabla 18.

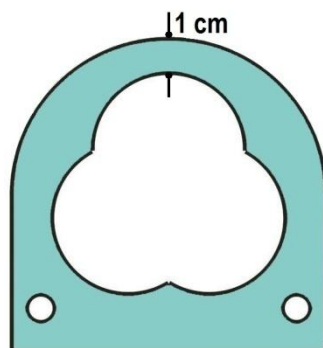
**Fotografía 4.** Preparación superficial de las probetas.



Fuente: Los Autores.

**3.4.3 Medidas de VPU:** Una vez preparadas las probetas, se leyeron las velocidades de pulso ultrasónico en tres puntos de sus caras planas formando un triángulo, teniendo en cuenta que los palpadores se encontraran a un centímetro de distancia del borde del cilindro de acuerdo con la figura 15, con el fin de evitar interferencias. Las velocidades fueron tomadas por el método directo con el equipo de baja frecuencia para concretos **CNS FARNELL** Pundit plus; primero para las probetas curadas en agua, y finalmente aquellas curadas al aire. Se utilizaron palpadores de 54 KHz., de frecuencia, usando vaselina como acoplante y un voltaje de 500 V. En cada punto se tomaron dos lecturas de velocidad de pulso ultrasónico para un total de 6 datos por cilindro (norma NTC 4325). En las fotografías 5 y 6 se observa los palpadores utilizados y la forma en que se miden las VPU.

**Figura 15.** Modelo del dispositivo creado para la correcta ubicación de los palpadores.

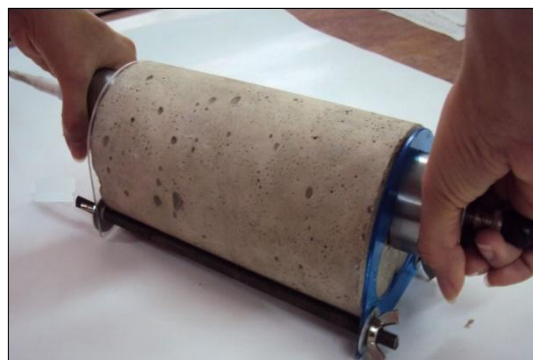


Fuente: Los Autores.

**Fotografía 5.** Palpadores de 54 KHz.



**Fotografía 6.** Toma de VPU



Fuente: Los Autores.

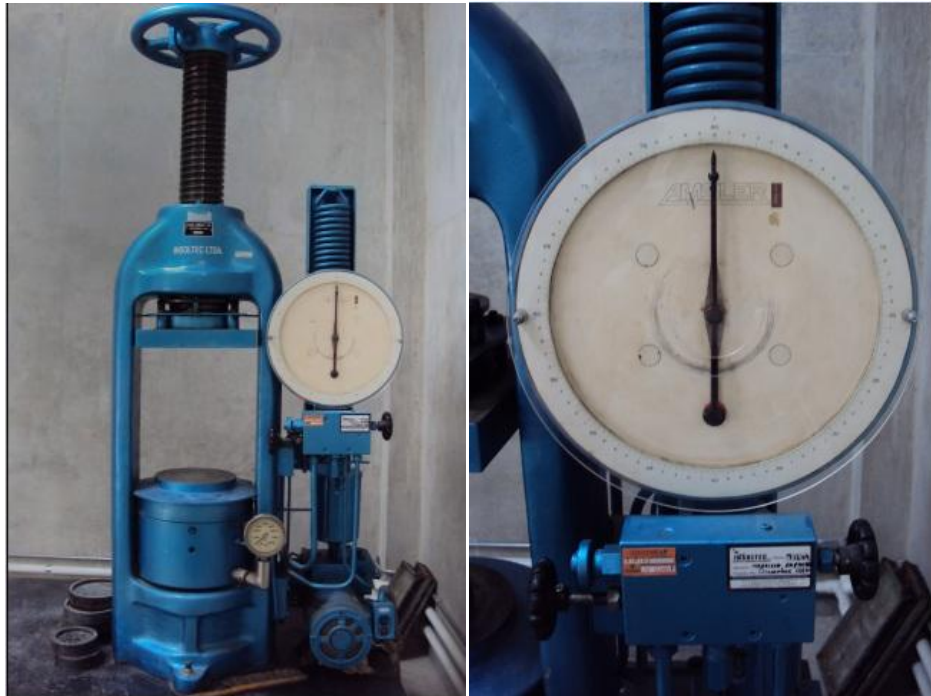
Los resultados obtenidos en esta actividad se presentan el capítulo siguiente.

### **3.5 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

Luego de obtener los valores de VPU, cada una de las probetas curadas en agua se llevaron a una máquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER (figura 7) con un rango de medición de 5 a 80 toneladas; donde se les determinó la resistencia a la compresión. Estos ensayos se realizaron en un tiempo no mayor de 45 minutos para cada cilindro, con el propósito de hacer que los valores de VPU tomados correspondan a la resistencia obtenida en los ensayos destructivos.

Finalmente se ensayaron las probetas curadas al aire, en los tiempos de curado anteriormente establecidos.

**Fotografía 7.** Máquina análoga de ensayos a compresión marca AMSLER



Fuente: Los Autores.

Todos los ensayos de resistencia a la compresión se llevaron a cabo en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil. Las resistencias obtenidas para las probetas curadas en condiciones estándar y ambientales se presentan en las tablas 22 y 24.

### **3.6 ESTABLECIMIENTO DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL CONCRETO, LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO**

Con los datos obtenidos en las etapas anteriores se elaboraron las gráficas necesarias para hallar la correlación entre las variables de interés: contenido de agua del concreto, VPU, resistencia a la compresión, tiempo y condiciones de curado. Las gráficas obtenidas y su respectivo análisis se muestran en el capítulo de resultados.

### **3.7 INFORME FINAL**

Esta etapa constó de dos actividades que se describen a continuación:

**3.7.1 Análisis de resultados:** a partir de las gráficas obtenidas en la etapa anterior, se realizó un análisis de la relación existente entre cada una de las variables y sus cambios durante el proceso de curado. Adicionalmente, se observó el efecto de las condiciones de curado sobre los resultados obtenidos.

**3.7.2 Presentación del informe final:** se establecieron las conclusiones derivadas de las relaciones existentes entre el contenido de agua en el concreto, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico durante el proceso de curado. Por último, se elaboró el informe final.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente investigación y su respectivo análisis de acuerdo con las etapas indicadas en la metodología experimental.

### 4.1 PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR

Los datos obtenidos en las diferentes actividades realizadas en esta etapa: identificación y caracterización de materiales, diseño de mezcla, ensayos preliminares y elaboración de probetas se muestran a continuación.

**4.1.1 Identificación y caracterización de materiales:** los resultados obtenidos para el cemento, el agua y los agregados son los siguientes:

**4.1.1.1 Cemento:** El material utilizado para la elaboración de la mezcla de estudio cumple con las especificaciones físicas, mecánicas y químicas establecidas en nuestro país de acuerdo con las normas NTC 121 Y 321, según información reportada por el fabricante. El peso específico del cemento se determinó aplicando la norma NTC 221, obteniéndose el siguiente resultado:

**Tabla 7.** Características del cemento usado en la preparación de la mezcla.


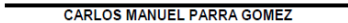
CARACTERÍSTICAS	
CLASIFICACIÓN	Cemento Portland Tipo I
MARCA	CEMEX
PESO ESPECÍFICO	3.03

Fuente: Los Autores.

La determinación del peso específico del cemento fue necesaria para el desarrollo del diseño de mezcla, presentado en la actividad 4.1.2.

**4.1.1.2 Agua:** El agua utilizada en la elaboración de las probetas debe cumplir con los requisitos fisicoquímicos de la norma NTC 3459 [19], la cual sugiere emplear agua limpia y libre de cantidades perjudiciales de cloruros, aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos u otras sustancias que puedan ser dañinas para el concreto o el refuerzo; recomendando evitar el uso de agua impotable, por esta razón, el agua utilizada en el presente estudio, corresponde a la suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), y el análisis de calidad fisicoquímico y microbiológico se presenta en la tabla 8.

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

No Aplica F CC 507-006 Rev.:0		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																			
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																					
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA			AÑO:		2010														
PARAMETROS MES	Parámetros Fisicoquímicos											Parámetros Microbiológicos									
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl <sub>2</sub> /L	Turbiedad UNT	Color aparente UPC	pH	Unidades Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO <sub>3</sub> /L	Dureza mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO <sub>4</sub> /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO <sub>3</sub> /L	Nitritos mg NO <sub>2</sub> /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli	Σ IRCA MENSUAL	
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	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	200	≤50	≤50	0,3	10	0,1	6/día	0	100	0	100	0,5	
Convenciones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable																				
Nota:	El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5. AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.																				
Elaboró:		Uriel Salomon Barragan				Revisó y Aprobó:														CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas	

Fuente: [www.amb.com.co](http://www.amb.com.co) [1].

De acuerdo con la tabla anterior, se observa que el agua empleada cumple con los requerimientos fisicoquímicos de la norma NTC 3459 <sup>[19]</sup>, presentando menos de un miligramo por litro de cloro residual ( $\text{mgCl}_2/\text{l}$ ) y un pH inferior a 7.74, en el mes de elaboración de las probetas.

**4.1.1.3 Agregados:** Los agregados grueso y fino, provenientes de la zona de Pescadero – Santander, que fueron empleados en la realización de las probetas de estudio arrojaron los siguientes resultados en las pruebas de caracterización efectuadas, siguiendo las normas enunciadas en la metodología. En la fotografía 8 aparecen los agregados trabajados y en la fotografía 9 se observan los resultados obtenidos del análisis de materia orgánica realizado al agregado fino encontrándose en 1%, lo cual nos indica que no requiere de un lavado. En la tabla 9 se muestra los valores obtenidos para cada agregado.

**Fotografía 8.** Agregados finos y gruesos provenientes de la zona de pescadero.



Fuente: Los Autores.

**Fotografía 9.** Resultado del ensayo de materia orgánica del agregado fino.



Fuente: Los Autores.

**Tabla 9.** Resultados de las características evaluadas para los agregados fino y grueso.

CARACTERÍSTICAS	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
Gravedad específica real	2.74	2.68
Gravedad específica aparente	2.64	2.54
Gravedad específica aparente S.S.S	2.67	2.59
Absorción (%)	1.46	1.96
Peso unitario suelto	1414 kg/m <sup>3</sup>	1384 kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario compactado	1584 kg/m <sup>3</sup>	1560 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de vacíos	40.67	39,97
Módulo de finura	2.92 *	
Tamaño máximo		¾" (19,05 mm)

**Tabla 9. (Continuación)**

Tamaño máximo nominal		½" (12,7 mm)
Materia orgánica	1%**	

\* El modulo de finura cumple con los requisitos establecidos en la norma NTC 77, indicándonos que debe ser mayor de 2.3 y menor de 3.1.

\*\* La cantidad de materia orgánica cumple con los requisitos establecidos en las normas NTC 127 y ASTM C 40; hallándose en el 1% (no requiere lavado).

Fuente: Los Autores.

Los datos presentados en la tabla 9, son fundamentales para la determinación del diseño de mezcla y la elaboración de muestras de concreto. Es importante resaltar que el módulo de finura y el contenido de materia orgánica del agregado fino, se encuentran dentro de los lineamientos de las normas técnicas colombianas. Los formatos de informe con los resultados obtenidos de la distribución granulométrica de los agregados se presentan en el anexo a.

**4.1.2 Diseño de mezcla:** Apoyados en la guía suministrada por el laboratorio de Caracterización de Materiales para Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil (basada en el método para diseño de mezclas del ACI- American Concrete Institute), se obtuvo el diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto, con una relación a/c de 0.5; y los resultados se muestran en la tabla 10:

**Tabla 10.** Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto con una relación a/c de 0.5

COMPONENTES	Peso (kg)	Volumen (l)
<b>Agua</b>	200	200
<b>Cemento (Portland, Tipo I)</b>	400	132
<b>Agregado Fino</b>	820	307
<b>Agregado Grueso</b>	936	361

Fuente: Los Autores.

Es importante aclarar que el diseño de mezcla se realizó para un asentamiento de 3 pulgadas (76 mm) <sup>[23]</sup>, y la resistencia a la compresión estimada para los 28 días de curado fue de 25 MPa.

A partir de estos valores se hallaron las cantidades necesarias para la elaboración de las 37 probetas cilíndricas empleadas en el trabajo de investigación, multiplicando cada valor por el volumen del molde cilíndrico.

Con el diámetro medido del molde (103,7 mm) y su altura (207 mm), se determinó el respectivo volumen:

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi * r^2 * h \quad (9)$$

Donde: r: radio medido del molde (m)  
h: altura del molde (m)

$$V = \pi \cdot (0.052)^2 \cdot (0.207)$$

$$V = 1.76 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$$

Las cantidades calculadas para cada componente se encuentran en la tabla 11, mostrada a continuación.

**Tabla 11.** Cantidades necesarias por componente en la elaboración de 37 probetas.

Componentes	Peso unitario* (kg)	Peso Total** (kg)	Volumen Total (l)
<b>Agua</b>	0,352	13,024	13,024
<b>Cemento (Portland, Tipo I)</b>	0,704	26,048	8,600
<b>Agregado Fino</b>	1,443	53,400	20,000
<b>Agregado Grueso</b>	1,650	61,050	23,570

\* Peso necesario para la elaboración de una probeta.

\*\* Peso necesario para la elaboración de 37 probetas.

Fuente: Los Autores.

Los cálculos realizados para obtener el diseño de mezcla, se encuentran en el anexo b.

**4.1.3 Ensayos preliminares:** Durante la realización de las pruebas preliminares, se observaron ciertos errores como: falta de compactación de la mezcla (presentando vacíos de diferentes tamaños en la superficie de las probetas), falta de uniformidad en las dimensiones de los cilindros, y por lo tanto, mayor trabajo en

la preparación de las caras planas en la muestra y dificultad de la ubicación correcta de los palpadores para las respectivas mediciones.

Con el fin de reducir los problemas de compactación de la mezcla, se adquirió un martillo de caucho empleado para golpear los costados del molde, los cuales permitían la salida del aire atrapado y a su vez, llenar los espacios que quedaban entre los agregados reduciendo al máximo los vacíos resultantes en las probetas y los posibles errores en la medida de velocidades de pulso ultrasónico por la defectuosa elaboración. Para garantizar dimensiones más uniformes en las probetas y reducir el trabajo de preparación superficial, fue necesaria la adquisición de moldes plásticos prefabricados que se encuentran en el sector comercial y que están siendo empleados en algunas empresas cementeras del país. Por último, para corregir los problemas de ubicación de los palpadores, se diseñó el dispositivo que se muestra en la fotografía 10 el cual permitió reducir los errores de lectura al poder controlar la correcta posición de los palpadores.

**Fotografía 10.** Dispositivo diseñado para la ubicación correcta de los palpadores.



Fuente: Los Autores.

Por otro lado, para obtener resultados consistentes en la determinación del contenido de agua de las probetas curadas en condiciones estándar y en las medidas de VPU, se asumieron los siguientes criterios de operación:

- **Tiempo de escurrido de las probetas:** Cinco minutos.
- **Determinación del contenido de agua:** secar cada probeta con una lanilla hasta superficie saturada seca (SSS), y luego pesar en una balanza analítica con precisión  $\pm 0,001$  kg.
- **Medición de las VPU:** pulir inicialmente con piedra de esmeril y terminar con una lija de agua No. 80. Tener cuidado de no superar un tiempo de 30 minutos después de extraer las probetas de la pila, con el fin de evitar pérdidas en el contenido de agua.

**4.1.4 Elaboración de probetas:** Una vez obtenidas las probetas, se tomó el peso de cada una y 22 de ellas se llevaron a curar en condiciones estándar según la norma NTC 1377 (ASTM C 156); las 15 restantes se dejaron curar en condiciones ambientales a una temperatura promedio de 27° C, como puede observarse en la fotografía 11 a continuación:

**Fotografía 11.** Probetas curadas en piscina y en condiciones ambientales



Fuente: Los Autores.

Se enumeraron y se reportaron los pesos de cada una de las muestras y posteriormente, 22 de ellas fueron sumergidas en una piscina<sup>6</sup> (con agua saturada en cal y a una temperatura aproximadamente de 23°C), con el fin de curar en condiciones estándar, las restantes se curaron en condiciones ambientales.

## 4.2 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Siguiendo con el planteamiento metodológico, para cada día de ensayo se les determinó el contenido de agua a las probetas, se preparó su superficie y se midió la velocidad de pulso ultrasónico a cada una de ellas. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada actividad.

**4.2.1 Contenido de agua (CA):** el contenido de agua se expresa en porcentaje y se halló por diferencia de pesos entre un valor final para cada cilindro en los diferentes días de ensayo y un valor inicial tomado después del desencofrado.

**4.2.1.1 Probetas curadas en agua:** correspondientes a los cilindros del número 16 al 37, para los cuales el contenido de agua se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ CA: } \frac{P_f - P_i}{P_i} * 100 \quad (10)$$

Donde: **Pf:** Peso final de cada cilindro en los diferentes días de curado.

**Pi:** Peso inicial de cada cilindro después de desencofrado.

---

<sup>6</sup> La piscina cumple las especificaciones necesarias para este tipo de curados según la norma NTC 1377.

El contenido de agua de las probetas ensayadas aleatoriamente en los distintos tiempos de curado se muestra en la tabla 12.

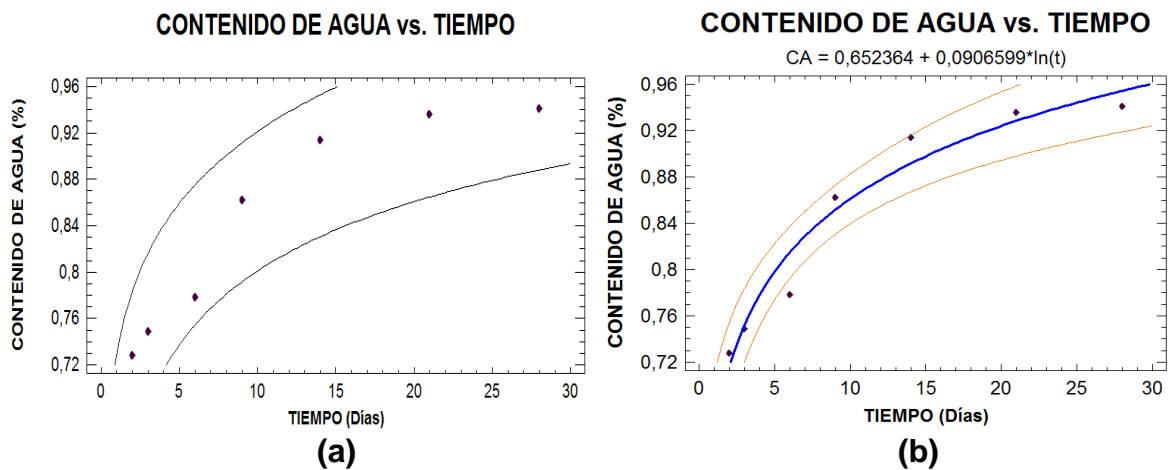
**Tabla 12.** Contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar, a diferentes tiempos de curado

DÍAS DE CURADO	Cilindro No.	Peso inicial (g)	Peso final (g)	CA (%)	Promedio CA (%)
<b>2</b>	21	4093	4122	0,709	<b>0,728</b>
	26	4065	4092	0,664	
	28	4072	4105	0,810	
<b>3</b>	31	4064	4095	0,763	<b>0,749</b>
	33	4031	4062	0,769	
	35	4051	4080	0,716	
<b>6</b>	16	4079	4111	0,785	<b>0,778</b>
	24	4052	4083	0,765	
	30	4076	4108	0,785	
<b>9</b>	22	4057	4093	0,887	<b>0,862</b>
	23	4037	4073	0,892	
	25	4093	4126	0,806	
<b>14</b>	18	4114	4154	0,972	<b>0,914</b>
	27	4075	4112	0,908	
	37	4057	4092	0,863	
<b>21</b>	17	4075	4118	1,055	<b>0,936</b>
	20	4066	4101	0,861	
	36	4040	4076	0,891	
<b>28</b>	19	4055	4091	0,888	<b>0,941</b>
	29	4075	4115	0,982	
	32	4083	4125	1,029	
	34	4035	4070	0,867	

Fuente: Los Autores.

De la tabla 12, se evidencia una ganancia de peso correspondiente al agua absorbida por las probetas (adicional al agua de mezcla) al encontrarse sumergidas en la pila (condiciones estándar), lo que se traduce en un aumento en el contenido de agua a medida que transcurre el tiempo de curado. El comportamiento seguido a partir de estos datos se presenta en la figura 16.

**Figura 16.** Contenido de agua vs. Tiempo de curado en probetas curadas en agua. a) Contenido de agua promedio para cada día de ensayo. b) Modelo obtenido con nivel de confianza a partir de un software estadístico Statgraphics.



Fuente: Los Autores.

Las gráficas que se presentan en este capítulo, fueron obtenidas a través del software estadístico Statgraphics Centurion XV versión 15.2.06, en el cual se realizó una regresión simple con los valores de cada tabla, para encontrar un modelo de comportamiento entre las variables relacionadas, con un nivel de confianza del 95% en cada caso. Los parámetros de dichos modelos fueron estimados por el método de mínimos cuadrados. En las figuras que se presentan

en este capítulo, las líneas negras que aparecen en el numeral a) de cada figura corresponden a los límites de predicción del modelo (Ver fig. 16 a)).

En la figura 16 a) también se puede observar que el contenido de agua presenta un comportamiento ascendente a través del tiempo de curado, mostrándose un mayor crecimiento en los primeros días hasta el día 9, a partir del cual, la ganancia en el contenido de agua se hace en proporciones menores; esto puede ser probablemente debido a que las probetas tienden a alcanzar un punto de saturación para el cual, no siguen absorbiendo más agua del medio y llegan a un peso constante, lo cual explicaría el comportamiento asintótico que describe la gráfica. De la figura 16 (b) se pudo determinar una tendencia logarítmica (línea azul) en el comportamiento del contenido de agua para diferentes tiempos de curado con un nivel de confianza del 95% representado por las líneas color naranja. La información obtenida del software se presenta a continuación en la tabla 13

**Tabla 13.** Parámetros del modelo obtenido para el contenido de agua vs. tiempo en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
Coefficiente de Correlación	0,976
R cuadrada	95,241 %
Error Estándar	0,022

Fuente: Los Autores.

Aunque existan otros modelos estadísticos que describan con mayor precisión matemática estos procesos, el cuadro anterior, presenta un modelo que tiene sentido desde el punto de vista físico y que describe adecuadamente el fenómeno estudiado. De la tabla 13 se observa un coeficiente de correlación de 0,976, que muestra una fuerte relación entre las variables mencionadas, demostrando que el modelo logarítmico propuesto en la ecuación 11 se ajusta en un 95,241 % a los

valores de la tabla 13 con un error de estimación del 0,022 en dicho modelo. Un análisis similar de estos parámetros, se realizó para los demás resultados obtenidos, los cuales se presentan posteriormente. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{CA} = 0,652364 + 0,09066 * \ln(t) \quad (11)$$

La ecuación 11 puede ser empleada para determinar el contenido de agua a cualquier tiempo de curado en probetas curadas en condiciones estándar y un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.2.1.2 Probetas curadas al aire:** corresponden a los cilindros del número 1 al 15 ensayados aleatoriamente, para quienes el contenido de agua se expresa en porcentaje y se halló por diferencia de pesos entre un valor inicial tomado después del desencofrado y el valor registrado para cada muestra curada al aire en los diferentes días de prueba.

$$\% \mathbf{CA}: 100 - \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (12)$$

Donde: **Pi:** Peso inicial de cada cilindro después de desencofrado

**Pf:** Peso final de cada cilindro en los diferentes días de curado

El contenido de agua de las probetas curadas al aire para diferentes días de ensayo se muestra a continuación en la tabla 14:

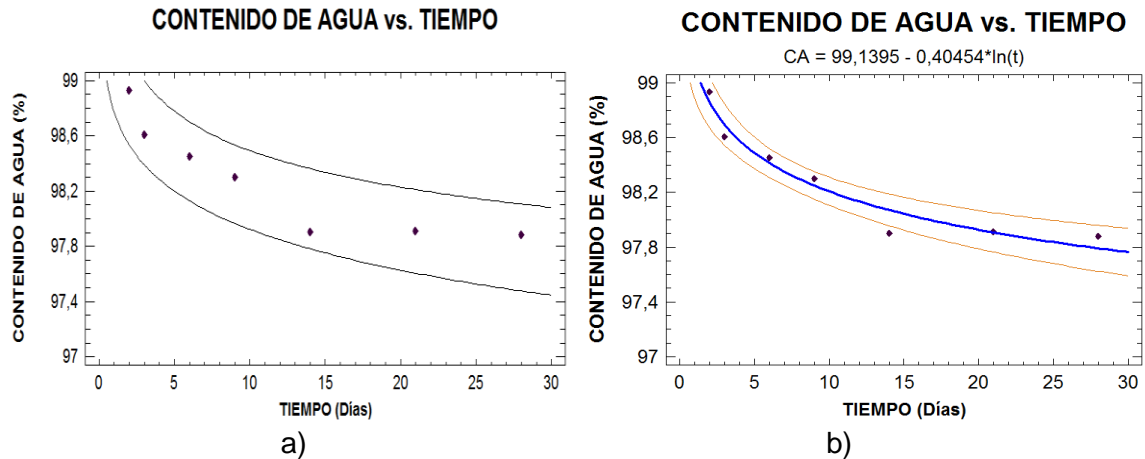
**Tabla 14.** Contenido de agua en las probetas curadas al aire, en diferentes tiempos de curado.

DÍAS	CILINDRO No.	Peso inicial (g)	Peso final (g)	CA (%)	Promedio CA (%)
2	1	4089	4045	98,924	98,933
	14	4061	4018	98,941	
3	2	4035	3972	98,439	98,609
	12	4095	4045	98,779	
6	7	4078	4016	98,480	98,452
	15	4061	3997	98,424	
9	11	4092	4025	98,363	98,300
	13	4086	4014	98,238	
14	5	4051	3968	97,951	97,902
	9	4051	3964	97,852	
21	2	4093	4008	97,923	97,914
	6	4105	4019	97,905	
28	3	4094	4006	97,851	97,881
	8	4086	4000	97,895	
	10	4090	4004	97,897	

Fuente: Los Autores.

Contrario a lo sucedido con las probetas curadas en agua, las probetas curadas en condiciones ambientales presentaron una disminución de peso en los diferentes tiempos de curado, razón por la cual los valores reportados en la tabla 14 no corresponden al contenido de agua absorbida por las mismas, sino al agua que sigue presente en la mezcla de forma libre o que ha formado parte de los productos de hidratación y que aún no se ha evaporado en la atmósfera circundante. Por esta razón, hay diferencias entre las ecuaciones 12 y 10. En la figura 17, se presenta el comportamiento del contenido de agua en el tiempo para los cilindros curados en condiciones ambientales.

**Figura 17.** Contenido de agua vs. Tiempo de curado en probetas curadas al aire a) Contenido de agua promedio para cada día de ensayo. b) Modelo obtenido con nivel de confianza a partir de un software estadístico.



Fuente: Los Autores.

En la figura 17 a) se muestra que el contenido de agua que aún está presente en la mezcla tiene un comportamiento descendente a través del tiempo, es decir, el concreto va perdiendo el agua de su mezcla a medida que transcurre la etapa de curado. De la gráfica también se puede observar que hacia el día 14 se ha evaporado la mayor cantidad de agua del material y a partir de este momento hasta terminar el proceso de curado, el agua presente en el concreto toma valores muy cercanos. De la figura 17 (b) se observa una tendencia logarítmica que define el comportamiento del contenido de agua durante el tiempo de curado; en donde las diferencias en el contenido de agua son considerables hasta el día 14, a partir del cual la curva se vuelve más suave, dibujando un comportamiento asintótico; esto se debe principalmente a que con el paso del tiempo, dentro del concreto van ocurriendo reacciones de hidratación que dejan menor cantidad de agua libre para la evaporación; la cual ocurre mediante fenómenos de capilaridad y difusión, hasta que las probetas alcancen un peso constante, lo cual está de

acuerdo con lo expresado por Rodríguez G. Manuel <sup>[39]</sup>. En el siguiente cuadro se presenta alguna información del modelo estadístico.

**Tabla 15** Parámetros del modelo obtenido para el contenido de agua vs. tiempo en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,973
<b>R cuadrada</b>	94,641 %
<b>Error Estándar</b>	0,104

Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$CA = 99,139 - 0,405 \cdot \ln(t) \quad (13)$$

La ecuación 13 puede ser empleada para determinar el contenido de agua a cualquier tiempo de curado en muestras curadas en condiciones ambientales; para un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

Haciendo una comparación entre las diferentes condiciones de curado; se pudo observar que las probetas curadas de forma estándar presentan una ganancia hasta del 1% aproximadamente en peso, que corresponde al agua absorbida del medio y que según reportan algunos autores <sup>[39][40]</sup>, esta cantidad de agua penetra de 3 a 4 cm desde la superficie hacia el interior de los especímenes ensayados, durante el tiempo de curado. Por otro lado, se notó una pérdida en el agua de la mezcla hasta aproximadamente 2,2% en peso en las probetas curadas en condiciones ambientales, debido a la evaporación del agua libre presente en los espacios capilares y del agua que difunde desde los poros interiores hasta la superficie.

**4.2.2 Preparación superficial de las probetas:** en la tabla 16 se presentan los resultados de los diámetros promedio obtenidos de las probetas previa preparación de las mismas:

**Tabla 16.** Diámetros promedio para los cilindros de concreto curados en agua y en aire.

DIÁMETRO PROMEDIO ( $\Phi_{prom.}$ mm)	
Curadas en Agua	Curadas al Aire
<b>103.996</b>	<b>103.697</b>

Fuente: Los Autores.

De la tabla anterior, se observa que el diámetro promedio para las probetas curadas en agua es ligeramente mayor al diámetro promedio de las probetas curadas en condiciones ambientales. Lo anterior es debido a que en las primeras, los poros y la superficie se encuentran llenos de agua; y en las segundas, como resultado del proceso de pérdida de agua por evaporación, la superficie se seca más rápidamente que el interior, generando contracciones irreversibles principalmente en la periferia, lo cual concuerda con lo expresado por algunos investigadores <sup>[31][39]</sup>.

**4.2.3 Medida de las VPU en probetas curadas en agua:** luego de preparar la superficie de las probetas para lograr un mejor acoplamiento de los palpadores, se procedió a medir las velocidades de pulso ultrasónico en tres cilindros para los diferentes días de ensayo establecidos. A continuación se presentan los parámetros de operación del equipo de ultrasonido. (Ver tabla 17)

**Tabla 17.** Parámetros de operación para el equipo de baja frecuencia PUNDIT PLUS

PARÁMETRO	VALOR
Longitud de la probeta (m)	0.20
Voltaje (V)	500
Frecuencia del palpador (kHz)	54
Modo de pulso	Continuo

Fuente: Los Autores.

Una vez establecidos los parámetros de operación del equipo, se mantuvieron constantes durante el desarrollo del presente trabajo de investigación; cabe destacar que antes de proceder a medir las velocidades de pulso en las probetas, se realizó la calibración del equipo en cada día de ensayo; luego, se midieron seis velocidades de pulso en tres puntos diferentes en cada probeta por el método de transmisión directa. A continuación en la tabla 18 se presentan las velocidades promedio obtenidas en cada probeta para cada día de curado.

**Tabla 18.** Promedio de velocidades de pulso para cada día de curado en agua.

DÍAS	CILINDRO No.	VPU (m/s)	Promedio VPU (m/s)
2	21	3758,17	3759,11
	26	3746,17	
	28	3773,00	
3	31	3823,83	3834,89
	33	3833,67	
	35	3847,17	
6	16	4037,50	4008,28
	24	4036,00	
	30	3951,33	

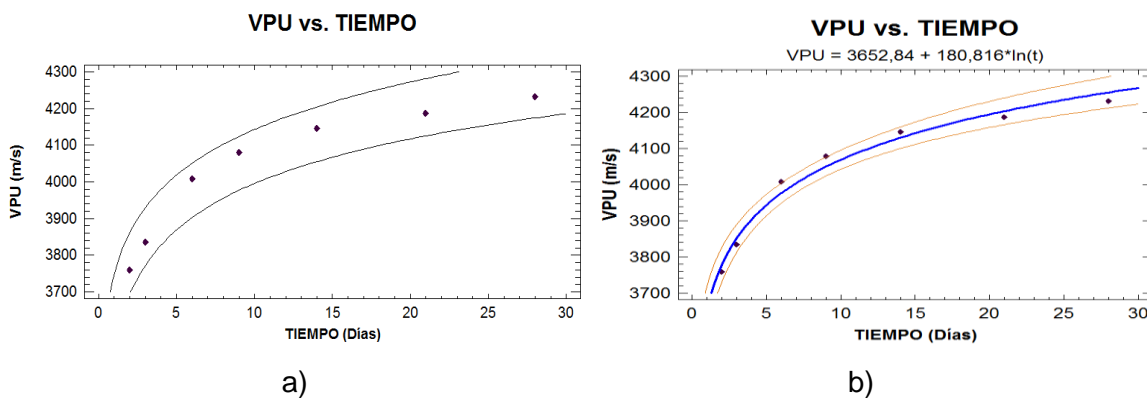
**Tabla 18.** (Continuación)

9	22	4070,17	4079,06
	23	4098,17	
	25	4068,83	
14	18	4182,17	4145,89
	27	4150,17	
	37	4105,33	
21	17	4186,67	4186,33
	20	4213,00	
	36	4159,33	
28	19	4195,00	4231,79
	29	4253,50	
	32	4210,17	
	34	4268,50	

Fuente: Los Autores.

En la tabla anterior se presentan los valores de velocidades promedio para cada cilindro, y el valor promedio por cada día de curado. En la figura 18 se representa el comportamiento de la VPU con el tiempo de curado.

**Figura 18.** Variación de la VPU con el tiempo, en probetas curadas en agua.



Fuente: Los Autores.

En la figura 18 a) se aprecia la variación de la VPU durante la etapa de curado, esta velocidad presenta un aumento significativo a medida que transcurre el tiempo hasta el día 9, a partir del cual, los valores de VPU están relativamente más cercanos. En la figura 18 b) se aprecia un modelo logarítmico que describe la relación existente entre las variables, con un nivel de confianza del 95% representado por las líneas naranjas en los extremos. En la figura también se muestra, que en el día nueve, el cambio en la pendiente de la curva es más pronunciado y a partir de ese momento su valor se va acercando a cero. En la tabla 19 se muestran los valores de los parámetros obtenidos para el modelo.

**Tabla 19.** Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. tiempo de curado en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,991
<b>R cuadrada</b>	98,152 %
<b>Error Estándar</b>	26,690

Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{VPU} = 3652,840 + 180,816 \cdot \ln(t) \quad (14)$$

La ecuación 14 puede ser empleada para determinar la VPU a cualquier tiempo de curado en muestras curadas en condiciones estándar y un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.2.4 Medida de las VPU en probetas curadas al aire:** de la misma forma que se procedió para las probetas curadas en condiciones estándar, se midieron las velocidades de pulso ultrasónico en dos cilindros para los diferentes días de ensayo establecidos. Los parámetros de operación del equipo de ultrasonido se mantuvieron constantes como se indicó en la tabla 17. La medición de las VPU para las probetas curadas en condiciones ambientales se realizó de la misma forma que en las probetas curadas en agua. A continuación se presentan las velocidades promedio obtenidas en cada probeta para diferentes tiempos de curado. (Ver tabla 20).

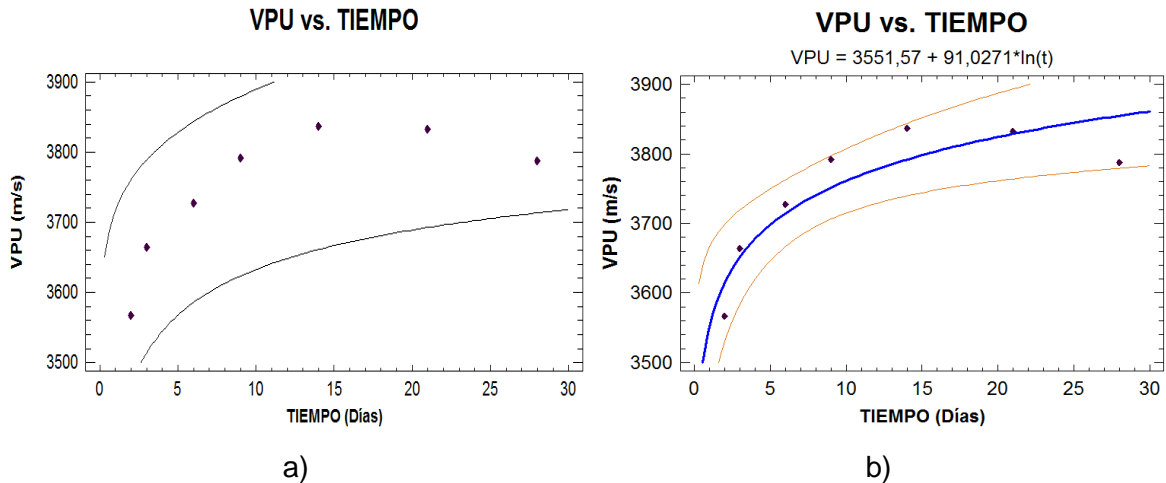
**Tabla 20.** Variación de la VPU con el tiempo de curado, en probetas curadas al aire.

DÍAS	Cilindro No.	VPU (m/s)	Promedio VPU (m/s)
2	1	3539,50	3566,58
	14	3593,67	
3	2	3659,50	3664,33
	12	3669,17	
6	7	3747,67	3727,75
	15	3707,83	
9	11	3813,00	3792,08
	13	3771,17	
14	5	3839,83	3836,58
	9	3833,33	
21	2	3853,33	3832,92
	6	3812,50	
28	3	3800,00	3787,61
	8	3773,00	
	10	3789,83	

Fuente: Los Autores.

En la tabla anterior se presentan los valores de velocidades promedio para cada cilindro, y el valor promedio por cada día de curado. En la figura 19 se representa el comportamiento de la VPU con el tiempo.

**Figura 19.** Variación de la VPU con el tiempo, en probetas curadas al aire.



Fuente: Los Autores.

En la figura 19 a) se aprecia un crecimiento en la VPU hasta el día 14, a partir del cual, se observa un decrecimiento en dicha velocidad, con valores relativamente cercanos. En la figura 19 b) se propone un modelo logarítmico para describir la relación existente entre la VPU y los días de curado de las probetas curadas al aire; observándose que en los días 21 y 28 disminuyen los valores de VPU, debido al fenómeno de secado sufrido por las probetas durante el cual, los espacios capilares que antes ocupaba el agua, ahora están vacíos o llenos de aire aumentando el tiempo de propagación de la onda. En la tabla 21 se muestran algunos parámetros del modelo.

**Tabla 21.** Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. tiempo de curado en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,903
<b>R cuadrada</b>	81,564%
<b>Error Estándar</b>	46,555

Fuente: Los Autores.

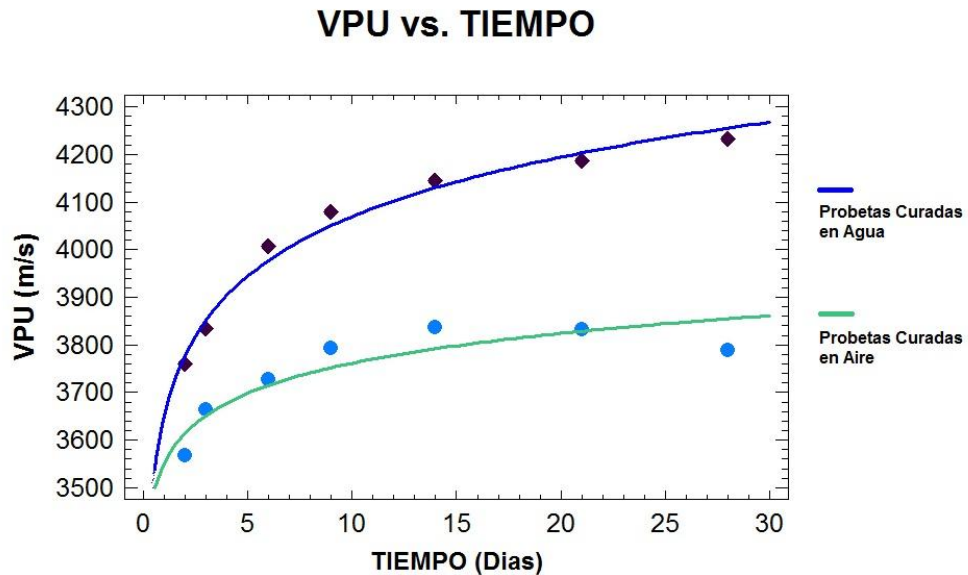
La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{VPU = 3551,570 + 91,027 \cdot \ln(t)} \quad (15)$$

La ecuación 15, puede ser empleada para determinar la VPU a cualquier tiempo de curado, en muestras curadas en condiciones ambientales y para el mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

Una vez analizada la variación de la VPU con el tiempo de curado para cada condición (estándar ó al ambiente), se presenta un gráfico comparativo (figura 20) que muestra la influencia del medio de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico, en los especímenes de concreto durante los 28 primeros días después de su fabricación.

**Figura 20.** Comparación de la VPU vs. Tiempo en diferentes condiciones de curado.



Fuente: Los Autores.

De la figura 20 se observa que la VPU tiene un comportamiento logarítmico independientemente de las condiciones en las que se realice el curado; notándose además, que la curva de las probetas curadas en condiciones estándar se encuentra por encima de la curva de las probetas curadas en condiciones ambientales, sobrepasando los 4200 m/s a los 28 días de curado; mientras que las probetas curadas en condiciones ambientales no alcanzan los 3900 m/s este mismo día. Cabe destacar, que las diferencias de VPU entre un medio y otro aumentan a medida que transcurre el tiempo; es decir, los cilindros de concreto curados en condiciones estándar presentan un crecimiento paulatino en dichas velocidades, hasta lograr una ventaja del 11.73% aprox., sobre las alcanzadas por las probetas curadas en condiciones ambientales al finalizar la etapa de curado.

### 4.3 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Paralelamente a los ensayos no destructivos y en los tiempos de curado establecidos, se realizaron los ensayos destructivos midiendo la resistencia a la compresión de cada probeta en las diferentes condiciones de curado. Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión se muestran a continuación.

**4.3.1 Resistencia a la compresión en probetas curadas en Agua:** los ensayos de resistencia a la compresión en las probetas curadas en agua se realizaron inmediatamente después de los END y no sobrepasaron los 45 minutos después de extraer cada cilindro de la pila. En la tabla 22 se muestran las resistencias a la compresión obtenidas para cada día de ensayo; las cuales se obtuvieron del cociente entre la carga (otorgada por la máquina de compresión) y el área transversal de los cilindros, hallada a partir del diámetro promedio (104 mm) para las probetas curadas en agua (Ver tabla 16), de la siguiente forma:

$$f'c = \frac{\text{Carga (N)}}{\pi * R_{prom}^2(mm^2)} \quad (16)$$

Donde:  $R_{prom}$  = Radio promedio del cilindro de concreto.

**Tabla 22.** Valores de resistencia a la compresión en probetas curadas en condiciones estándar a diferentes tiempos de curado.

DÍAS	CILINDRO No.	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	PROMEDIO f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)	PROMEDIO f'c (MPa)
2	21	166,000	157,440	16,280	15,440
	26	156,800		15,380	
	28	149,520		14,660	

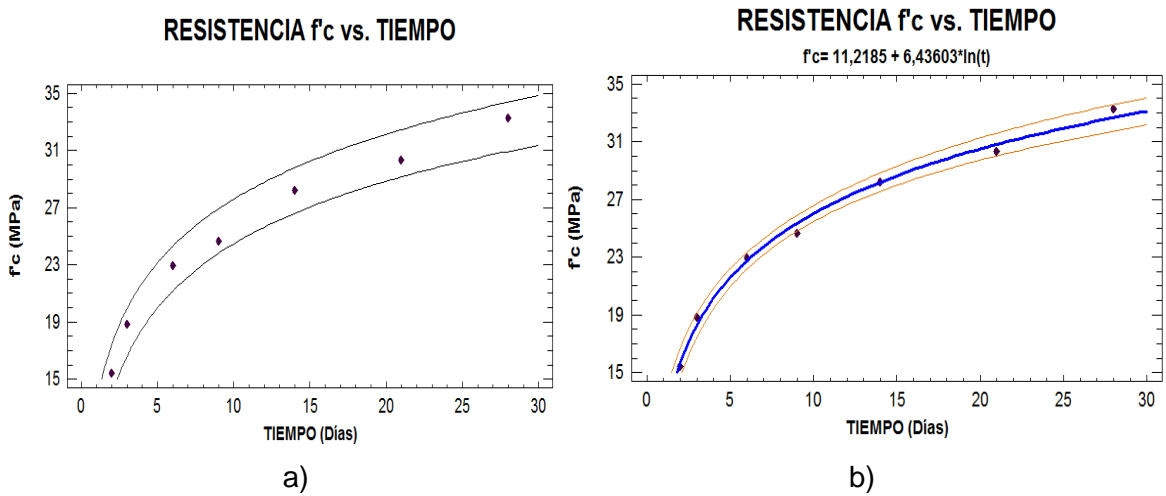
**Tabla 22.** (Continuación)

<b>3</b>	31	191,900	192,290	18,820	18,860
	33	194,250		19,050	
	35	190,720		18,700	
<b>6</b>	16	236,640	233,890	23,210	22,940
	24	242,520		23,780	
	30	222,510		21,820	
<b>9</b>	22	254,300	251,160	24,940	24,630
	23	257,830		25,290	
	25	241,350		23,670	
<b>14</b>	18	326,110	288,040	31,980	28,250
	27	268,420		26,320	
	37	269,600		26,440	
<b>21</b>	17	315,510	309,240	30,940	30,330
	20	311,980		30,590	
	36	300,210		29,440	
<b>28</b>	19	327,290	339,650	32,100	33,310
	29	335,530		32,910	
	32	344,950		33,830	
	34	350,830		34,510	

Fuente: Los Autores.

Como se observa en la tabla anterior, los valores de resistencia a la compresión aumentaron en cada día de ensayo, sobrepasando el valor de resistencia estimado en el diseño de mezcla que fue de 25 Mpa (Ver anexo b). En la figura 21 se presentan gráficamente los valores de resistencia a la compresión en función del tiempo.

**Figura 21.** Variación de la resistencia a la compresión en probetas curadas en agua para diferentes tiempos de curado.



Fuente: Los Autores.

En la figura 21 a) se observa claramente el crecimiento de la resistencia a la compresión a través del tiempo de curado para las probetas curadas en condiciones estándar, lo cual concuerda con los estudios reportados por diversos autores <sup>[7][40]</sup>. En la figura 21 b) se presenta un modelo logarítmico <sup>[41]</sup> que describe el comportamiento de la resistencia con el tiempo. Del modelo se puede apreciar un alto crecimiento en la resistencia a la compresión durante los primeros catorce días de curado; pero a partir de este momento; las diferencias entre los valores de resistencia obtenidos se hacen cada vez menores a medida que aumenta el tiempo. A continuación se presentan los parámetros del modelo. (Ver tabla 23).

**Tabla 23.** Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. Tiempo en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,997
<b>R cuadrada</b>	99,335 %
<b>Error Estándar</b>	0,566

Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = 11,219 + 6,436 \cdot \ln(t) \quad (17)$$

La ecuación 17, puede ser empleada para determinar la resistencia a la compresión a cualquier tiempo de curado en probetas curadas en condiciones estándar y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.3.2 Resistencia a la compresión en probetas curadas al aire:** los ensayos de resistencia a la compresión en las probetas curadas al aire se realizaron inmediatamente después de los ensayos no destructivos para las mismas. En la tabla 24 se presentan las resistencias a la compresión obtenidas para cada día de ensayo; las cuales se obtuvieron de acuerdo con la ecuación 16; usando un diámetro promedio de 103,7 mm según la tabla 16.

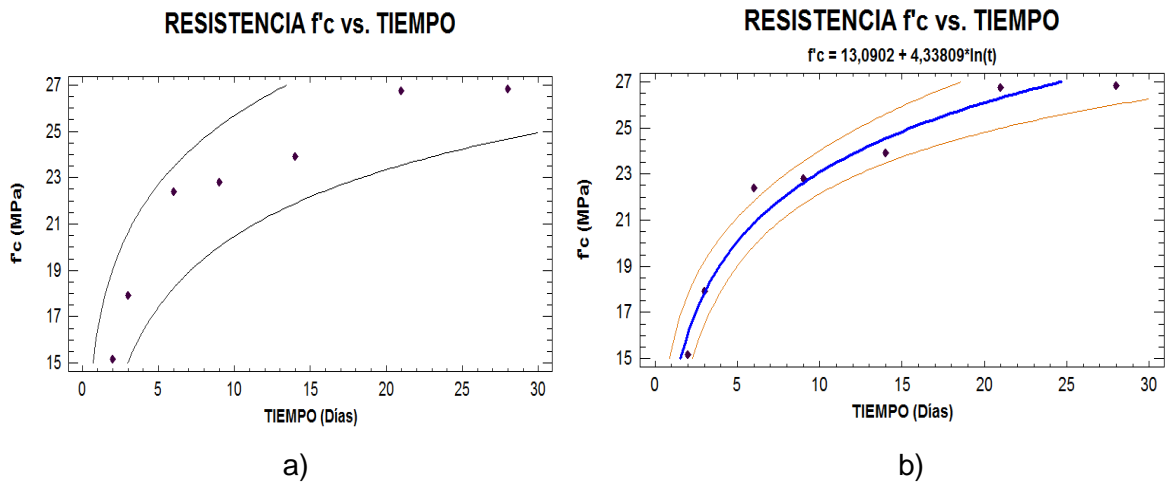
**Tabla 24.** Valores de Resistencia a la compresión en probetas curadas en condiciones ambientales a diferentes tiempos de curado.

DÍAS	CILINDRO No.	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	PROMEDIO f'c	f'c (MPa)	PROMEDIO f'c (MPa)
<b>2</b>	1	157,470	154,510	15,440	15,150
	14	151,550		14,860	
<b>3</b>	2	191,810	182,930	18,810	17,940
	12	174,050		17,070	
<b>6</b>	7	230,880	228,510	22,640	22,410
	15	226,140		22,180	
<b>9</b>	11	239,170	232,660	23,460	22,820
	13	226,140		22,180	
<b>14</b>	5	242,720	243,900	23,800	23,920
	9	245,090		24,040	
<b>21</b>	2	277,060	272,910	27,170	26,760
	6	268,770		26,360	
<b>28</b>	3	267,580	273,500	26,240	26,820
	8	279,420		27,400	
	10	273,500		26,820	

Fuente: Los Autores.

Como se observa en la tabla anterior, los valores de resistencia a la compresión aumentaron en cada día de ensayo al igual que sucedió con las probetas curadas en agua, sobrepasando el valor de resistencia estimado en el diseño de mezcla que fue de 25 MPa. En la figura 22 se presentan gráficamente los valores de resistencia a la compresión en función del tiempo.

**Figura 22.** Variación de la resistencia a la compresión en probetas curadas al aire para diferentes tiempos de curado.



Fuente: Los Autores.

En la figura 22 a) se observa el crecimiento de la resistencia a la compresión a través del tiempo de curado para las probetas curadas en condiciones ambientales. Los valores obtenidos muestran un aumento en la resistencia a la compresión bastante significativo hasta el día 6, después del cual, el incremento continúa a intervalos menos pronunciados hasta el día 28. En la figura 22 b) se presenta un modelo logarítmico <sup>[41]</sup> que describe el comportamiento de la resistencia con el tiempo de curado. De la curva se observa que a partir del día nueve los valores de resistencia son más cercanos entre sí a medida que transcurre el tiempo. Del modelo se proporciona la siguiente información (ver tabla 25).

**Tabla 25.** Parámetros del modelo obtenido para resistencia a la compresión vs. Tiempo en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,980
<b>R cuadrada</b>	96,070%
<b>Error Estándar</b>	9,444

Fuente: Los Autores.

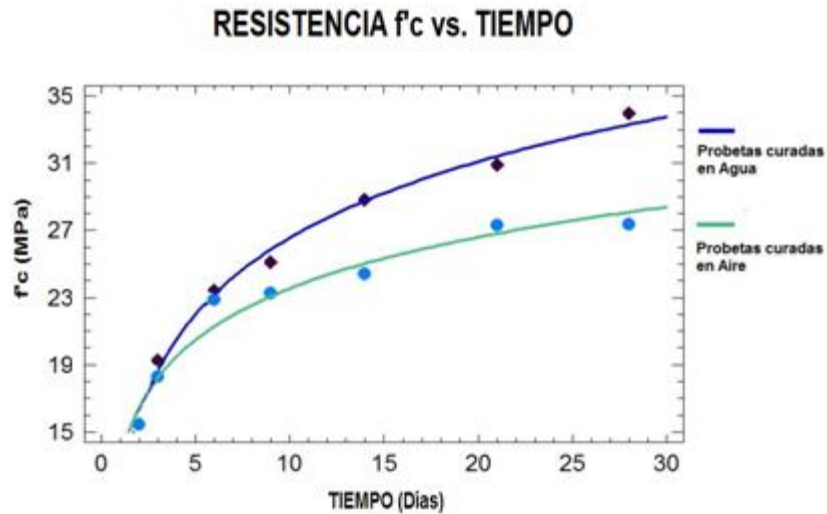
La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = 13,090 + 4,338 \cdot \ln(t) \quad (18)$$

La ecuación 18, puede ser empleada para determinar la resistencia a la compresión a cualquier tiempo dentro de la etapa de curado para probetas curadas en condiciones ambientales y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

En la siguiente figura se muestra la influencia de las condiciones de curado sobre la resistencia a la compresión alcanzada por el concreto durante el tiempo de curado.

**Figura 23.** Comparación de la resistencia a la compresión vs. Tiempo en diferentes condiciones de curado.



Fuente: Los Autores.

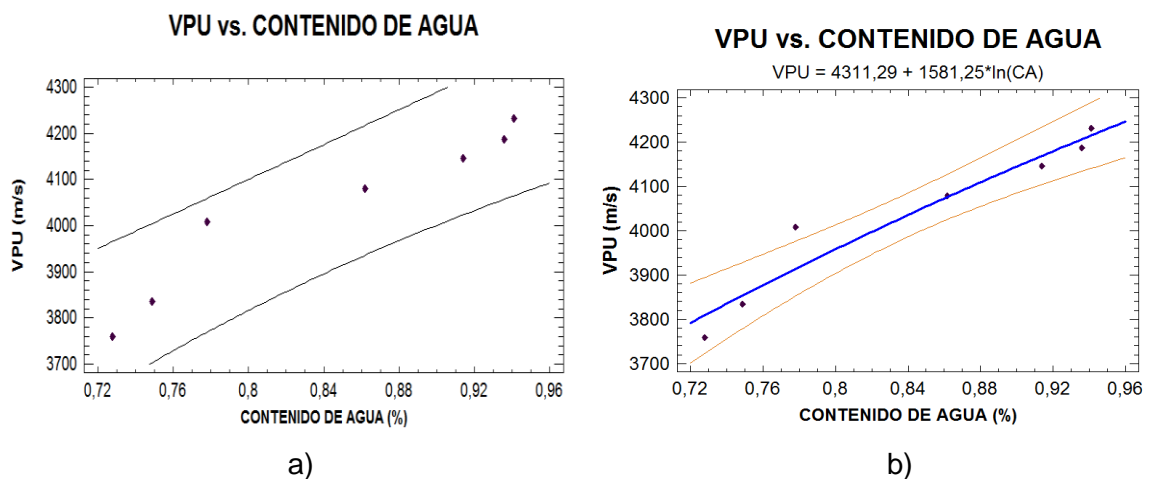
Según se observa en la figura 23, las resistencias alcanzadas por las probetas durante los tres primeros días de curado son prácticamente iguales y a partir de ese momento, la curva de resistencia para los cilindros curados en agua se desplaza por encima de la curva de resistencia para las probetas curadas en aire, presentando el mismo comportamiento durante la etapa de curado. Independientemente de las condiciones en las que se realice el curado de las muestras de concreto, los valores de la resistencia a la compresión aumentan durante esta etapa, apreciándose un mayor crecimiento en las probetas curadas en condiciones estándar; de manera que la resistencia obtenida por las probetas curadas en condiciones ambientales es menor en un 19.5% a la obtenida en los cilindros curados en agua evaluada a los 28 días de curado.

#### 4.4 CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO

Conocidos los valores del contenido de agua y las velocidades de Pulso Ultrasónico para cada tiempo de curado, se construyeron las gráficas que describen el comportamiento de estas dos variables y la relación existente entre ellas, proponiendo un modelo estadístico mediante el software Statgraphics por el método de regresión simple, para diferentes condiciones de curado.

**4.4.1 Correlación para probetas curadas en agua:** tomando los valores promedios para el contenido de agua de la tabla 12 como variable independiente y los valores promedio para las velocidades de pulso ultrasónico de la tabla 18 como variable dependiente, se obtienen las figuras 24 a y b:

**Figura 24.** Variación de la VPU vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar.



Fuente: Los Autores.

De la figura 24 a) se observa un aumento en la VPU a medida que aumenta el contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar a través del tiempo de curado. En la figura 24 b) se presenta un modelo logarítmico que describe adecuadamente el comportamiento de la VPU en función del contenido de agua. Este modelo indica que la velocidad alcanza su valor máximo en el punto donde las probetas tienen el mayor contenido de agua. La tendencia logarítmica explica el fenómeno físico que indica que las probetas deben alcanzar un punto de saturación, para el cual, la velocidad deberá llegar a su valor máximo asintóticamente a medida que aumenta el tiempo. La información obtenida para este modelo estadístico se muestra a continuación en la tabla 26:

**Tabla 26.** Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. El contenido de agua en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,966
<b>R cuadrada</b>	93,277 %
<b>Error Estándar</b>	50.906

Fuente: Los Autores.

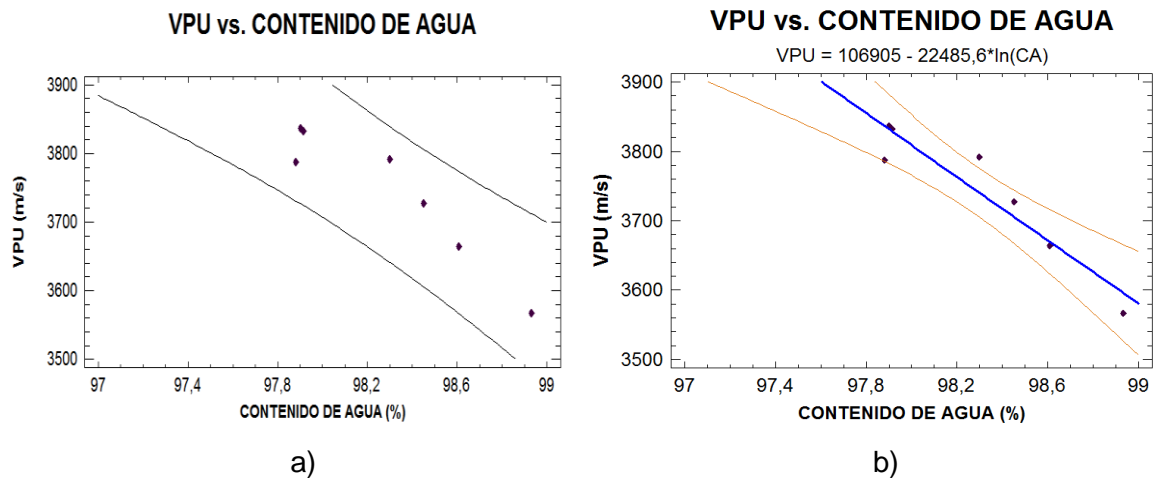
La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{VPU} = 4311,290 + 1581,250 \cdot \ln(\mathbf{CA}) \quad (19)$$

La ecuación 19, puede ser empleada para determinar la VPU en relación al contenido de agua, dentro de la etapa de curado para muestras curadas en condiciones estándar y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.4.2 Curadas en aire:** al igual que las probetas curadas en agua, las figuras 25 a y b se obtienen a partir de los valores promedios tomados de las tablas 14 y 20 respectivamente.

**Figura 25.** Variación de la VPU vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones ambientales.



Fuente: Los Autores.

En la figura 25 a) se observa una disminución desde el 99% hasta el 97.8% aproximadamente (lectura de derecha a izquierda) en el contenido de agua de la mezcla, mientras la VPU sigue aumentando durante el proceso de curado en condiciones ambientales. En la figura 25 b) se presenta un modelo logarítmico que describe el comportamiento de la VPU en función del contenido de agua; resaltando que debido al proceso de secado de las probetas, en los extremos deberá presentarse un punto límite: uno que corresponda al contenido de agua en la mezcla y otro relacionado con la cantidad máxima de agua que se puede perder por evaporación; este último describiría un comportamiento asintótico que explicaría adecuadamente el fenómeno físico ocurrido. La información obtenida para este modelo estadístico se muestra a continuación en la tabla 27.

**Tabla 27.** Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. El Contenido de agua en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	-0,943
<b>R cuadrada</b>	88,968%
<b>Error Estándar</b>	36,013

Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{VPU} = 106905 - 22485,6 \cdot \ln(\mathbf{CA}) \quad (20)$$

La ecuación 20, puede ser empleada para determinar la VPU en relación al contenido de agua presente en la mezcla dentro de la etapa de curado para muestras curadas en condiciones ambientales y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la variación de la VPU en función del contenido de agua para diferentes condiciones de curado, se pueden establecer algunas diferencias entre ellas:

Como se dijo anteriormente para los cilindros curados en condiciones estándar, la velocidad máxima se alcanza en el punto para el cual el contenido de agua también es máximo; sin embargo, en condiciones ambientales, la velocidad máxima se alcanzó para el punto donde había menor contenido de agua en la mezcla y por tanto, es menor en magnitud a la lograda en las probetas curadas en agua. Puesto que la velocidad ultrasónica depende de las propiedades elásticas y la densidad del medio en que propague la onda, es apenas lógico que la señal ultrasónica gaste menos tiempo en propagarse en sólidos (concreto y productos

de hidratación) y líquidos (agua contenida en los poros y espacios capilares) que en gases (poros llenos de aire o fisuras), puesto que la diferencia entre las impedancias acústicas (ocurrida por el cambio de una fase a otra con densidades distintas) al pasar de sólido a líquido, es inferior que al pasar de sólido a gas, en este último caso, la propagación del sonido se ve afectada en mayor medida y el tiempo de recorrido aumenta.

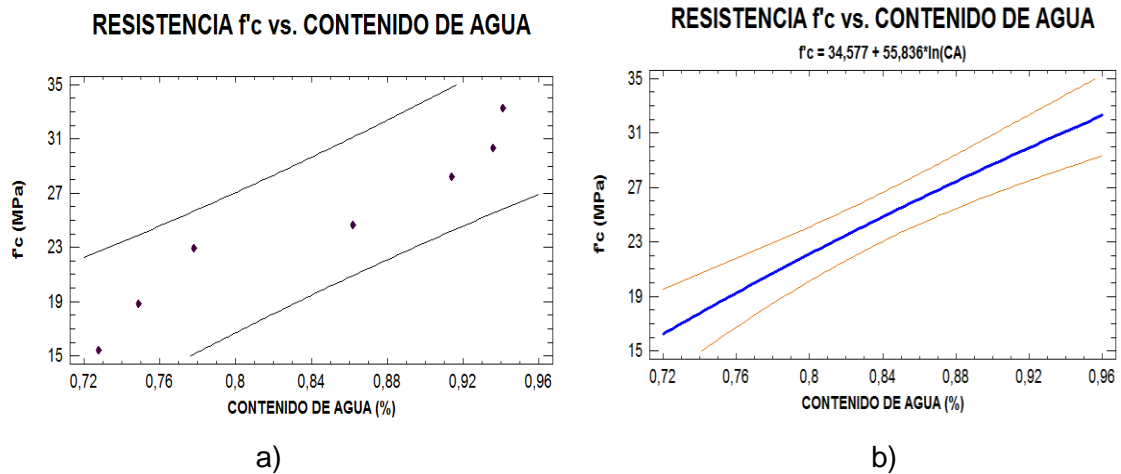
En las probetas curadas en agua, la VPU se ve favorecida por la ganancia en el contenido de agua y la formación de productos de hidratación, que permiten que la onda ultrasónica viaje con la menor interferencia posible, lo que se refleja en un crecimiento de la velocidad (ver figuras 20 y 24). Las probetas curadas en condiciones ambientales, solo se ven favorecidas por la formación de productos de hidratación en el interior de los cilindros, de manera que a menores tiempos de curado, hay menor cantidad de productos con la mayor cantidad de agua en la mezcla arrojando valores bajos de VPU. Por otro lado, en estas últimas probetas la evaporación del agua deja como resultado una cantidad de poros vacíos (o llenos de aire) en la parte exterior que afectan tanto la VPU, como la posibilidad de seguir reaccionando en esas zonas (ver figuras 20 y 25).

#### **4.5 CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO**

Conocidos los valores del contenido de agua y de resistencia a la compresión para los diferentes tiempos de curado, se construyeron las figuras que describen el comportamiento de estas dos variables y la relación existente entre ellas, proponiendo un modelo estadístico para las diferentes condiciones de curado.

**4.5.1 Curadas en agua:** a partir de los valores tomados de las tablas 12 y 22, se obtienen las figuras 26 a y b:

**Figura 26.** Variación de la Resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar.



Fuente: Los Autores.

En la figura 26 a) se observa el crecimiento de la resistencia a la compresión a medida que aumenta el contenido de agua en las probetas curadas en condiciones estándar durante la etapa de curado. En la figura 26 b) se presenta un modelo logarítmico para describir el comportamiento de la resistencia en función del contenido de agua, con un nivel de confianza del 95% (líneas naranjas).

A medida que aumenta el contenido de agua, aumenta la resistencia a la compresión, al ir ocurriendo las reacciones de hidratación (ecuaciones de la 1 a la 6), formando los productos internos y externos de los granos de cemento que van endureciendo el concreto. Es importante resaltar que durante los primeros días, la hidratación del cemento es rápida debido a que hay un contacto directo entre los granos y el agua, produciendo un aumento acelerado en la resistencia; pero después, debido a que los productos de hidratación empiezan a cubrir estos granos, la ganancia de resistencia se hace en menores proporciones tendiendo a presentar un comportamiento asintótico, causado entre otros, por la limitada

difusión del agua dentro del concreto. La tabla 28 muestra la información del modelo estadístico propuesto:

**Tabla 28.** Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,964
<b>R cuadrada</b>	92,907 %
<b>Error Estándar</b>	1,850

Fuente: Los Autores.

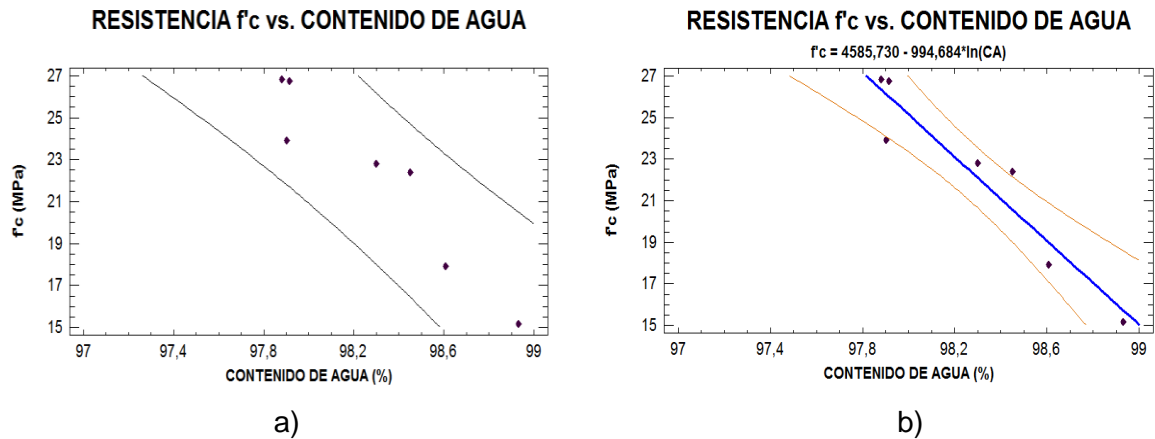
La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = 34,577 + 55,836 \cdot \ln(CA) \quad (21)$$

La ecuación 21, puede ser empleada para determinar la resistencia a la compresión en función del contenido de agua dentro de la etapa de curado, para muestras curadas en condiciones estándar y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.5.2 Curadas en aire:** de manera similar se graficaron los valores de las tablas 14 y 24, obteniéndose las figuras 27 a y b.

**Figura 27.** Variación de la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en las probetas curadas en condiciones ambientales.



Fuente: Los Autores.

En la figura 27 a) se observa el aumento de la resistencia a la compresión a medida que disminuye el contenido de agua en las probetas curadas en condiciones ambientales (lectura de derecha a izquierda). En la figura 27 b) se presenta un modelo logarítmico para describir el comportamiento de la resistencia en función del contenido de agua. De acuerdo a la gráfica, es claro el aumento de la resistencia a pesar de la disminución en el contenido de agua de la mezcla. Como se mencionó anteriormente, es fundamental proporcionar condiciones de humedad para obtener resistencias más elevadas; sin embargo, la pérdida de agua sufrida por las probetas debido a la evaporación, ocurre sólo en la periferia de las mismas; de manera que hacia el interior pueden seguir ocurriendo las reacciones responsables del desarrollo de la resistencia. Esta propiedad sigue viéndose afectada por el fenómeno de secado, puesto que la pérdida de agua en el concreto restringe notoriamente la difusión del agua hacia los lugares de reacción y la formación de productos de hidratación y la durante el periodo de curado. Este modelo estadístico proporciona la siguiente información (ver tabla 29).

**Tabla 29.** Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. El contenido de agua en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b \cdot \ln(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	-0,950
<b>R cuadrada</b>	90,283 %
<b>Error Estándar</b>	1,484

Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = 4585,730 - 994,684 \cdot \ln(CA) \quad (22)$$

La ecuación 22, puede ser empleada para determinar la resistencia a la compresión en función del contenido de agua dentro de la etapa de curado, en muestras curadas en condiciones ambientales y para un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

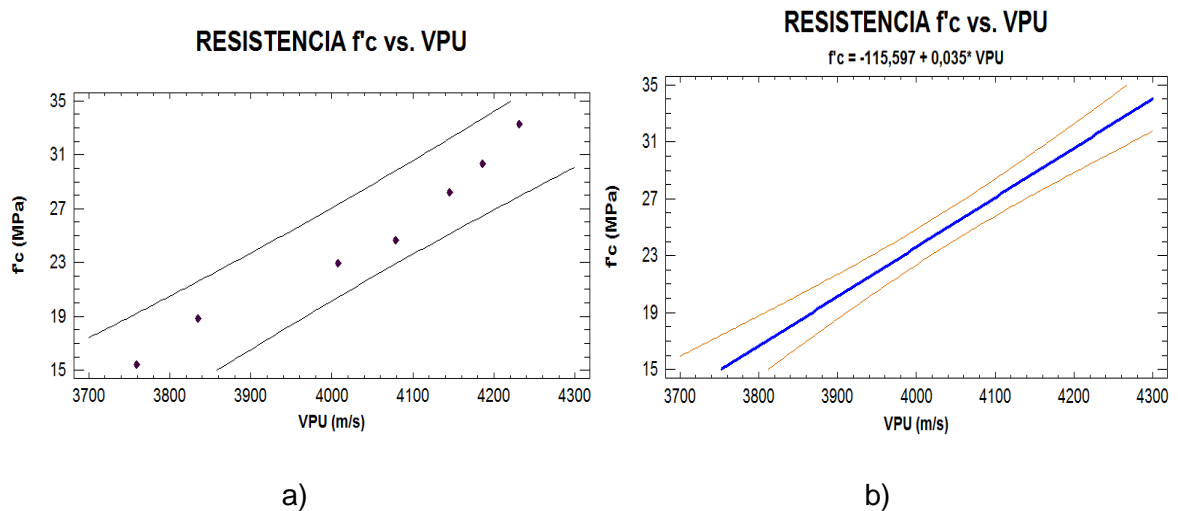
De forma similar a lo sucedido con la VPU, la resistencia a la compresión presentó un crecimiento mientras aumentaba el contenido de agua en probetas curadas en condiciones estándar. Por su parte, las probetas curadas en condiciones ambientales, también presentaron un aumento en la resistencia durante el periodo de curado a pesar de la disminución del agua de mezcla; siendo esta inferior en un 19.5% evaluada a los 28 días de curado, a la resistencia alcanzada por cilindros curados en agua. Una posible explicación se basa en que para tiempos iniciales, la presencia de productos de hidratación (como etringita, monosulfato y trisulfatos de aluminio) no es tan significativa para lograr una resistencia final instantánea en el concreto, haciendo que esta se vaya desarrollando a medida que transcurre el tiempo, mediante la sucesiva ocurrencia de reacciones químicas generadas gracias a la presencia del agua.

## 4.6 CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO

Conocidos los valores de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para cada tiempo de curado, se construyeron las gráficas que describen el comportamiento de estas dos variables y la relación existente entre ellas, proponiendo un modelo estadístico para diferentes condiciones de curado.

**4.6.1 Curadas en agua:** las figuras 28 a y b, se obtienen tomando los valores promedio de las tabla 18 y 22.

**Figura 28.** Variación de la resistencia a la compresión vs. La VPU, en probetas curadas en condiciones estándar.



Fuente: Los Autores.

A partir de la figura 28 a) se observa un crecimiento de la resistencia a la compresión a medida que aumenta la VPU en las probetas curadas en condiciones estándar. En la figura 28 b) se presenta un modelo lineal que muestra una relación directamente proporcional entre la resistencia a la compresión y la

VPU durante el proceso de curado. El modelo lineal que explica la relación entre estas dos variables ha sido apoyado por diferentes autores en algunos de sus trabajos de investigación<sup>[33][38]</sup>. La información obtenida del software se presenta en la tabla 30.

**Tabla 30.** Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. La VPU en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b*(X)$
<b>Coefficiente de Correlación</b>	0,984
<b>R cuadrada</b>	96,739%
<b>Error Estándar</b>	1,254

Fuente: Los Autores.

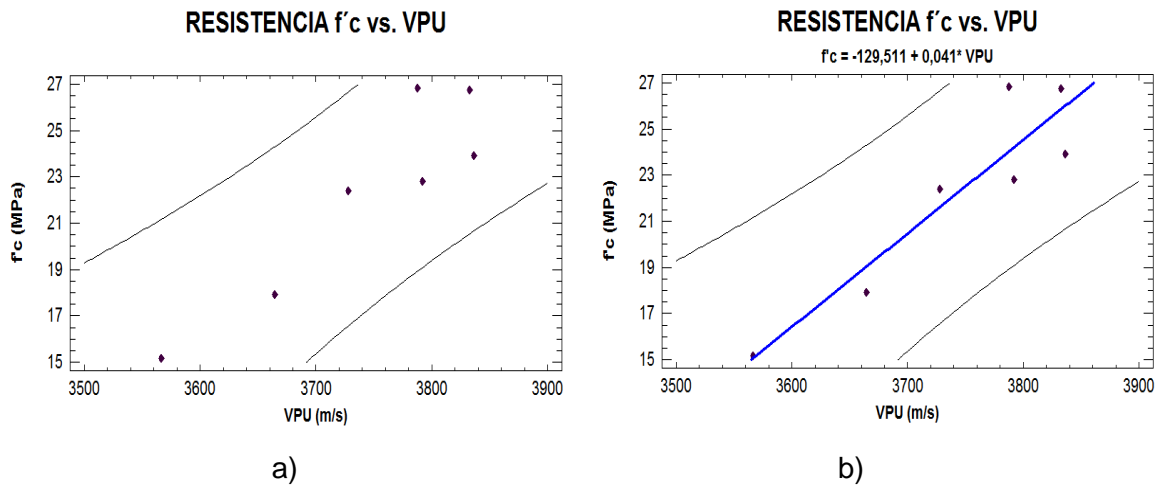
La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = -115,597 + 0,035* VPU \quad (23)$$

La ecuación 23, puede ser empleada para determinar la resistencia en función de la velocidad de pulso ultrasónico a cualquier tiempo dentro de la etapa de curado en muestras curadas en condiciones estándar y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.6.2 Curadas en aire:** de la misma forma como se procedió para las probetas curadas en agua, de las tablas 20 y 24, se obtienen las figuras 29 a y b:

**Figura 29.** Variación de la resistencia a la compresión vs. La VPU, en probetas curadas en condiciones ambientales.



Fuente: Los Autores.

Al igual que sucedió en las probetas curadas en agua, se observa un crecimiento en la resistencia a la compresión a medida que aumenta la VPU en las probetas curadas en condiciones ambientales, (ver figura 29 a). En la figura 29 b) se presenta un modelo lineal que describe el comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la VPU durante el proceso de curado. Por otro lado, en estas gráficas también se manifiesta que los valores alcanzados de resistencia y VPU para las probetas curadas al aire son menores a los obtenidos en las probetas curadas en agua, tal como se muestra en la figura 30. La información obtenida del software se presenta en la tabla 31:

**Tabla 31.** Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. La VPU en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b*(X)$
Coefficiente de Correlación	0,923
R cuadrada	85,216%
Error Estándar	1,831

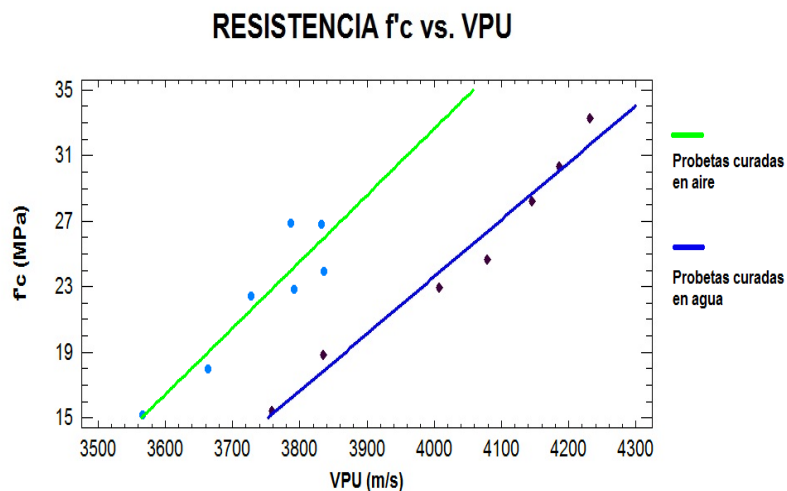
Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = -129,511 + 0,041* VPU \quad (24)$$

La ecuación 24, puede ser empleada para determinar la resistencia a la compresión en función de la VPU a cualquier tiempo dentro de la etapa de curado para muestras curadas en condiciones ambientales y utilizando un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**Figura 30.** Comparación de la resistencia a la compresión vs. La VPU en diferentes condiciones de curado.



Fuente: Los Autores.

Como se puede apreciar en la figura anterior, es posible establecer una correlación gráfica entre estos dos parámetros para obtener un modelo de predicción de la resistencia en función de la VPU. De la figura 30 se puede decir que existe una dependencia lineal <sup>[33]</sup> durante la etapa de curado, entre la resistencia a la compresión y la VPU en probetas curadas tanto en condiciones estándar como ambientales. Se observa que la línea correspondiente a las muestras curadas en agua está desplazada hacia la derecha de la línea de las muestras curadas en aire; indicando mayores valores de VPU en éstas, y por tanto, mayores resistencias.

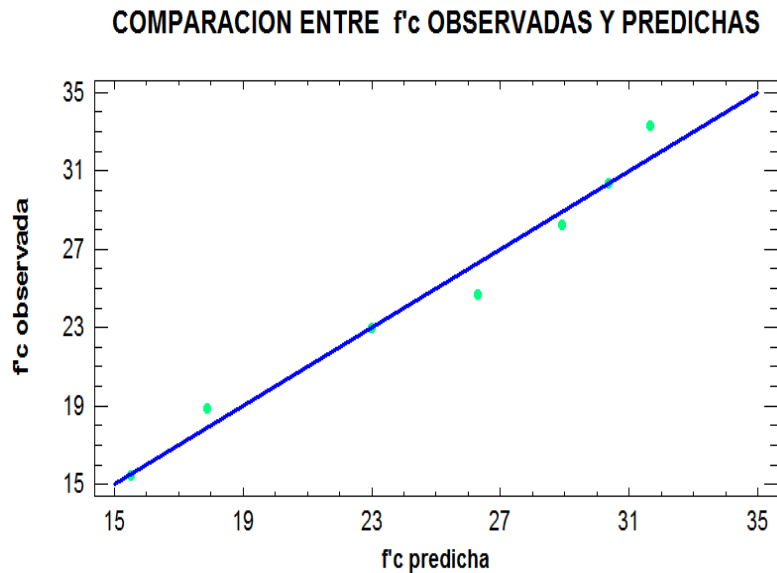
El modelo lineal puede verse afectado por diversos factores como la relación de agua cemento, las proporciones de la mezcla, el contenido y tipo de cemento, así como el contenido, la forma y el tamaño de agregados. El estudio de la influencia de estos factores ha sido abarcado por otros autores <sup>[38][40]</sup>, los cuales han establecido diversas correlaciones de acuerdo con los resultados de sus investigaciones. Es importante recordar que los modelos presentados en este capítulo corresponden a una sola mezcla, con una relación a/c de 0.5, de la cual se elaboraron probetas que se dejaron curar al aire y en condiciones estándar respectivamente.

#### **4.7 CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, EL CONTENIDO DE AGUA Y LA VPU.**

Para predecir la resistencia del concreto mediante técnicas no destructivas, mientras más información se conozca de la mezcla, más precisos serán los modelos obtenidos de las correlaciones. A continuación se establece una correlación entre los tres factores estudiados durante el trabajo de investigación (CA, VPU Y  $f'c$ ), proponiendo un modelo para determinar la resistencia en función del contenido de agua y la VPU para cada condición de curado, realizando una regresión múltiple mediante el software Statgraphics.

**4.7.1 Probetas curadas en agua:** Para la obtención de este modelo se tomaron los valores promedio de la Resistencia a la compresión de la tabla 22 como variable dependiente y los promedios de las tablas 18 y 12 para la VPU y el contenido de agua respectivamente, como variables independientes. En la figura 31 se presenta la tendencia del modelo de predicción y los valores de resistencia predichos y observados de los ensayos.

**Figura 31.** Comparación entre los valores de resistencia a la compresión observados en los ensayos y los predichos por el modelo ajustado, en probetas curadas en condiciones estándar.



Fuente: Los Autores.

En la tabla 32 se presentan los parámetros del modelo.

**Tabla 32.** Parámetros del modelo obtenido para la correlación entre resistencia a la compresión, la VPU y el contenido de agua en condiciones estándar.

Tipo de Tendencia	$Y = a + b*(X)$
R cuadrada	97,168 %
Error Estándar	1,307

Fuente: Los Autores.

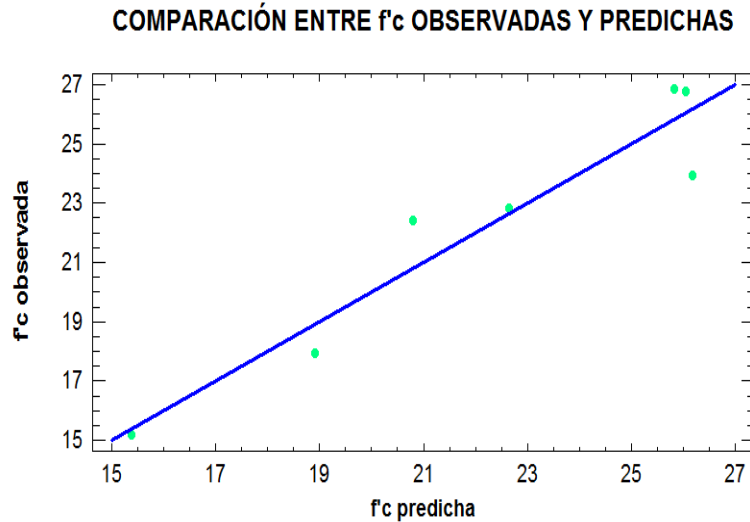
La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = -96,8142 + 16,6054*CA + 0,0266718* VPU \quad (25)$$

La ecuación 25 puede usarse para hallar la resistencia a la compresión de los especímenes curados en condiciones estándar en función del contenido de agua y la VPU durante el período de curado y para un mismo diseño de mezcla empleado en la investigación.

**4.7.2 Probetas curadas al aire:** de la misma forma que en las probetas curadas en agua, se obtuvo el modelo tomando los valores promedio de las tablas 24, 20 y 14 para la resistencia a la compresión, la VPU y el contenido de agua. En la figura 32 se presenta la tendencia del modelo propuesto y los valores de resistencia predichos y observados.

**Figura 32.** Comparación entre los valores de resistencia a la compresión observados en los ensayos y los predichos por el modelo ajustado, en probetas curadas en condiciones ambientales.



Fuente: Los Autores.

En la tabla 33 se presentan los parámetros del modelo.

**Tabla 33.** Parámetros del modelo obtenido para la correlación entre resistencia a la compresión, la VPU y el contenido de agua en condiciones ambientales.

Tipo de Tendencia	Y = a + b*(X)
R cuadrada	90,955 %
Error Estándar	1,60

Fuente: Los Autores.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$f'c = 739,811 - 7,703*CA + 0,0106* VPU \quad (26)$$

La ecuación 26 puede usarse para hallar la resistencia a la compresión de los especímenes curados en condiciones ambientales en función del contenido de agua y la VPU durante el período de curado y para el mismo diseño de mezcla.

De las figuras 31 Y 32, la línea azul corresponde a la tendencia propuesta por el modelo, mediante la cual se puede establecer una equivalencia directamente proporcional entre la resistencia predicha (eje x) y la observada en los ensayos (eje y). Los puntos observados en estas figuras corresponden a los valores de resistencia promedio obtenidos por día en los ensayos de compresión durante la etapa de curado, aquellos puntos que se encuentran por encima de la línea, corresponden a los valores de resistencia que resultaron ligeramente superiores en los ensayos de compresión, con respecto a los arrojados por el modelo propuesto. De manera similar, los puntos debajo de la línea azul, son aquellos que resultaron ligeramente inferiores a los valores predichos por el modelo. Las figuras permiten hacer una comparación entre valores predichos y los observados en cada punto.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en las probetas de concreto elaboradas con una relación agua/cemento de 0,5 y curadas durante 28 días tanto en condiciones estándar como ambientales, se puede concluir que:

- En las probetas curadas en condiciones estándar, aumenta paulatinamente el contenido de agua, mientras que las probetas curadas en condiciones ambientales van perdiendo el agua de la mezcla debido a su evaporación con la atmósfera circundante, a través del tiempo de curado. Para ambos casos, se encontró un modelo logarítmico que describe el comportamiento del contenido de agua en las muestras mientras transcurre la etapa de curado.
- Indistintamente de las condiciones de curado, la velocidad de pulso ultrasónico y la Resistencia a la compresión en las probetas de concreto aumentan durante el tiempo de curado describiendo un comportamiento logarítmico. Los valores alcanzados tanto en la VPU como en la Resistencia son menores para las muestras curadas en condiciones ambientales.
- El contenido de agua influye sobre la velocidad de pulso Ultrasónico de manera que su aumento disminuye la dispersión de las ondas, causada por el cambio de medio a través del concreto, obteniéndose así mayores valores de VPU en condiciones estándar durante la etapa de curado. Un modelo logarítmico puede explicar adecuadamente este comportamiento para las diferentes condiciones de curado tratadas en este trabajo.

- Un aumento en el contenido de agua de las muestras garantiza la ocurrencia de las reacciones químicas responsables del endurecimiento del concreto, proporcionándoles una mayor resistencia a la compresión durante el tiempo de curado. Este fenómeno puede representarse por un modelo logarítmico propuesto tanto para muestras curadas en condiciones estándar como condiciones ambientales con un alto nivel de confiabilidad.
- La velocidad de pulso ultrasónico presentó una relación directamente proporcional con la resistencia a la compresión durante la etapa de curado; siendo el modelo lineal el que mejor se ajusta a la variación de la resistencia en función de la VPU, para cada condición de curado.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, al realizar una correlación entre las tres variables estudiadas; tanto el contenido de agua como la velocidad de pulso ultrasónico tienen una relación directa con la resistencia a la compresión en muestras de concreto ensayadas durante el proceso de curado; es decir, un aumento en el valor de cada una de estas variables respectivamente, afecta de manera proporcional la resistencia a la compresión de las muestras, según el modelo lineal propuesto para cada una de las condiciones de curado.
- Las condiciones de curado tienen un efecto directo sobre las propiedades obtenidas en el concreto. En la presente investigación, se pudo verificar la importancia que tiene brindarle al material durante los primeros 28 días, la cantidad de agua suficiente para garantizar la ocurrencia de las reacciones químicas, que forman los productos hidratados responsables del endurecimiento del concreto.

## 6. RECOMENDACIONES

Terminado el presente trabajo de investigación se recomienda:

- Realizar una medición continua y a edades más tempranas en el material (iniciando en el proceso de fraguado), que otorgue las condiciones iniciales de la mezcla y una sucesiva serie de datos que proporcionen un modelo con mayor precisión, donde se puedan evidenciar los cambios ocurridos en la mezcla a través del tiempo.
- Continuar la investigación para mayores edades del concreto, con el fin de estimar un modelo de predicción más completo que permita evaluar la durabilidad del mismo.
- Simular diferentes ambientes de curado y estudiar la relación existente entre la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión en esos ambientes, que permitan establecer nuevas correlaciones para aplicarlas a otras ciudades del País.
- Investigar el efecto que tiene el empleo de aditivos y adiciones en la mezcla de concreto, sobre las correlaciones halladas en la presente investigación, para las mismas condiciones de curado; con el fin de obtener modelos de aplicación industrial.
- Estudiar el comportamiento de la VPU a partir de la densidad del concreto; empleando diferentes tamaños de agregados y variando la relación a/c; para obtener una mezcla apropiada de acuerdo con su aplicación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acueducto metropolitano de Bucaramanga. [En línea]. <[http://www.amb.com.co/ DocumentalInfo/control\\_calidad\\_bga2010.pdf](http://www.amb.com.co/DocumentalInfo/control_calidad_bga2010.pdf)>. [Citado el 13 de marzo del 2010].
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM C33-01. USA, 2001.
- [3] \_\_\_\_\_. *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM C150-07. Philadelphia, USA, 2007.
- [4] \_\_\_\_\_. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM C597-02. USA, 2003.
- [5] \_\_\_\_\_. Especificación Normalizada para Cemento Portland. ASTM C 150.
- [6] \_\_\_\_\_. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33-01.
- [7] Asociación Colombiana De Productos De Concreto-ASOCRETO. Tecnología y Propiedades. Segunda Edición. Bogotá D.C: 1997. p. 11-142.
- [8] BRAVO Ernesto F y CORNEJO Antonio E. Cemento portland. Material: Cemento portland [En línea]. <[http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento\\_Fabricacion.pdf](http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento_Fabricacion.pdf)>. [Citado el 22 de noviembre de 2009].
- [9] CARCAÑO R, Solís y MORENO, Eric. Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido sub-húmedo. 2005. p. 1-14.
- [10] CASALI, Ricardo A, et.al. Predicción de la resistencia a la compresión y determinación de propiedades estructurales a partir de ensayos no destructivos. En: IV Conferencia Panamericana de END (2007: Buenos Aires). Buenos Aires: AAENDE. 2007. p. 1-12.
- [11] CEMENTOS BIO BIO. Cemento, fabricación y clasificación. [En línea]. <[http://www.cbb.cl/cementos/PutDocument.aspx?File=576096\\_CEMENTO%20FABRICACION.pdf](http://www.cbb.cl/cementos/PutDocument.aspx?File=576096_CEMENTO%20FABRICACION.pdf)> [citado 22 de febrero 2010].

- [12] CNS FARNELL. Ultrasonic pulse velocity testing technical reference manual: operating instructions. CNS Farnell limited. 2008.
- [13] ECHAVARRIA, César. Modulo hormigón: Estructura y microestructura de hormigón. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 2007. p. 2-17.
- [14] ECHEVARRIA, Ricardo. Ultrasonido. Neuquén: Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Ingeniería. 2002. p 10-13.
- [15] El concreto: Agregado grueso del concreto [Anónimo]. [En línea]. <<http://elconcreto.blogspot.com/search/label/El%20Agua%20del%20Concreto>>. [Citado el 12 de octubre del 2009].
- [16] El concreto: Agua en al concreto [Anónimo]. [En línea]. <<http://elconcreto.blogspot.com/search/label/El%20Agua%20del%20Concreto>>. [Citado el 12 de octubre del 2009].
- [17] HUANCA, Samuel L. Diseño de Mezclas de Concreto. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. 2006. p. 1-20.
- [18] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje del material que pasa tamiz. Norma NTC 78. Bogotá D.C: ICONTEC. 1995.
- [19] \_\_\_\_\_. Agua Para La Elaboración De Concretos. Norma NTC 3459. Bogotá D.C: ICONTEC.
- [20] \_\_\_\_\_. Cemento Portland. Clasificación y Nomenclatura. Norma NTC 30. Bogotá D.C: ICONTEC.
- [21] \_\_\_\_\_. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. Norma NTC 92. Bogotá D.C: ICONTEC. 1995.
- [22] \_\_\_\_\_. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. Norma NTC 1377. Bogotá D.C: ICONTEC. 1995.
- [23] \_\_\_\_\_. Ensayo Para Determinar El Asentamiento Del Concreto. Norma NTC 396. Bogotá D.C: ICONTEC.
- [24] \_\_\_\_\_. Especificaciones de los agregados de hormigón. Norma NTC 174. Bogotá D.C: ICONTEC. 2000.

- [25] \_\_\_\_\_. Hormigón y sus agregados. Norma NTC 385. Bogotá D.C: ICONTEC. 1999.
- [26] \_\_\_\_\_. Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto. Norma NTC 4325. Bogotá D.C: ICONTEC. 2006.
- [27] \_\_\_\_\_. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. Norma NTC 176. Bogotá D.C: ICONTEC. 1995.
- [28] \_\_\_\_\_. Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino. Norma NTC 237. Bogotá D.C: ICONTEC. 1995.
- [29] \_\_\_\_\_. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos). Norma NTC 77. Bogotá D.C: ICONTEC. 1994.
- [30] INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones: Pruebas de resistencia a la compresión. Imcyc, 2006. p. 1-6.
- [31] JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESENER, Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco. Hormigón Armado. Ed. 14. Barcelona: Gustavo Gili S.A. 2000. p. 8-125.
- [32] Jones, R. Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, RILEM Int. Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris, Vol. 1, Paper No. A-17 January 1954, 137. RILEM Bull., 19 (Part 2), Nov. 1954.
- [33] MALHOTRA, V. Mohan y CARINO Nicholas J. Handbook Nondestructive Testing Concrete. En: The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Florida: CRC Press LLC. 2004.
- [34] MEHTA P, Kumar y MONTEIRO, Paulo J.M. Concrete. Microstructure Properties and Materials. Tercera edición. McGraw- Hill: 2006.
- [35] Microestructura del cemento [Anónimo]. [En línea]. <<http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Microestructura%20del%20cemento.pdf>>. [Citado el 12 abril del 2009].
- [36] NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Agrietamiento por contracción plástica. U.S.A: NRMCA. 1998. p. 1-2.

- [37] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Tecnología del hormigón. Capitulo 1 [En línea]. <: [www.scribd.com/.../Tecnologia-Del-Hormigon-Cap-1Antecedentes-Generales](http://www.scribd.com/.../Tecnologia-Del-Hormigon-Cap-1Antecedentes-Generales)>. [Citado en junio 2009].
- [38] POPOVICS, John S. Ultrasonic testing of concrete structures. En: Materials Evaluation. January: 2005. p 50-55.
- [39] RODRÍGUEZ GONZALES, Manuel y BONAL CACERES, Rolando. El contenido de agua en el concreto y su incidencia sobre el valor de la velocidad de pulso ultrasónico. Coteq. 2002. p. 1-8.
- [40] SOLÍS CARCAÑO Rómel. MORENO, Éric Iván y CASTILLO, William R. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. "Ingeniería Revista Académica", Universidad Autónoma de Yucatán. México. 2004 p. 41-52.
- [41] WIKIPEDIA [En línea]. <[http://es.wikipedia.org/wiki/Hormigón#Historia\\_del\\_hormig.C3.B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Hormigón#Historia_del_hormig.C3.B3n)>. [Citado el 27 de febrero del 2010].

## ANEXOS

### Anexo A. Formato de informe con los resultados obtenidos en la distribución granulométrica de los agregados.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL		RESULTADO DE ENSAYOS			
SOLICITANTE <u>Edwin Durán - Dapa Berra (UIS)</u>					FECHA D 05   M 03   A 10
MATERIAL, PROCEDENCIA, DESCRIPCIÓN <u>Pesadero - Color Gris.</u>					
GRAVEDADES ESPECÍFICAS			A. FINO	A. GRUESO	
REAL	A. FINO	A. GRUESO	PESO UNITARIO SUELTO	<u>1419 kg/m<sup>3</sup></u>	<u>1383,6 kg/m<sup>3</sup></u>
APARENTE	<u>2.74</u>	<u>2.68</u>	PESO UNITARIO COMPACTADO	<u>1584 kg/m<sup>3</sup></u>	<u>1559,5 kg/m<sup>3</sup></u>
APARENTE S S S	<u>2.67</u>	<u>2.59</u>	ABSORCIÓN %	<u>1,46</u>	<u>1,96%</u>
			PORCENTAJE DE VACÍOS %	<u>40,67</u>	<u>39,97%</u>
MATERIA ORGÁNICA :	FINO	<u>1%</u>	GRUESO	ICONTEC	<u>NTC</u>
					<u>127</u>
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO :					
	TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
A. FINO	4	<u>36,9</u>	<u>3,69</u>	<u>3,69</u>	<u>96,31</u>
	8	<u>157,2</u>	<u>15,72</u>	<u>19,41</u>	<u>80,59</u>
	10	<u>163,0</u>	<u>16,3</u>	<u>35,71</u>	<u>64,29</u>
	30	<u>251,3</u>	<u>25,13</u>	<u>60,84</u>	<u>39,16</u>
	50	<u>203,0</u>	<u>20,3</u>	<u>81,14</u>	<u>18,86</u>
	100	<u>99,7</u>	<u>9,97</u>	<u>91,11</u>	<u>8,89</u>
	FONDO	<u>88,9</u>	<u>8,89</u>	<u>100</u>	<u>0</u>
	TOTAL	<u>1000</u>	<u>100</u>	PESO MUESTRA	<u>1000 g</u>
	MÓDULO DE FINURA	<u>2,92</u>	TAMAÑO EFECTIVO	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD	
A. GRUESO	1	<u>---</u>	<u>---</u>	<u>---</u>	<u>---</u>
	3/4"	<u>---</u>	<u>---</u>	<u>---</u>	<u>---</u>
	1/2"	<u>37,11</u>	<u>53,01</u>	<u>53,01</u>	<u>46,99</u>
	3/8"	<u>1889,6</u>	<u>29,00</u>	<u>80,01</u>	<u>19,99</u>
	4	<u>1349,9</u>	<u>19,28</u>	<u>99,29</u>	<u>0,71</u>
	FONDO	<u>49,5</u>	<u>0,71</u>	<u>100</u>	<u>0</u>
	TOTAL	<u>---</u>	<u>---</u>	PESO MUESTRA	<u>7000 g</u>
	TAMAÑO MÁXIMO	<u>3/4"</u>	TAMAÑO EFECTIVO	<u>1/2"</u>	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
OBSERVACIONES :					
ENSAYO			V° B°		
			JEFE LABORATORIO HORMIGÓN SIMPLE		

## Anexo B. Diseño de mezcla del concreto.

El método seguido para desarrollar el diseño de mezcla empleado en esta investigación fue el ACI (American Concrete Institute); el cual se basa en tablas empíricas experimentales mediante las cuales se determinan los diferentes componentes de la mezcla. A continuación se presentan los cálculos y los resultados obtenidos paso a paso, para la elaboración de un metro cúbico (1 m<sup>3</sup>) de concreto, apoyados en una guía de Tecnoconcreto S.A. basada en este método.

a) **Selección del asentamiento:** Es un valor escogido de acuerdo a la aplicación de la mezcla, en este caso, el interés de la investigación se centra en una mezcla comercial de consistencia media, que de acuerdo con la siguiente tabla, corresponde a un asentamiento de 3 pulgadas.

**Tabla i.** Asentamiento recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad.

Consistencia	Asentamiento (cm)	Tipo de estructura y condiciones de colocación
<b>Muy seca</b>	0 – 2.0	Vigas prefabricadas de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
<b>Seca</b>	2.0 – 3.5	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.
<b>Semi-seca</b>	3.5 – 5.0	Pavimentos con vibraciones normales. Fundiciones de concreto simple. Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración.
<b>Media</b>	5.0 – 10.0	Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas, con mediana compactación, columnas, vigas y muros reforzados con vibración.

**Tabla i. (Continuación)**

<b>Húmeda</b>	10.0 – 15.0	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzo. Trabajar donde la colocación sea difícil. Nuevamente no es apropiado para compactarlo con demasiado.
---------------	-------------	--

Autores: Tecnoconcreto S.A. Guía para el diseño de mezclas.

**b) Selección del tamaño máximo de agregado:** El tamaño máximo de agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura y con un asentamiento dado. Con base en el análisis granulométrico del agregado grueso presentado en el anexo a, se determinó el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal empleado en la mezcla:

**Tamaño máximo agregado grueso:  $\frac{3}{4}$ " (19,05 mm)**

**Tamaño máximo nominal:  $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm)**

**c) Estimación del contenido de agua:** La cantidad de agua (por volumen unitario de concreto) que se requiere para producir un asentamiento dado, depende del tamaño máximo de agregado. En la tabla ii se muestran las cantidades de agua necesaria para un tamaño máximo de agregado empleado en la mezcla.

**Tabla ii.** Agua en kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados.

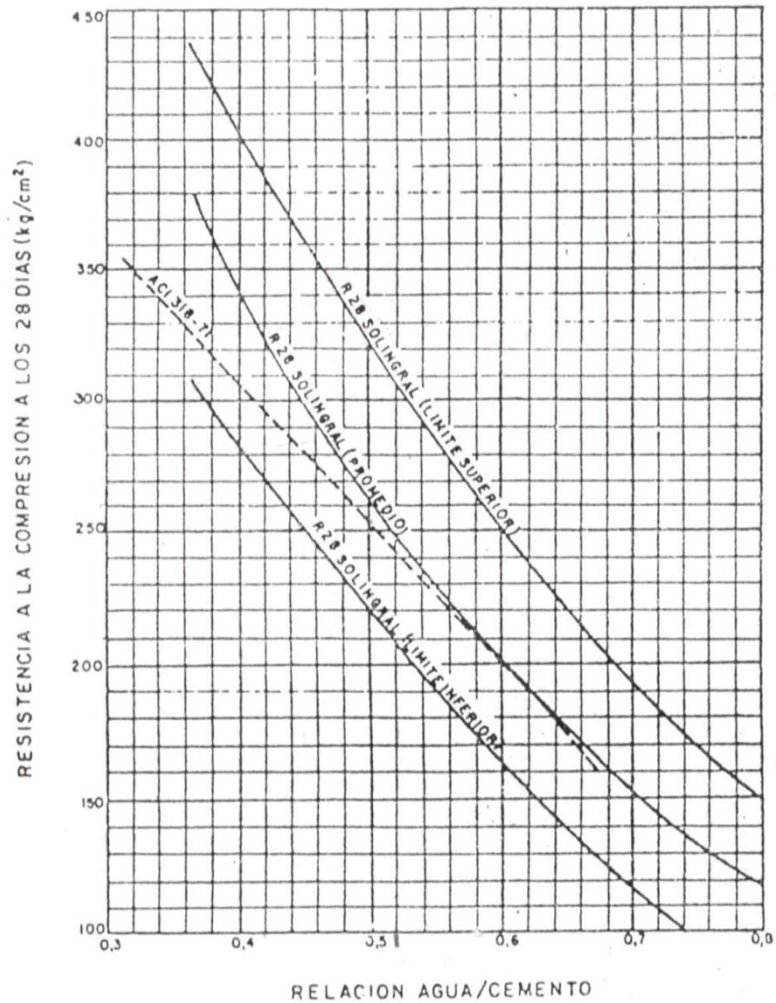
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento o (cm)	10 mm.	13 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	75 mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
5 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire (%)	3	2.3	2	1.5	1	0.5	0.3

Autores: Tecnoconcreto S.A. Guía para el diseño de mezclas.

De acuerdo con la tabla ii, para el tamaño máximo de agregado a emplear en la mezcla (20 mm aproximadamente) y el asentamiento de 3" deseado (75 mm) corresponde una cantidad de 200 kg de Agua.

- d) Determinación de la resistencia de diseño:** el propósito de la presente investigación no se centra en proponer un valor para resistencia a la compresión; sino en inspeccionar la resistencia alcanzada por la mezcla a los 28 días de curado para una relación agua/cemento específica.
- e) Selección de la relación a/c:** la relación agua/cemento se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por factores como durabilidad y propiedades para el acabado. Para el desarrollo del presente trabajo, se fijó inicialmente una relación de agua/cemento comercial (0.5), a partir de la cual se estima una resistencia a la compresión aproximada a los 28 días de curado. De la figura i, se observa que para una relación  $a/c = 0.5$ , corresponde una resistencia a la compresión de  $250 \text{ kg/cm}^2$  (25 MPa) aproximadamente, a los 28 días de curado.

**Tabla iii.** Resistencia a la compresión en función de la relación a/c.



Autores: Tecnoconcreto S.A. Guía para el diseño de mezclas.

- f) **Cálculo del contenido de cemento:** la cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones hechas en los pasos c y d. El contenido de cemento requerido es igual al contenido estimado de agua (A) en la mezcla, dividido por la relación agua/cemento (a/c).

$$\text{CONTENIDO DE CEMENTO (C)} = \frac{A}{A/C} \quad [I]$$

$$(C) = \frac{200}{0.5} = 400 \text{ kg.}$$

$$\text{VOLÚMEN DE CEMENTO} = \frac{C}{\text{Peso específico}}$$

$$\text{Vol. C} = \frac{400}{3.03} = 132$$

**g) Estimación del contenido de agregado grueso:** agregados con la misma granulometría y tamaño máximo, producirán un concreto de trabajabilidad satisfactoria. El volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto se obtiene multiplicando el volumen seco y compactado obtenido de la tabla iii, por la relación entre la masa unitaria compactada y la densidad aparente seca del agregado.

$$b = (b/b_0) * b_0 \quad [III]$$

en donde:

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

(b/b<sub>0</sub>) = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto (se obtiene de la tabla iii)

b<sub>0</sub> = Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

**Tabla iii.** 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

Autores: Tecnoconcreto S.A. Guía para el diseño de mezclas.

A partir del módulo de finura (2.93) para el agregado fino relacionado en el anexo a, en la tabla anterior, se ubica el valor de tamaño máximo de agregado (20 mm aprox.) y el módulo de finura de la arena (3 aprox.), para hallar el valor de  $(b/b_0)$  equivalente a 0.60 en este caso. Con estos valores y el peso unitario compactado del agregado grueso ( $1573 \text{ kg/m}^3$ ) del anexo a, se determina el contenido de agregado grueso mediante la ecuación [II]:

$$b = 0.6 \frac{\text{m}^3 \text{ de agregado grueso}}{\text{m}^3 \text{ de concreto}} * 1560 \frac{\text{Kg de agregado grueso}}{\text{m}^3 \text{ de agregado grueso}} = 936 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen A.G.} = \frac{b}{\text{Densidad Esp. Aparente S.S.S. A.G.}} = \frac{936}{2.59} = 361 \text{ l}$$

**h) Estimación del contenido de agregado fino:** esta cantidad se determina por la diferencia entre el volumen total de la mezcla ( $1 \text{ m}^3$ ) y la suma de los volúmenes de cemento, agua y agregado grueso.

$$\text{Agregado fino: } 1000 - (A + C + 361)$$

$$\text{Volumen A.F.} = 1000 - (200 + 132 + 361) = 307 \text{ L}$$

**Peso del Agregado Fino:** Volumen A.F. \* Densidad Esp. Aparente S.S.S. A.F.

$$\text{Peso A.F.} = 307 * 2.67 = 820 \text{ kg}$$

Las cantidades anteriormente calculadas corresponden a la dosificación de cada componente para 1 m<sup>3</sup> de mezcla de concreto. Estos valores multiplicados por el volumen del molde otorgan la cantidad de cada elemento para la fabricación de una probeta. A continuación se presenta un ejemplo en el cálculo de la cantidad de agregado grueso necesario para la elaboración de 37 probetas.

Cantidad de Agregado grueso por m<sup>3</sup> de concreto: 936 kg.

$$\text{Volumen del molde: } V = \pi * (0.052)^2 * (0.207) = 1.76 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Peso A.G. para una probeta: } 936 * 1.76 * 10^{-3} = 1.65 \text{ kg.}$$

$$\text{Peso A.G. para 37 probetas: } 1.65 * 37 = 61.05 \text{ kg.}$$

De la misma forma se procede con cada elemento para hallar la dosificación de la mezcla en la fabricación de 37 probetas cilíndricas de concreto; el cuadro resumido con cada cantidad se presenta en el capítulo 4.