

**RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO Y LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CONCRETOS CON ADICIONES DE  
ESCORIA.**

**REYNALDO ANDRÉS GUTIÉRREZ GIL  
MANUEL ANDRÉS MANTILLA DURÁN**

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

**2011**

**RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO Y LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CONCRETOS CON ADICIONES DE  
ESCORIA.**

**REYNALDO ANDRÉS GUTIÉRREZ GIL  
MANUEL ANDRÉS MANTILLA DURÁN**

Trabajo de grado, presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Metalúrgico

**Área: Ensayos No Destructivos**

**Modalidad: Investigación**

**Directora**

**Ms.C Luz Amparo Quintero**

**Codirector**

**Ph.D. Ricardo Cruz**

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

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias, por su amor y apoyo incondicional y sobre todo por creer siempre en nosotros.

A la directora de nuestro proyecto Ms.C Luz Amparo Quintero, por su paciencia y por brindarnos la confianza necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A la escuela de Ingeniería Civil, por proporcionarnos sus instalaciones para llevar a cabo las pruebas de esta investigación.

Al señor Jairo Hernández, técnico del edificio Álvaro Beltrán Pinzón de Ingeniería Civil, por su tiempo, su colaboración y amistad.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica, a sus profesores y técnicos, por brindarnos los elementos necesarios en nuestra formación profesional.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	18
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACION.....	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	19
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo General .....	23
1.3.2 Objetivos Específicos.....	23
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	24
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO .....	24
2.1.1 Componentes del concreto .....	24
2.1.1.1 Cemento .....	25
2.1.1.2 Agua de la mezcla .....	27
2.1.1.3 Agregados o áridos.....	28
2.1.1.4 Aire .....	30
2.1.1.5 Aditivos .....	31
2.1.2 Proceso de fabricación del concreto .....	38
2.1.2.1 Caracterización de la materia prima .....	38
2.1.2.2 Diseño de mezcla .....	39
2.1.2.3 Fraguado .....	39

2.1.2.4 Condiciones de curado y de secado del concreto.....	41
2.2 ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO .....	43
2.2.1 Velocidad de pulso ultrasónico. ....	43
2.3 ENSAYO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO.....	48
2.3.1 Resistencia a la compresión .....	48
3. METODOLOGÍA .....	50
3.1 FASE 1: Revisión y análisis bibliográfico .....	51
3.2 FASE 2: Proceso de fabricación del concreto.....	51
3.2.1 Etapa 1. Caracterización de la materia prima .....	51
3.2.2 Etapa 2. Diseño de mezcla .....	53
3.2.3 Etapa 3. Elaboración de probetas.....	53
3.2.4 Etapa 4. Fraguado y curado .....	56
3.3 FASE 3: Preparación de equipos para ensayos destructivos y no destructivos .....	57
3.3.1 Etapa1. Capacitación para el conocimiento de los equipos.....	57
3.3.2 Etapa2. Manejo y calibración de los equipos.....	57
3.4 FASE 4: Ensayos experimentales.....	60
3.4.1 Etapa 1. Inspección visual. ....	60
3.4.2 Etapa 2. Ensayo de ultrasonido. ....	61
3.4.3 Etapa 3. Ensayo de resistencia a la compresión .....	62
3.5 FASES 5 y 6: Análisis de resultados y elaboración del informe final. ....	63
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	64

<b>4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.1 Caracterización de la materia prima .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.1.1. Análisis granulométrico.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.1.2. Análisis de la escoria .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.2. Diseño de mezcla .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.1 Inspección visual.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.2. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.3 Ensayo de resistencia a la compresión.....</b>	<b>79</b>
<b>4.3. CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....</b>	<b>85</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>98</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de cemento .....	26
Tabla 2. Requisitos químicos del cemento Portland .....	27
Tabla 3. Límites máximos permisibles de concentración de sustancias en el agua .....	28
Tabla 4. Composición química de escoria de altos hornos de algunos países industrializados .....	35
Tabla 5. Clasificación de la calidad del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico según Leslie y Cheesman.....	46
Tabla 6. Clasificación del concreto según resistencia a la compresión .....	49
Tabla 7. Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua utilizada para la realización de las probetas. ....	52
Tabla 8. Programación general de ensayos .....	55
Tabla 9. Parámetros de trabajo del equipo CNS FARNELL LTDA PUNDIT PLUS. ....	59
Tabla 10. Propiedades de los agregados .....	65
Tabla 11. Gravedades específicas.....	65
Tabla 12. Análisis granulométrico del agregado fino .....	66
Tabla 13. Análisis granulométrico del agregado grueso .....	67
Tabla 14. Dosificación para una relación A/C = 0,35 .....	70
Tabla 15. Dosificación para una relación A/C = 0,45 .....	71
Tabla 16. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico A/C=0,35....	75

Tabla 17. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico $A/C=0,45$ ....	76
Tabla 18. Valores promedio de resistencia a la compresión para $A/C = 0,35$ .....	81
Tabla 19. Valores promedios de resistencia a la compresión para $A/C=0,45$ .....	82
Tabla 20. Expresiones matemáticas y coeficientes de correlación para una relación $A/C=0,35$ .....	88
Tabla 21. Expresiones matemáticas y coeficientes de correlación para una relación $A/C=0,45$ .....	88

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Ubicación del cemento Portland y la escoria en el sistema ternario CaO - SiO <sub>2</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	37
Figura 2. Método de transmisión directa.....	46
Figura 3. Método de transmisión semi-directa.....	47
Figura 4. Método de transmisión indirecta.....	47
Figura 5. Metodología para el desarrollo de la investigación.....	50
Figura 6. Proceso de elaboración de las probetas. a) Homogeneización de materiales; b) Llenado y compactación de los moldes; c) Acabado final.....	56
Figura 7. Equipo de ultrasonido.....	58
Figura 8. Maquina universal TREBEL para ensayo de compresión.....	60
Figura 9. Pie de rey digital de 0.02mm de sensibilidad.....	61
Figura 10. Disposición de la probeta para la prueba de compresión.....	63
Figura 11. Composición química de la escoria.....	68
Figura 12. Estado superficial de las Probetas a ensayar. a) Estado general de la probeta. b) Superficie no uniforme. c) Porosidad.....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

pág.

<b>Gráfico 1.</b> Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C = 0,35 a diferentes edades .....	<b>77</b>
<b>Gráfico 2.</b> Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C = 0,45 a diferentes edades .....	<b>79</b>
<b>Gráfico 3.</b> Valores de resistencia a la compresión en un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C=0,35 a diferentes edades .....	<b>83</b>
<b>Gráfico 4.</b> Valores de resistencia a la compresión en un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C=0,45 a diferentes edades .....	<b>84</b>
<b>Gráfico 5.</b> Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para un concreto con adiciones de 0%, 20% y 40% de escoria. ....	<b>86</b>
<b>Gráfico 6.</b> Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para un concreto con adiciones de 0%, 20% y 40% de escoria. ....	<b>87</b>

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>ANEXO A.</b> Metodología para el diseño de mezcla .....	<b>98</b>
<b>ANEXO B.</b> Tabla de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para una relación A/C = 0.35 .....	<b>104</b>
<b>ANEXO C.</b> Tabla de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para una relación A/C = 0.45 .....	<b>105</b>
<b>ANEXO D.</b> Gráficos de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para las relaciones A/C = 0.35 y 0.45 .....	<b>106</b>
<b>ANEXO E.</b> Gráficos de correlación entre las medidas de resistencia a la compresión y el tiempo de curado para las relaciones A/C = 0.35 y 0.45 .....	<b>108</b>
<b>ANEXO F.</b> Gráficos de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para las relaciones A/C = 0.35 y 0.45.....	<b>110</b>
<b>ANEXO G.</b> Tabla de valores de los diámetros y longitudes promedio en las probetas de concreto de relación A/C = 0,35.....	<b>112</b>
<b>ANEXO H.</b> Tabla de valores de los diámetros y longitudes promedio en las probetas de concreto de relación A/C = 0,45.....	<b>113</b>

## GLOSARIO

- **Aditivos:** Ingredientes del concreto, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, que se integran a la dosificación inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo para obtener o dar alguna característica especial al concreto hidráulico (impermeabilizantes, acelerantes, retardantes, fluidizantes, inclusores de aire, estabilizadores, endurecedores, etc.)
- **Agregado:** Es toda aquella partícula de mineral, relativamente inerte que ocupa el mayor volumen de la mezcla de concreto.
- **Agregado fino:** El agregado fino consistirá de arena natural, arena manufacturada o combinación de ambas, que pasa el tamiz N° 4 (4.75mm) y es predominantemente retenido en el tamiz N°200 (0.075mm). La arena manufacturada consistirá de polvo de piedra en su condición natural o lavado que se ajusta a los requisitos de calidad especificadas.
- **Agregado grueso:** El agregado grueso consistirá de grava, de piedra o grava quebrada o una mezcla de materiales anteriores, este agregado es retenido en su totalidad en el tamiz N° 4 (4.75mm)
- **Análisis granulométrico:** Etapa en la cual se separa una masa de agregado en fracciones de igual tamaño a través de una serie de tamices cuyas características se ajustan según la norma.
- **Clínker:** Es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento. Caliza cocida.
- **Concreto:** Es la mezcla de un material aglutinante (cemento), agua y aditivos si se prefiere, que al endurecer forma un todo compacto y después de un tiempo desarrolla grandes propiedades mecánicas.
- **Dosificación:** Es el diseño racional de mezclas de concreto. Es un proceso por el cual se obtiene la correcta combinación de cemento, agregados, agua y aditivos, cuando sean necesarios, con el fin de producir un concreto conforme a determinadas especificaciones.

- **Durabilidad del concreto:** Se define como la resistencia que presenta el concreto a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o a cualquier otro proceso de deterioro.
- **Granulometría:** Procedimiento mediante el cual se establece las proporciones de las partículas de los diversos tamaños que componen el agregado fino o grueso.
- **Gravedad específica:** Relación peso/volumen de un cuerpo comparado con la relación peso/volumen del agua.
- **Hidratación:** Es la reacción química entre el cemento y el agua para ligar la pasta de cemento.
- **Humedad:** Es la cantidad de agua superficial retenida por la partícula, su influencia está en la mayor o menor cantidad de agua necesario en la mezcla.
- **Modulo de finura:** Es un factor empírico que se obtiene al sumar los porcentajes retenidos acumulados desde el tamiz N°4 (4.75mm) hasta el tamiz N°100 (0.150mm) y dividirlos entre 100.
- **Peso unitario del concreto:** Está definido como la cantidad de masa por unidad de volumen y generalmente se expresa en  $\text{Kg/m}^3$ . Este valor depende de la densidad y tamaño máximo de los agregados, la cantidad de aire atrapado y del contenido de agua y cemento.
- **Relación agua- cemento:** Relación entre las masas de agua (excluyendo el agua absorbida por los agregados) y de cemento en una mezcla de hormigón.
- **Resistencia a la compresión:** Resistencia a la compresión: Se puede definir como la máxima resistencia medida en un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se exprese en kilogramos por centímetro cuadrado.
- **Trabajabilidad:** Facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado.

## RESUMEN

**TITULO:** RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CONCRETOS CON ADICIONES DE ESCORIA.\*

**AUTORES:** GUTIÉRREZ GIL Reynaldo Andrés. MANTILLA DURÁN Manuel Andrés \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concreto, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Relación Agua/Cemento, Resistencia a la Compresión, Adiciones, Escoria.

El ultrasonido es utilizado para evaluar la resistencia a la compresión de concretos con o sin adiciones minerales. En esta investigación se evaluó la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en concretos adicionados con escoria. La escoria utilizada como aditivo mineral para realizar un reemplazo parcial del cemento Portland provenía de una empresa siderúrgica. Se elaboraron probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 20cm de longitud, con porcentajes de adición de escoria de 0%, 20% y 40%, siendo las de 0% de adición escoria, las probetas de referencia. Estos porcentajes de adición se trabajaron con dos relaciones A/C (0,35 y 0,45). El curado de las probetas se realizó en condiciones ambientales bajo techo. La velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión fueron determinadas en los días 3, 7, 14, 21 y 28 de curado. Tanto los valores de velocidad de pulso ultrasónico como los valores de resistencia a la compresión fueron muy bajos en los primeros días de curado para los porcentajes de adición de escoria utilizados (20% y 40%). Sin embargo, dichos valores aumentaron a medida que transcurría el tiempo de curado para todas las muestras. Se comprobó que los mejores resultados se obtuvieron siempre en las probetas de referencia, es decir, aquellas sin adición de escoria. Se han logrado determinar curvas para las dos relaciones A/C, adicionadas con escoria, pudiendo así estimar con precisión resistencias y propiedades del concreto construido. El trabajo se realiza relacionando el ensayo no destructivo con el ensayo destructivo, obteniendo por medio de la velocidad de pulso ultrasónico correlaciones que permiten interpretar de manera acertada la resistencia del concreto. La relación encontrada entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión fue una relación de tipo lineal.

---

\* Proyecto De Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Directora: Ms.C.Luz Amparo Quintero. Codirector: Ph.D. Ricardo Cruz.

## ABSTRACT

**TITLE:** RELATIONSHIP BETWEEN ULTRASONIC PULSE VELOCITY AND COMPRESSIVE STRENGTH IN CONCRETES WITH ADITTIONS OF SLAG.\*

**AUTHORS:** GUTIÉRREZ GIL Reynaldo Andrés. MANTILLA DURÁN Manuel Andrés \*\*

**KEYWORDS:** Concrete, Ultrasonic Pulse Velocity, Relationship Water/Cement, Strength Resistance, Additions, Slag.

Ultrasound is used to evaluate the compressive strength of concrete with or without mineral admixtures. In this research, the relationship between ultrasound pulse velocity and compressive strength of concrete admixed with slag is evaluated. The slag used as a mineral admixture for a partial replacement of Portland cement, came from a steelmaking company. Cylindrical specimens with 10cm of diameter and 20cm of length were done, with slag percentages of 0%, 20% and 40%, being the ones with 0%, the reference specimens. These percentages of slag addition were carried out in two W/C ratios (0,35 and 0,45). The curing of specimens was carried out in environmental conditions under roof. Ultrasonic pulse velocity and compressive strength were determined at the 3, 7, 14, 21, and 28-day curing period. Both ultrasonic pulse velocity and compressive strength values were very low for all the levels of mineral admixture (20% and 40%) at an early age of curing. However, these values increased as curing period was increasing for all the samples. It was proved that the best results were obtained from the reference specimens or the specimens without slag addition. Curves have been determined for both W/C ratios supplemented with slag, thus being able to accurately estimate the strength and properties of concrete specimens. The study is done, relating destructive and non-destructive testing, obtaining by ultrasonic pulse velocity correlations that allow to rightly interpreting the resistance of concrete. The relationship between ultrasonic pulse velocity and compressive strength was linear.

---

\* Proyecto De Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Directora: Ms.C.Luz Amparo Quintero. Codirector: Ph.D. Ricardo Cruz.

## INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más importantes en el desarrollo de la infraestructura de un país. Cada año se consumen miles de toneladas de concreto para restaurar o rehabilitar edificaciones.

El uso de aditivos minerales en las mezclas de concreto, como la escoria proveniente de procesos siderúrgicos, se hace cada vez más común en las construcciones modernas, debido a consideraciones económicas, técnicas y ambientales.

La presencia de aditivos minerales en el concreto imparte mejoramientos significativos en la trabajabilidad y en la durabilidad, así como en algunos casos, mejora sus propiedades mecánicas [41].

En la presente investigación se hace uso de ensayos destructivos (resistencia a la compresión) y no destructivos (velocidad de pulso ultrasónico) para evaluar el efecto de la adición de escoria siderúrgica en concretos. La escoria utilizada es proveniente de la empresa ACERÍAS PAZ DEL RÍO.

# **1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACION**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El concreto ha sido por mucho tiempo uno de los materiales más utilizados en el campo de la construcción, el cual ha tenido un avance tecnológico y científico para beneficio de la sociedad, sin embargo, su gran desventaja a la hora de determinar sus propiedades, radica esencialmente en que la única forma para determinarlas, era la extracción de núcleos de las estructuras, lo cual las debilitaba, generando riesgos debido al daño causado.

Para un mejor análisis en las estructuras de concreto es necesario realizar el estudio de este material a temprana edad, para determinar su máxima resistencia a la compresión, previendo así futuras fallas. Este estudio se realizará por medio de la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico (V.P.U.).

La velocidad de pulso ultrasónico ha sido utilizada durante los últimos años como ensayo no destructivo para determinar las propiedades de los concretos, ya que estas pueden variar dependiendo de los agregados de la mezcla.

## **1.2 ESTADO DEL ARTE**

El ACI (American Concrete Institute) y algunos autores, han recomendado la utilización de la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico para determinar las diferentes propiedades y condiciones físicas del concreto como la resistencia a la compresión. Una de las aplicaciones más comunes de la técnica ha sido la verificación del nivel de calidad del concreto basándose en la relación

entre la velocidad de pulso ultrasónico con la resistencia a la compresión. De esta manera, Malhotra<sup>1</sup> estableció un criterio de aceptación para el concreto, en el cual calificó al material como excelente, si presenta velocidades de pulso arriba de los 4.575(m/s) metros por segundo, bueno con velocidad en el rango de 3.660(m/s) a 4. 575(m/s), cuestionable si el pulso transita entre 3.050(m/s) y 3.660(m/s), pobre para velocidades entre 2.135(m/s) y 3.050(m/s) y finalmente muy pobre con mediciones por debajo de los 2.135(m/s).

Chung y Law<sup>2</sup> pusieron en duda este tipo de criterio de calificación para el concreto, ya que encontraron que pequeñas diferencias en la velocidad de pulso, en ocasiones reflejan diferencias relativamente grandes en la calidad de los concretos. Lo anterior se debe a que son muchos los factores que influyen en la relación de la velocidad con la resistencia del concreto.

Sturup, Vecchio y Caratin<sup>3</sup> establecieron que tanto la velocidad de pulso ultrasónico como la resistencia a la compresión están influenciadas por los mismos factores, pero éstos pueden afectar a cada una de las dos variables en diferentes medidas. Los factores más importantes que estos autores encontraron fueron: las propiedades de los componentes, las proporciones establecidas, las condiciones de curado, el contenido de humedad del concreto y la acción del deterioro ambiental.

Por su parte Anderson y Seals<sup>4</sup> encontraron que la relación agregados/cemento tienen un efecto significativo en la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso, ya que cuando se varía esta razón se pueden generar grandes

---

<sup>1</sup> Malhotra V. M. y Carino N. J. (1991). *"Handbook on nondestructive testing of concrete"*. CRC Press, Boca Raton, U.S.A.

<sup>2</sup> H. W. Chung and K. S. Law (1983) *"Diagnosing in Situ Concrete by ultrasonic Pulse Technique"* Concrete International.

<sup>3</sup> V.R. Sturup, F.J. Vecchio, and H. Caratin *Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength. Special Publication. Ontario Canada, (1982).*

<sup>4</sup> Anderson D, Seals R.: *"Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength"*. Journal of the American Concrete Institute. March-April, n° 2, (1981)

diferencias en los valores de la velocidad ultrasónica, debido a que el pulso es generalmente más rápido a través del agregado grueso que en el interior de la pasta de cemento; mientras que el mismo cambio en esta relación puede producir en la resistencia, apenas una pequeña diferencia o incluso un cambio en sentido inverso.

Türkmen<sup>5</sup>, encontró que los aditivos minerales adicionados al concreto, aumentan su trabajabilidad y su durabilidad, así como sus propiedades mecánicas dependiendo del porcentaje adicionado en la mezcla de concreto. Expresó que para reemplazos del agregado por cemento Portland por encima del 50 %, tanto los valores de resistencia a la compresión como los valores de velocidad de pulso ultrasónico son muy bajos, por lo cual recomienda utilizar adiciones no mayores de 40%.

Muchos investigadores han encontrado que la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión se ve afectada significativamente cuando se varía el tipo de agregado, manteniendo bajo control de laboratorio la mayoría de los otros factores, como son: tipo de cemento, proporciones, procedimiento de compactación y curado, contenido de humedad, entre otros. Por esto, autores como Jenkins<sup>6</sup> han llegado a la conclusión que debido a que no hay una relación estándar entre la velocidad y la resistencia, la técnica no debería ser usada para predecir la resistencia del concreto; excepto en los casos en los que se haya establecido una relación entre las dos variables para el tipo de concreto específico sujeto a evaluación.

---

<sup>5</sup> Türkmen Ibrahim, *Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Atatürk, Turquía. Abril de 2003.

<sup>6</sup> Jenkins R. S.: *"Non destructive testing as evaluation tool"*. *Concrete International Design and Construction ACI*, February, (1985).

De acuerdo a lo establecido arriba, Castellanos<sup>7</sup> estudió la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión del concreto, utilizando una muestra de agregados calizos triturados provenientes de la ciudad de Mérida, México; por su origen geológico, los agregados de esta región provienen de formaciones sedimentarias del Cenozoico de la Península de Yucatán. Castellanos logró obtener un coeficiente de determinación de 0,86 para la población estudiada, el cual representa una correlación estadística entre las variables, razonablemente buena.

En la presente investigación se busca responder a la pregunta: ¿De qué manera influyen las adiciones de escoria sobre las propiedades físicas del concreto evaluando éstas mediante la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico?

---

<sup>7</sup> Castellanos G.: *"Aplicaciones del método de velocidad de pulso ultrasónico correlacionado con la resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad del concreto hidráulico"*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán. (1985),

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Evaluar la relación entre la velocidad del pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en concretos con adiciones de escoria.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar la velocidad de pulso ultrasónico V.P.U. y resistencia a la compresión en concretos con diferentes porcentajes de adición de escoria.
- Evaluar la velocidad de pulso ultrasónico V.P.U. y la resistencia a la compresión en concretos adicionados con escoria con relaciones A/C de 0.35 y 0.45.
- Determinar la velocidad de pulso ultrasónico V.P.U. y la resistencia a la compresión en diferentes tiempos de curado de concretos dosificados con adiciones de escoria.

## **2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO**

Para obtener un buen concreto no solo basta contar con materiales de buena calidad mezclados en proporciones correctas, es necesario también tener en cuenta factores como el proceso de mezclado, transporte, colocación o vaciado y curado. El concreto presenta, como las piedras naturales, una alta resistencia a la compresión, pero una baja resistencia a la tracción, por lo cual se refuerza con varillas de acero, para que sean estas las que soporten tales esfuerzos; esto es lo que llamamos “CONCRETO ARMADO”.

#### **2.1.1 Componentes del concreto**

El concreto se elabora con arena (agregado fino) y grava (agregado grueso) que componen la mayor parte de la mezcla, y una pasta la cual está compuesta de cemento hidráulico entre 10-15%, agua entre 15-20% y aire atrapado o aire incluido intencionalmente entre 1-2%. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto [23].

Los agregados son partículas con resistencia mecánica adecuada y a condiciones de exposición a la intemperie; no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto.

Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas. La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado. [23].

**2.1.1.1 Cemento:** El cemento es uno de los principales componentes del concreto y se obtiene de la pulverización del clínker, el cual es producido por la calcinación hasta la fusión incipiente de materiales calcáreos y arcillosos. Está constituido por los siguientes componentes:

1. Silicato tricálsico, el cual le confiere la resistencia inicial e influye directamente en el calor de hidratación.
2. Silicato dicálcico, el cual define la resistencia a largo plazo y no tiene tanta incidencia en el calor de hidratación.
3. Aluminato tricálsico, es un catalizador en la reacción de los silicatos y ocasiona un fraguado violento. Para retrasar este fenómeno, es preciso añadirle yeso durante la fabricación del cemento.
4. Aluminio-Ferrito tetracálcico, influye en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación.
5. Componentes menores: óxidos de magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio.

Existen diversos tipos de cemento, los cuales están especificados en la norma ASTM-C-150-99<sup>a</sup> [4] y se muestran a continuación en la tabla 1.

- **Calor de hidratación del cemento**

El concreto genera calor durante su endurecimiento como resultado del proceso químico por el cual el cemento reacciona con el agua para formar una pasta dura y estable. El calor generado se denomina calor de hidratación; varía en cantidad y en velocidad según los distintos cementos. El calor de hidratación resulta particularmente útil a bajas temperaturas ya que a menudo genera el calor suficiente para suministrar una temperatura de curado sin que sean necesarias otras fuentes de calor, particularmente en elementos de mayor masa. El calor liberado durante la hidratación

compensará en parte la pérdida de calor durante la colocación, el acabado y las operaciones tempranas de curado.

El calentamiento en la hidratación del cemento es función de la proporción de sus distintos constituyentes, de forma que es importante conocer y cuantificar el contenido de los mismos, así como de los materiales que sean incorporados como adiciones.

**Tabla 1. Tipos de cemento**

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

**Fuente.** Norma ASTM C 150 [4].

En la tabla 2 se establecen los requerimientos químicos del cemento Portland acordes con la norma NTC 321 [34].

**Tabla 2. Requisitos químicos del cemento Portland**

	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4a)	Tipo 5a)
Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), mín %	-	-	21,0	-	-	-
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), máx %	-	-	6,0	-	-	-
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), máx %	-	-	6,0	-	6,5	-
Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), máx %	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), máx %	3,5	3,5	-	4,5	-	-
Pérdida al fuego, máx %	-	5,0	4,0	4,0	3,5	4,0
Residuo insoluble, máx %	-	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Silicio tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) <sup>b)</sup> , máx %	-	-	-	-	35,0	-
Silicato dicálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) <sup>c)</sup> , mín %	-	-	-	-	40,0	-
Aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) <sup>d)</sup> , máx %	-	-	8,0	15,0 <sup>d)</sup>	7,0	5,0
( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) + ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), máx %	-	-	58,0 <sup>d)</sup>	-	-	-
Ferrialuminato tetracálcico más el doble de aluminato tricálcico <sup>b)</sup> ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) + 2 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), o solución sólida ( $4\text{C}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ + 2 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) el que es aplicable, máx %	-	-	-	-	-	20,0

Fuente. Norma Técnica Colombiana NTC 321 [34]

**2.1.1.2 Agua de la mezcla:** El agua, ocupa entre el 14 % y el 21 % del volumen de la mezcla. La razón de que los cementos sean hidráulicos es que éstos tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de complejas reacciones químicas [15].

El agua como material dentro del concreto es el elemento que hidrata las partículas del material cementante y hace que éstas desarrollen sus propiedades aglutinantes. Al mezclarse el agua con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos diluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua queda fija (agua de hidratación) en la estructura rígida de la pasta y el resto queda como agua evaporable.

Los límites máximos permisibles de concentración de sustancias en el agua están especificados en la tabla 3. [16].

**Tabla 3. Límites máximos permisibles de concentración de sustancias en el agua**

SUSTANCIAS Y Ph	LÍMITE MÁXIMO
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	200 ppm
Sales de magnesio	125 ppm
Sales solubles	300 ppm
Sólidos en suspensión	10 ppm
Materia orgánica expresada en oxígeno consumido	0.001 ppm
Ph	6 < pH < 8

Fuente. <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/El%20Agua%20del%20Concreto>

**2.1.1.3 Agregados o áridos:** Los agregados, ocupan entre el 59 % y el 76 % del volumen de la mezcla [23]. Son esencialmente materiales de forma granular, que por conveniencia han sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). En general, provienen de las rocas naturales, pero también existen agregados artificiales. Como agregados o áridos para concreto pueden tomarse en consideración todos aquellos materiales que, teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia del grano), no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico, es decir que son inertes y garantizan una adherencia suficiente con la pasta de cemento endurecida.

- **Agregado grueso**

En el diseño de concretos, los agregados requieren de especial consideración, ya que ocupan el volumen más grande que cualquier otro ingrediente, e influyen significativamente en la resistencia y en otras propiedades.

Usualmente, los concretos de alta resistencia son producidos con agregados de peso normal. Sin embargo existen reportes de concreto de alta resistencia producidos con agregados de peso ligero para concreto estructural y agregados pesados para concreto de alta densidad. El agregado grueso influirá significativamente en la resistencia y en las propiedades estructurales del concreto. Por esta razón, debe escogerse un agregado grueso que sea suficientemente duro, libre de fisuras o de planos débiles.

Las propiedades del agregado grueso también afectan las características de adherencia entre el agregado y el mortero y los requisitos de agua de mezclado. Se ha demostrado que los agregados de tamaño más pequeño proporcionan mayor resistencia potencial. Para cada nivel de resistencia del concreto, existe un tamaño óptimo para el agregado grueso que producirá la mayor resistencia a compresión por kilogramo de cemento.

Es común el agregado con un tamaño máximo nominal de 3/4 de pulgada para producir resistencias del concreto de hasta 63.5 MPa; y de 3/8 pulgada por encima de 63.5 MPa [39]. En general, el agregado de tamaño más pequeño produce la resistencia más alta para una mezcla dada. La selección del Tamaño máximo del agregado es una consideración importante cuando también son importantes la optimización del módulo de elasticidad, la fluencia y la contracción por secado.

- **Agregado fino**

La granulometría y la forma de la partícula del agregado fino son factores significativos en la producción de concreto de alta resistencia. La forma de la partícula y la textura de la superficie pueden tener un efecto tan grande en los requisitos del agua de mezclado y la resistencia a compresión del concreto como lo tienen con el agregado grueso. Los agregados finos de la misma

granulometría, pero con una diferencia de 1% en el contenido de vacíos puede dar como resultado una diferencia de 3.5 L por m<sup>3</sup> en la demanda de agua.

La cantidad de la pasta requerida por unidad de volumen de una mezcla de concreto se reduce al tiempo que se incrementa el volumen relativo del agregado grueso con respecto al material fino. Debido a que la cantidad del material cementante contenido en el concreto de alta resistencia es grande, el volumen de los finos tiende a ser alto. Consecuentemente, el volumen de la arena debe mantenerse al mínimo necesario para lograr trabajabilidad y una buena compactación. De esta manera, será posible producir concretos de más alta resistencia para un contenido dado de material cementante. Son preferibles los agregados finos con un módulo de finura (MF) en el rango de 2.5 a 3.2 para concretos de alta resistencia<sup>8</sup>. Las mezclas de concreto hechas con un agregado fino que tenga un MF menor que 2.5 pueden ser "pegajosas" y dar como resultado una pobre trabajabilidad y un requerimiento de agua más alto.

A veces es posible mezclar arenas de diferentes fuentes para mejorar su granulometría y su capacidad para producir resistencias más altas. Si se usan arenas manufacturadas, debe considerarse un posible incremento en la demanda de agua para la trabajabilidad. La forma de la partícula y el incremento del área superficial de las arenas manufacturadas en comparación con las arenas naturales pueden afectar en forma importante la demanda de agua.

**2.1.1.4 Aire:** Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, es normal que quede aire incluido dentro de la masa (aire naturalmente atrapado), el cual posteriormente es liberado por los procesos de compactación. Sin embargo, como

---

<sup>8</sup> El módulo de fineza se determina dividiendo por 100 la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices U.S. Standard N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50 y N°100.

la compactación no es perfecta, queda siempre un aire residual dentro de la masa endurecida que usualmente está entre 1 % y 3 % del volumen de la mezcla.

Por otra parte, el concreto puede contener también aire intencionalmente incluido (entre 1 % y 8 % del volumen de la mezcla) lo cual se logra con el uso de aditivos o con cementos que tengan agentes inclusores de aire.

**2.1.1.5 Aditivos:** Desde mediados del siglo XX, se desarrolló toda una tecnología sobre la utilización de los aditivos, que son materiales distintos del agua, los agregados y los materiales cementantes, los cuales que se utilizan como ingredientes en concretos y morteros y se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado. Estos pueden ocupar usualmente entre un 0,1 % a un 2 % y en términos de su procedencia y función, pueden ser: aditivos químicos (reductores de agua, retardantes o acelerantes); aditivos inclusores de aire; ó, aditivos minerales. Los aditivos reductores de agua de alto rango, o superplastificantes, se utilizan para producir concretos de alta resistencia con una baja relación A/C manteniendo los altos asentamientos requeridos para una adecuada colocación y compactación del concreto. Los superplastificantes se diferencian de los aditivos reductores de agua convencionales en que no afectan la tensión superficial del agua en forma significativa; de esta manera pueden utilizarse en dosis más altas sin producir una excesiva incorporación de aire. Los efectos particulares de los aditivos reductores de agua varían con los diferentes cementos, con cambios en la relación A/C, con la temperatura de mezclado, con la temperatura ambiente y con otras condiciones del trabajo por lo cual se requieren en general mezclas de prueba.

### **Tipos de aditivos**

Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los concretos, durante la mezcla se realiza un reemplazo parcial o total del cemento Portland con aditivos, de tipo mineral o químico. Entre los diferentes aditivos, se tienen:

- **Cenizas volantes:** Son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en si las partículas no combustibles removida de las chimeneas de gases. Las cenizas volantes utilizadas en el concreto deben tener conformidad con la norma ASTM C618. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre el 5 y el 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente y la composición de la ceniza volante y del desempeño requerido al concreto. Las características de la ceniza volante pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema.
- **Humo de sílice:** Es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. El humo de sílice está disponible como un polvo dosificado o en forma de material acuoso. La norma para el humo de sílice es la ASTM C1240. Generalmente se utiliza entre el 5 y el 12% en peso de los materiales cementantes para estructuras de concreto que necesitan alta resistencia o una permeabilidad significativamente reducida al agua. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, el vaciado y el curado del concreto con este material.
- **Puzolanas naturales:** Varios materiales naturales poseen, o pueden ser procesados para poseer propiedades puzolánicas. Estos materiales están también cubiertos por la especificación normativa ASTM C618. Las puzolanas naturales tienen generalmente un origen volcánico y estos materiales silíceos tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente.

- **Escoria Siderúrgica:** La escoria siderúrgica se produce durante la fabricación del acero y puede ser definida como un agregado de origen mineral que se compone de silicatos de calcio y ferritas combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio y magnesio. Su combinación de propiedades físicas de dureza, resistencia y textura superficial la hacen superior a la grava para ser utilizada como agregado para concreto. Es también utilizada como material cementante, como puzolana artificial en la elaboración de cementos mezclados. La proporción de sus componentes varía ampliamente, y su estructura física depende del proceso de fabricación y del método de enfriamiento. Si el enfriamiento es rápido, la escoria queda bien “templada” (vitrificada) y granulada. Se puede utilizar de dos maneras: moliéndola conjuntamente con clínker portland y yeso; o pulverizándola hasta una finura apropiada y mezclándola con cemento portland. Ello permite, que al entrar en contacto con el cemento portland se active su capacidad cementante en presencia de agua (reacción con el hidróxido de calcio).

La escoria siderúrgica se ha utilizado por su estabilidad, ya que como material rugoso se entrelaza automáticamente, formando una superficie estable y con mucha resistencia a la tracción, es resistente a la intemperie, su porosidad la hace muy resistente a cambios de clima y humedad. Para condiciones extremas es el mejor agregado existente, por consiguiente esta posee alto peso específico, es más pesada que la mayoría de los agregados. Su gravedad específica es de 3.1 y su peso 1600-2000 kg/m<sup>3</sup>, esto le da gran resistencia en su utilización en carreteras, ya que es útil en subidas y curvas. En su utilización como agregado, soporta el impacto de cargas pesadas y llantas a alta velocidad, su dureza es de 7 en la escala de MOHS. Su gran capacidad de carga y de unión interna de la escoria la hacen ideal como balastro para ferrocarril y utilizada como agregado para estacionamientos ya que es resistente a la intemperie.

Un estudio hecho por Salazar [37] en el cual se evalúa el impacto que tiene el proceso de curado sobre la durabilidad de los concretos adicionados con diferentes proporciones de escoria siderúrgica, muestra que para las pruebas hechas en concretos con adiciones y sin ellas y en condiciones de curado a la intemperie, los mejores resultados se dan para los concretos sin adición. Además, destaca que el comportamiento de la resistencia a la compresión a edades tempranas o menores a 28 días, tiende a ser lineal presentando un incremento en estos valores, después del día 28 de curado. Adicionalmente encontró un comportamiento de tipo exponencial entre los días 28 y 90 de curado. Por otra parte, por medio de esta investigación se pudo comprobar el efecto de las condiciones de curado sobre los valores de resistencia a la compresión encontrándose que el método con el cual se obtuvieron los mejores resultados, fue el curado húmedo (curado a condiciones estándar).

### **Características químicas de las escorias.**

A continuación se muestra en la tabla 4 las composiciones químicas generales de la escoria de altos hornos de algunos países altamente industrializados [19].

Numerosas investigaciones han propuesto fórmulas para evaluar la capacidad hidráulica de las escorias, según su composición química. Inicialmente, este método tuvo acogida pues los cálculos son fáciles y los datos de composición se obtienen de la planta siderúrgica, que lleva los ensayos de control. La aplicación de estas relaciones ha venido a menos, al comprobarse que los factores básicos en la actividad hidráulica de la escoria son la granulación y la finura de molienda.

**Tabla 4. Composición química de escoria de altos hornos de algunos países industrializados**

	CLÍNKER	EE.UU.	U.K.	ESPAÑA	JAPÓN
%SiO <sub>2</sub>	22.3	37.5	35.1	38.6	32.4
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.8	8.3	13.6	8.4	16.5
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5	0.4	0.3	0.5	0.4
%CaO	65.8	40.0	38	41.9	41.8
%MgO	1.3	10.1	8.9	9.3	5.9
%K <sub>2</sub> O	0.3	0.4	0.7	0.5	-
%Na <sub>2</sub> O	0.5	-	0.3	0.3	-

**Fuente.** PCA Research and Development Bulletin RD112T. Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.

Las escorias se pueden calificar según el índice de basicidad, aplicando la siguiente ecuación [19]:

$$P = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

**Ecuación 1**

Donde P es el índice de basicidad de la escoria.

Si:  $0.4 \leq P \leq 1.0$  La escoria es ácida.

Si:  $1.0 \leq P \leq 1.6$  La escoria es básica.

En el diagrama ternario de la figura 1, se presenta la clasificación de la escoria y otros materiales, atendiendo a su índice de basicidad.

La escoria también se puede calificar como material cementante, por medio de la siguiente ecuación [19]:

$$F = \frac{\%CaO + \%CaS + \frac{1}{2}\%MgO + \%Al_2O_3}{\%SiO_2 + \%MnO}$$

## Ecuación 2

Donde F es una constante que determina la capacidad cementante de la escoria en los concretos [19].

Si:  $F \leq 1.5$  La escoria tiene bajo poder cementante.

Si:  $1.5 < F < 1.9$  La escoria tiene aceptable poder cementante.

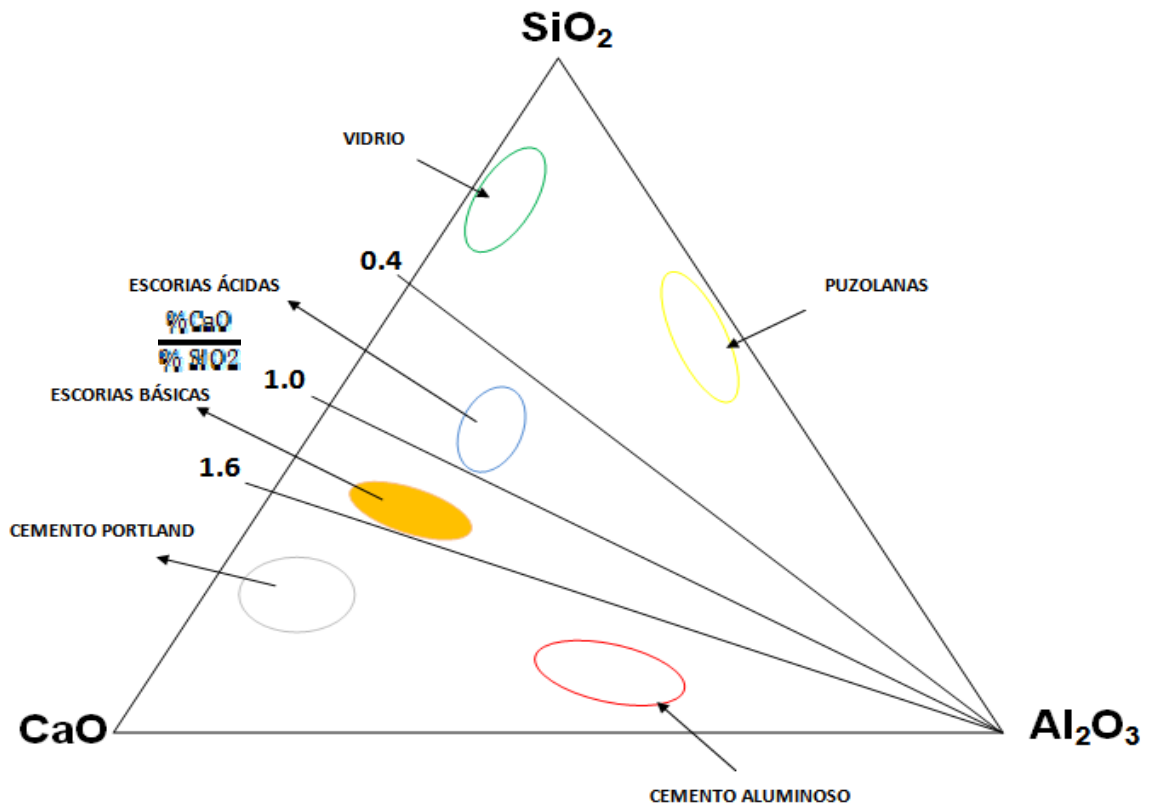
Si:  $F > 1.9$  La escoria tiene excelente poder cementante.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que de acuerdo con la norma NTC 4018 [35], los valores máximos permisibles de azufre en las escorias para adiciones al concreto, es de 2.5%.

Además de lo anterior, para conocer la naturaleza y el comportamiento de algunos materiales no metálicos como vidrios, escorias, cementos, entre otros, se hace necesario el empleo de diagramas ternarios. Su utilidad apunta más al conocimiento de las propiedades de estos materiales cerámicos a temperaturas elevadas, que a la deducción de una estructura micrográfica resultado de la solidificación. Muchos de estos materiales se obtienen por técnicas de sinterizado a temperaturas en que los constituyentes no llegan a alcanzar el estado líquido. Interesa, por ejemplo, conocer la temperatura a la que una mezcla sólida de composición determinada empezaría a fundir; o bien la cantidad de fundente CaO que es necesario adicionar a una ganga ácida de mineral para

lograr que funda la ganga dando una escoria de temperatura de solidificación lo más baja posible.

**Figura 1. Ubicación del cemento Portland y la escoria en el sistema ternario CaO - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**



Fuente. <http://www.construirnoa.com.ar/images/uploads/cah-cemento-alto-horno.pdf>

### Producción y costo de las escorias

La producción y costo de las escorias, es realmente bajo, ya que es un desecho industrial proveniente de la fundición del acero, inclusive se puede decir que no tiene costo. Esta producción proviene de estructuras, hojalatas, basura metálica, maquinaria industrial, desechos de guerra, la cual es seleccionada para evitar que agentes dañinos al acero puedan dañar la producción.

## **2.1.2 Proceso de fabricación del concreto**

La producción efectiva de concreto se logra seleccionando, controlando y proporcionando cuidadosamente todos los materiales. A fin de lograr concretos con buena resistencia, se debe seleccionar las proporciones óptimas, considerando las características del cemento, la calidad del agregado, la proporción de la pasta, la interacción agregado-pasta, el tipo de aditivo y la forma de dosificación y mezclado. Al evaluar el cemento, el aditivo químico y el agregado, procedente de varias fuentes potenciales en proporciones variables, se podrá indicar la combinación óptima de los materiales. Según el A.C.I. (American Concrete Institute), este proceso debe llevarse a cabo teniendo en cuenta las siguientes etapas:

- La caracterización de la materia prima.
- El diseño de la mezcla.
- Fraguado.
- Curado

**2.1.2.1 Caracterización de la materia prima:** En esta etapa se lleva a cabo un análisis granulométrico de los agregados tanto fino como grueso, con el fin de conocer sus diferentes características como: Modulo de finura, gravedad específica, peso específico, porcentaje de absorción, tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

Este proceso es necesario realizarlo, ya que, hace referencia a las diferentes fracciones de agregado grueso y fino (agregados totales) sabiendo que las propiedades de los diferentes tipos de concreto, estabilidad volumétrica y resistencia dependen de la granulometría; por esta razón es recomendable que los agregados ocupen la mayor masa del concreto haciéndolo más trabajable. [23].

**2.1.2.2 Diseño de mezcla:** Existe un método descrito por El ACI (American Concrete Institute) para hallar el diseño de mezcla. [27]. Este método consiste en una serie de tablas obtenidas de forma empírica, las cuales permiten determinar las cantidades necesarias de cada uno de los materiales presentes en la mezcla con el fin de obtener un concreto adecuado y para un uso específico. A continuación se presentan los pasos a seguir.

- Selección del asentamiento
- Selección de la relación agua/cemento
- Estimación del contenido de agua
- Estimación del contenido de cemento
- Estimación del contenido de agregado grueso
- Estimación del contenido de agregado fino

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

**2.1.2.3 Fraguado:** El término fraguado se usa para describir la velocidad de cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento, mortero o concreto (bajo ciertas y determinadas condiciones de temperatura y humedad), y es medido en función del tiempo, según la resistencia que ofrezca a la penetración. Por otra parte, el término endurecimiento, se refiere a la caracterización del aumento de resistencia a la compresión de una pasta de cemento fraguada.

El proceso de fraguado de la pasta de cemento comienza en el momento en que el cemento y el agua de una mezcla de concreto entran en contacto. En condiciones normales, el concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar y compactar dentro de la primera hora y media posterior al mezclado (a veces hasta dos horas). Sin embargo, se debe eliminar o minimizar cualquier

variable que induzca al concreto a fraguar anticipadamente, como suele suceder en climas cálidos y secos o cuando se usan aditivos acelerantes. Esta consideración es especialmente importante, para prevenir la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de retemplado. La determinación de los tiempos de fraguado del concreto es importante, para saber si es necesario utilizar aditivos que controlen la velocidad de fraguado (por ejemplo, acelerantes o cemento tipo III en clima frío; y, retardantes, cementos de bajo calor de hidratación, o hielo como agua de mezclado en clima cálido), con el fin de regular los tiempos de mezclado, transporte, colocación, acabado, fraguado, protección y curado, de manera que no se vean afectadas las características y propiedades de la mezcla. El tiempo de fraguado del concreto es un valor arbitrario de "resistencia a la penetración".

Se define como "tiempo de fraguado inicial" aquel momento en el cual el mortero extraído del concreto evaluado ofrece una resistencia a la penetración de 3,5 MPa (35 kg/cm<sup>2</sup>), después del contacto inicial del cemento con el agua. De igual forma, se define el "tiempo de fraguado final", como el momento en que el mismo mortero ofrece una resistencia a la penetración de 27,6 MPa (280 kg/cm<sup>2</sup>). En términos prácticos, el fraguado inicial indica la pérdida de viscosidad de una pasta plástica acompañada de una elevación de su temperatura. Aquí, el cemento se encuentra parcialmente hidratado y la pasta semidura, es decir que el gel de cemento ha comenzado a cristalizarse. Posteriormente, la pasta sigue fraguando hasta que deja de ser deformable bajo cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega al máximo de temperatura. En este punto, se presenta el fraguado final e indica que el cemento se encuentra aún más hidratado (aunque no totalmente) y la pasta ya está dura. A partir de este momento, comienza el proceso de endurecimiento y la estructura del cemento fraguado va adquiriendo resistencia mecánica. Es precisamente este momento, el que define la iniciación del curado con agua.

**2.1.2.4 Condiciones de curado y de secado del concreto:** Para obtener un concreto de buena calidad en cualquier estructura, las labores de acabado deben ser seguidas de unas prácticas convenientes de protección, en un medio ambiente propicio (natural o artificial), durante la etapa de fraguado (proceso de cambio de estado plástico a estado endurecido). De igual forma, deben darse las condiciones adecuadas para mantener el concreto a una temperatura y un contenido de humedad satisfactorios, a partir del fraguado final (iniciación del proceso de endurecimiento), y durante un tiempo definido, para promover la hidratación del cemento. Este procedimiento de controlar la temperatura y humedad, hacia adentro y hacia afuera del concreto, es lo que se conoce como el proceso de curado. Las labores de protección y curado tienen una gran influencia sobre las propiedades del concreto, tanto en estado plástico, como en estado endurecido, particularmente, en lo que se refiere a su fraguado, estabilidad volumétrica, permeabilidad, densidad, resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la abrasión. Durante el estado plástico, la contracción o expansión que experimenta el material está asociado con cambios de humedad y temperatura, y se caracterizan por fenómenos como el asentamiento plástico, la contracción plástica, y las grietas capilares.

La mayoría de los concretos en estado plástico contienen una cantidad de agua considerablemente mayor que la requerida para que tenga lugar su combinación química y la hidratación completa del cemento. Sin embargo, durante el fraguado se pierde agua por exudación y posterior evaporación o por absorción de los agregados, las formaletas y el suelo, que evitará la completa hidratación. Adicionalmente, la pérdida de agua también provoca que el concreto se contraiga, creando así esfuerzos de tensión interna que pueden conducir a un agrietamiento superficial. Por ello, todas las superficies expuestas deben protegerse de la evaporación de la humedad.

En términos generales, existen tres grandes grupos de métodos de curado para mantener la presencia del agua y en algunos casos la temperatura favorable en el concreto, que son:

- Métodos que mantienen un ambiente húmedo mediante la aplicación continúa o frecuente de agua por medio de inmersión, inundación, rociado, nebulización de agua o cubiertas húmedas saturadas. Estos métodos proporcionan un cierto grado de refrigeración a través de la evaporación, lo cual es benéfico en climas cálidos.
- Métodos que mantienen la presencia de parte del agua de mezclado en el concreto durante el período inicial de endurecimiento, mediante materiales que sellan la superficie expuesta, tales como láminas impermeables de papel o plástico, o con la aplicación de compuestos químicos para formar "membranas impermeables de curado".
- Métodos que aceleran la ganancia de resistencia suministrando calor y humedad adicional al concreto. Esto se logra normalmente con la aplicación de vapor de agua directo, serpentines de calentamiento embebidos en el concreto, o formaletas calentadas eléctricamente.

Desde luego, el método escogido o la combinación de ellos dependerá de factores tales como el tipo de mezcla y sus ingredientes, el volumen y la forma del elemento, las instalaciones de producción (en obra o en planta), la disponibilidad de elementos y materiales para la protección y el curado, la apariencia estética, y los costos del procedimiento. Por otra parte, cuando se emplea agua como elemento de curado, ésta debe cumplir con los mismos requisitos del agua de mezclado (libre de sustancias perjudiciales). Además, cuando la apariencia sea importante, el agua debe estar libre de sustancias que manchen o decoloren el concreto.

## **2.2 ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO**

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar las propiedades y calidad de los concretos. Entre las pruebas no destructivas se encuentran la inspección visual, la velocidad de pulso ultrasónico, entre otras. Con estas pruebas es posible determinar los defectos superficiales de los materiales además de otras características.

### **2.2.1 Velocidad de pulso ultrasónico.**

El método del ultrasonido en la ingeniería es utilizado para el ensayo de los materiales. Es una técnica de ensayo no destructivo (END) y tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras.

Al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza y que dependen de las discontinuidades del material examinado, lo que permite evaluar aquella discontinuidad acerca de su forma, tamaño, orientación, debido que la discontinuidad opone resistencia (conocida como impedancia acústica) al paso de una onda. Las ondas pueden ser sónicas comprendidas en el intervalo de frecuencias entre 20 y 500 kHz y las ultrasónicas con frecuencias superiores a 500 kHz [25]. En el método ultrasónico se utilizan instrumentos que transmiten ondas con ciertos intervalos de frecuencia y se aplican para detectar defectos como poros, fisuras, también para conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos como la composición, estructura.

El análisis de los materiales mediante ultrasonido se basa en el principio físico del movimiento de una onda acústica, sabiendo que la onda acústica es afectada por el medio a través del cual viaja y se distinguen los siguientes tipos: onda

longitudinal, transversal y superficial (Rayleigh), debido a ello ocurren los cambios asociados con el paso de una onda sonora de alta frecuencia a través de un material en uno o más de los cuatro parámetros siguientes: tiempo de vuelo, atenuación, reflexión y frecuencia. Estos parámetros a menudo pueden estar correlacionados con los cambios de las propiedades físicas, dureza, módulo de elasticidad, densidad, homogeneidad, estructura y grano del material [26].

La velocidad de pulso  $V$  se calcula dividiendo la longitud que recorre la onda sobre el tiempo que gasta en recorrerla, según lo muestra la ecuación número 3 [25].

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

### Ecuación 3

Donde:

$V$  = Velocidad (m/s)

$L$  = Longitud promedio de la probeta (m)

$t$  = Tiempo de vuelo de la onda (seg)

La técnica cubre la determinación de la velocidad de propagación de los pulsos de una onda longitudinal a través del material, las ondas longitudinales normalmente usadas tienen frecuencias entre 20 a 150 KHz, las cuales son bajas comparándolas con las de un acero, por la heterogeneidad del concreto, según lo establecido en la norma ASTM C597-09 [1].

La velocidad de pulso ultrasónico se ve afectada por los siguientes factores:

- **Relación Agua/Cemento (A/C):** Puesto que es la relación A/C quien determina parte de las características del concreto, su efecto sobre la técnica de VPU es

inversamente proporcional, ya que a medida que disminuye la relación, los valores de velocidad de pulso aumentan, debido a que la cantidad de agua presente en la mezcla es menor, lo que disminuye el porcentaje de porosidad en la material [16], evitando la dispersión de las ondas ultrasónicas y por tanto, tomando menos tiempo en el recorrido de la trayectoria.

- **Contenido de agua:** El valor de la velocidad de pulso puede aumentar o disminuir significativamente según su contenido de agua, es decir incrementa en condiciones de saturación, sin embargo las variaciones en la resistencia a compresión no es significativa.
- **Cantidad y tipo de agregados:** Se ha demostrado que tanto la cantidad como el tamaño de agregado afectan considerablemente las reacciones de hidratación y la trayectoria de la onda, generando variaciones en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico para concretos con una misma relación A/C [40].
- **Edad del concreto:** A medida que transcurre el tiempo sigue la hidratación del cemento, disminuyendo la porosidad y propagándose las ondas más rápido en el medio sólido; es decir el efecto de la edad del concreto en la velocidad de pulso ultrasónico es similar a los efectos sobre la resistencia del concreto [20].

En la tabla 5 se clasifica la calidad del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico, de acuerdo a lo establecido por Leslie y Cheesman.

**Tabla 5. Clasificación de la calidad del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico según Leslie y Cheesman.**

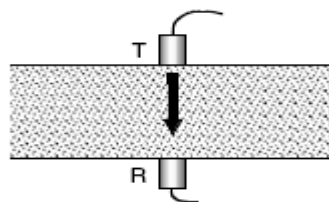
VELOCIDAD (m/seg)	CALIDAD DEL CONCRETO
Más de 4.500	Excelente
3.500 – 4.500	Buena
3.000 – 3.500	Regular
2.000 – 3.000	Mala
Menos de 2.000	Muy Mala

**Fuente.** Concretos y Morteros (Manejo y Colocación en Obra) [38].

El ensayo de la velocidad de pulso ultrasónico puede realizarse de tres maneras diferentes:

- **Método de transmisión directa:** Los terminales del emisor y el receptor son colocados y enfrentados en superficies opuestas del concreto. Este método presenta grandes ventajas pues produce una mayor sensibilidad y una ruta de viaje más definida por esto es empleada en vigas y columnas. (Ver figura 2).

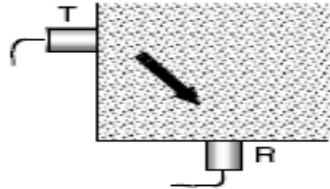
**Figura 2. Método de transmisión directa**



**Fuente.** HANDBOOK NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. *The Ultrasonic Pulse Velocity Method.* Chapter 8.

- **Método de transmisión semi-directa:** Se puede utilizar de manera satisfactoria, pero requiere de cuidado en que los transductores no están muy alejados, de lo contrario la transmisión de pulsos puede disminuir y las señales del pulso pueden no ser detectadas. (Ver figura 3).

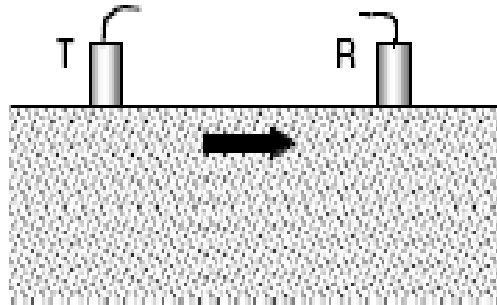
**Figura 3. Método de transmisión semi-directa**



**Fuente.** HANDBOOK NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. *The Ultrasonic Pulse Velocity Method.* Chapter 8.

- **Método de transmisión indirecta:** Es menos satisfactorio, porque la amplitud de la señal recibida es significativamente inferior a la recibida por el método de transmisión directa. Con este método hay más probabilidades de que se presenten errores en la medición. (Ver figura 4).

**Figura 4. Método de transmisión indirecta**



**Fuente.** HANDBOOK NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. *The Ultrasonic Pulse Velocity Method.* Chapter 8.

## **2.3 ENSAYO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO**

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

### **2.3.1 Resistencia a la compresión**

La más común de todas las pruebas sobre el concreto endurecido es la prueba de resistencia a la compresión, en parte porque muchas de las características deseables del concreto están relacionadas cualitativamente con su resistencia, pero fundamentalmente por la importancia intrínseca de la resistencia a la compresión del concreto en el diseño estructural.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste. La máquina de ensayo debe ser de un tipo tal que tenga suficiente capacidad de carga y debe operar mecánicamente y aplicar la carga de una manera continua y no en forma intermitente, y sin choques.

En la tabla 6 se clasifica al concreto de acuerdo a su resistencia a la compresión.

**Tabla 6. Clasificación del concreto según resistencia a la compresión**

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

Fuente. Concretos y Morteros [38].

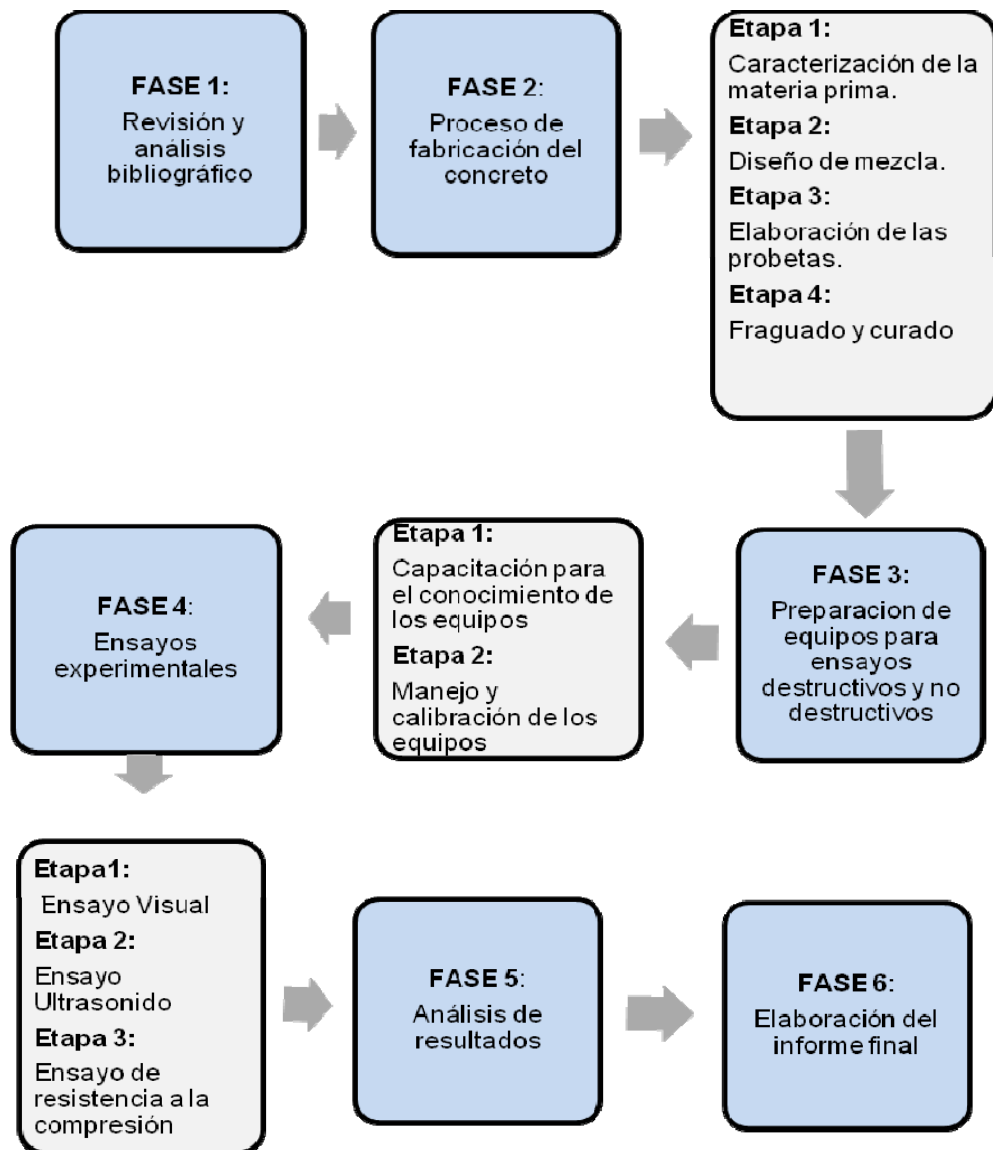
Al igual que la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión también se ve influenciada por ciertos factores como lo son:

- **Relación A/C:** La relación A/C es el factor más importante en la resistencia a la compresión de un concreto. Sin embargo las medidas de esta propiedad pueden variar según sean el tamaño de agregado y el cemento utilizado para una misma relación A/C. Entonces es necesario considerar estos dos factores antes de analizar cuál es el efecto real [38].
- **Cemento:** El efecto del cemento sobre la resistencia a la compresión depende de cuales sean sus características físicas así como de la cantidad requerida dentro de la mezcla, esto se debe a que el cemento es el elemento más activo en la mezcla afectando de sobremanera esta propiedad. Por lo tanto, un aumento en el contenido de cemento produce un aumento en la resistencia, pero este contenido no debe exceder de 470Kg/m<sup>3</sup> ya que produce un efecto opuesto sobre esta propiedad mecánica [38].

### 3. METODOLOGÍA

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

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



Fuente. Los Autores

### **3.1 FASE 1: Revisión y análisis bibliográfico**

Durante esta fase se procedió a revisar el material bibliográfico disponible sobre la resistencia a la compresión de concretos, concretos con adiciones de escoria, así como también se estudió más a fondo la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico con el fin de afianzar conocimientos adquiridos con anterioridad y lograr un mejor desempeño a lo largo del desarrollo del proyecto.

En esta etapa también se realizó una recopilación de artículos internacionales, trabajos de grado, trabajos de grupos de investigación relacionados con el tema, material bibliográfico relacionado con los procesos de curado, propiedades del concreto, métodos de evaluación de la resistencia a la compresión del concreto, y un estudio detallado de los ensayos no destructivos realizados a este tipo de material.

### **3.2 FASE 2: Proceso de fabricación del concreto**

En esta fase se llevó a cabo el diseño y elaboración de las probetas de concreto a utilizar en cada uno de los ensayos destructivos y no destructivos, teniendo en cuenta principalmente la caracterización de la materia prima, diseño de la mezcla, elaboración de probetas, fraguado y curado de las mismas.


#### **3.2.1 Etapa 1. Caracterización de la materia prima**

Los materiales utilizados en la mezcla fueron los siguientes:

- **Cemento:** Para la realización de las probetas, se eligió el cemento portland tipo I el cual cumple las especificaciones mecánicas, físicas y químicas indicadas por las Normas NTC 121[30] y NTC 321 [34].

- **Agua de la mezcla:** El agua fue suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y los resultados de los análisis de la calidad del agua son facilitados por la misma entidad y son presentados a continuación en la tabla 7.

**Tabla 7. Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua utilizada para la realización de las probetas.**

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:		2011													
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	I IRCA MENSUAL
Enero	90	0,95	0,80	4,1	7,19	0	0,05	46,1	65,5	3,4	26,7	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,95	0,70	3,5	7,27	0	0,05	51,7	69,5	3,8	26,8	N.D	1,2	N.D	168	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,00	5,9	7,15	0	0,06	44,9	69,1	4,0	27,6	N.D	1,1	N.D	186	0	100	0	100	0,00
PROMEDIO	89	0,95	0,83	4,5	7,20	0	0,05	47,6	68,0	3,7	27,0	N.D	1,2	N.D	178	0,0	100	0,0	100	0,00
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	8/día	0	100	0	100	0 - 5
Convenciones:	mg/L: miligramos por litro Detectable UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Indice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No																			
Nota:	El IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																			

Elaboró: Leonor Chacón

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ  
Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga [8]

- **Agregado fino y agregado grueso:** El agregado grueso utilizado fue de granulometría fue 3/4" (19,05mm). Las características de éstos están de acuerdo a las siguientes normas: NTC176 [31] y NTC 237 [33] para propiedades de los agregados. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo siguiente.
- **Aditivos:** Para la realización de esta investigación se utilizó como aditivo escoria proveniente de un proceso de fabricación de acero, y fue donada por la empresa ACERIAS PAZ DEL RIO S.A. Esta escoria fue analizada por medio de

un examen de Fluorescencia de Rayos X con el fin de conocer su composición química. Los análisis correspondientes de la escoria, se especificarán en el capítulo 4.

### **3.2.2 Etapa 2. Diseño de mezcla**

Siguiendo el método descrito por el A.C.I. (American Concrete Institute) se realizaron dos diseños de mezclas con relaciones agua/cemento (A/C) 0.35 y 0.45. Adicionalmente se utilizó escoria, la cual reemplazaría en cierto porcentaje al cemento portland. Para dar mejor trabajabilidad a las mezclas, se usó un superplastificante disponible en el comercio. En el próximo capítulo se presentarán los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto.

### **3.2.3 Etapa 3. Elaboración de probetas**

Se elaboraron 45 probetas por cada relación de A/C (0.35 y 0.45) es decir, un total de 90 probetas de concreto, con el fin de efectuar los ensayos de inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión. Las pruebas se realizaron durante los días 3, 7, 14, 21 y 28 de curado. En la tabla 8 se presenta la programación general de los ensayos a realizar a las probetas.

Como se indica en la tabla 8 para cada día de pruebas se realizaron tres probetas por cada porcentaje de adición de escoria (0%, 20% y 40%), es decir nueve probetas por cada relación A/C, para un total de 18 probetas por día de ensayo.

Para la fabricación de las probetas se utilizaron moldes de plástico con dimensiones de 10cm de diámetro por 20cm de largo. Cabe resaltar que los moldes fueron limpiados y posteriormente humedecidos con ACPM para evitar que la mezcla fresca se adhiriera al molde y lograr así desencofrar más fácilmente.

Para continuar con la elaboración de las probetas, se procedió a pesar cada uno de los componentes de la mezcla, teniendo en cuenta las cantidades calculadas durante su diseño. Entre estos componentes es necesario mencionar la escoria, la cual reemplazaba al cemento en porcentajes diferentes (20% y 40%) en peso para cada relación A/C. La escoria fue molida hasta obtener una finura semejante a la del cemento, ello permite, que al entrar en contacto con el cemento portland se active su capacidad cementante en presencia de agua.

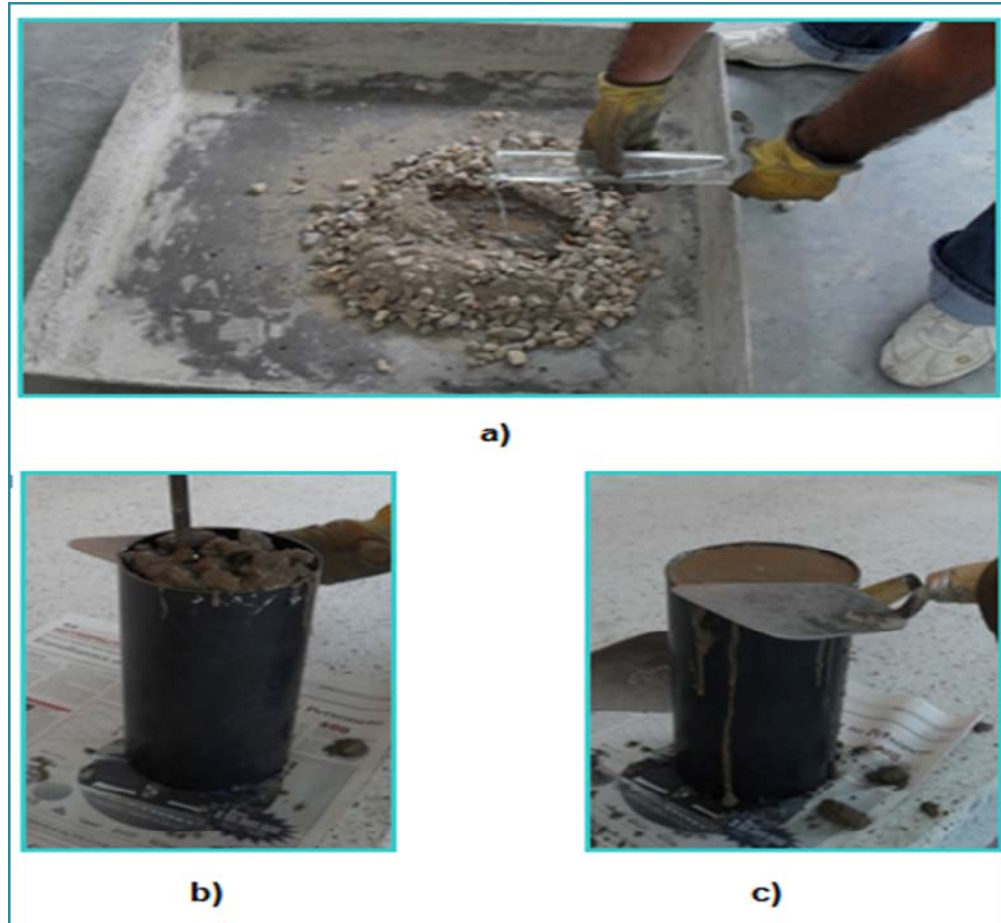
La mezcla completa finalmente homogeneizada fue colocada con una cuchara por capas en los moldes cilíndricos y se compactó de forma manual cada capa, aplicando 25 golpes en diferentes lugares de la superficie con una varilla metálica. Después de llenar cada capa, se aplicaron una serie de golpes con un martillo de caucho tanto en la parte inferior como superior del cilindro a fin de eliminar el aire atrapado. [ICONTEC 550 Y 673] [22]. En la figura 6 se presentan imágenes del proceso de fabricación del concreto.

**Tabla 8. Programación general de ensayos**

% DE ESCORIA	RELACIÓN AGUA/CEMENTO	DÍAS DE CURADO	# DE PROBETAS POR DÍA
0	0,35	3	3
		7	3
		14	3
		21	3
		28	3
	0,45	3	3
		7	3
		14	3
		21	3
		28	3
20	0,35	3	3
		7	3
		14	3
		21	3
		28	3
	0,45	3	3
		7	3
		14	3
		21	3
		28	3
40	0,35	3	3
		7	3
		14	3
		21	3
		28	3
	0,45	3	3
		7	3
		14	3
		21	3
		28	3
<b># TOTAL DE PROBETAS ENSAYADAS</b>			<b>90</b>

Fuente. Los autores

**Figura 6. Proceso de elaboración de las probetas. a) Homogeneización de materiales; b) Llenado y compactación de los moldes; c) Acabado final.**



**Fuente.** Los Autores

#### **3.2.4 Etapa 4. Fraguado y curado**

Una vez llenos los moldes, las probetas se dejaron en fraguado durante 72 horas, tiempo durante el cual se buscaba una hidratación inicial. Las probetas se dejaron en curado en condiciones ambientales bajo techo.

### **3.3 FASE 3: Preparación de equipos para ensayos destructivos y no destructivos**

Para esta fase fue necesario llevar a cabo dos etapas, para cumplir con los objetivos propuestos en la investigación. Dichas etapas son mencionadas a continuación.

#### **3.3.1 Etapa1. Capacitación para el conocimiento de los equipos.**

Con el fin de afianzar las habilidades para el manejo de los equipos, se hizo una inducción con los técnicos encargados en los laboratorios de Ingeniería Civil en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Adicionalmente se experimentó con el equipo de ultrasonido de baja frecuencia existente en el laboratorio de ensayos no destructivos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

#### **3.3.2 Etapa2. Manejo y calibración de los equipos.**

En esta etapa se llevó a cabo el manejo y calibración del equipo de ultrasonido marca CNS FARNELL LTDA. así como la máquina para ensayo a la compresión marca TREBEL. A continuación se presentan las características básicas de estos equipos.

- **Equipo de ultrasonido:** Para medir la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se empleó el equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA, utilizando transductores de 54KHz de frecuencia. El cuál mide el tiempo de propagación de la onda a través de la pieza con relación a la distancia entre los transductores. En la figura 7 se presenta una imagen del equipo.

**Figura 7. Equipo de ultrasonido**



**Fuente.** Los Autores

En la tabla 9 se mencionan los diferentes parámetros de trabajo establecidos en el proyecto para el equipo de ultrasonido.

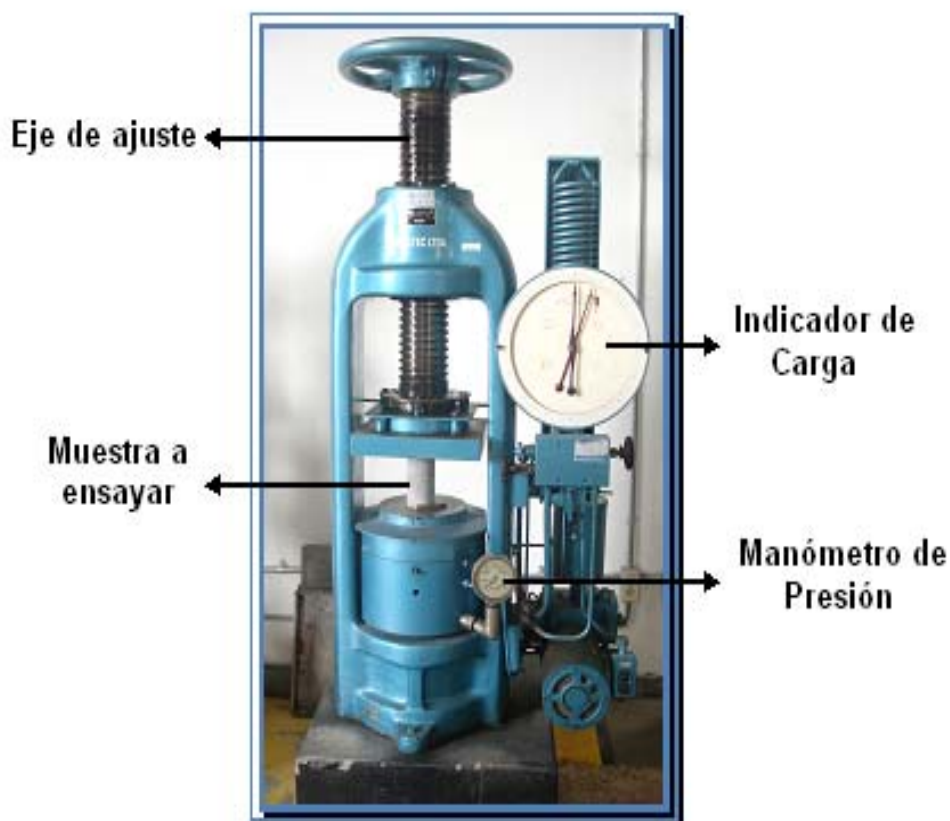
**Tabla 9. Parámetros de trabajo del equipo CNS FARNELL LTDA PUNDIT PLUS.**

PARAMETROS DEL EQUIPO	
Voltaje	500V
Unidades	Métricas
Modo de pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	Apagado
Pulso de referencia	10 seg
VELOCIDAD	
Distancia entre Transductores	0,21m
Límite Superior	9999
Límite Inferior	1

Fuente. Los Autores

- Máquina universal marca TREBEL para ensayo de compresión:** El equipo empleado pertenece a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, el cual se encuentra ubicado en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón. La máquina universal de ensayos está diseñada para pruebas de tensión, compresión, pandeo, flexión y doblado. Las medidas son tomadas hidráulicamente por un motor. Además cuenta con un manómetro de presión, el cual está equipado con un dispositivo de contacto que se puede ajustar para mantener la carga constante, así como para frenar los cambios de carga. Así mismo soporta cargas hasta 40.000 Kgf. En la figura 8 se muestra el equipo utilizado para el ensayo de compresión en las probetas de concreto.

**Figura 8. Maquina universal TREBEL para ensayo de compresión.**



Fuente. Los Autores

### **3.4 FASE 4: Ensayos experimentales.**

Los ensayos se realizaron en los días 3, 7, 14, 21 y 28 de curado. Como se indicó previamente, se usaron 3 probetas por día para cada porcentaje de adición de escoria con cada una de las relaciones A/C, dando un total de 18 probetas por día de ensayo.

#### **3.4.1 Etapa 1. Inspección visual.**

Durante este ensayo se observó cuidadosamente cada una de las probetas con el fin de conocer cuál era su estado superficial y detectar posibles defectos como:

mal acabado superficial y discontinuidades abiertas a la superficie y así poder determinar si la probeta era apta o no para aplicar los ensayos de ultrasonido y resistencia a la compresión.

### 3.4.2 Etapa 2. Ensayo de ultrasonido.

Para proceder a realizar las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico, se prepararon las caras de las probetas, lijándolas de tal manera que sus superficies quedaran lisas y planas para un mejor acople y así garantizar la toma de los datos. Luego se tomaron tres mediciones del diámetro y de la longitud de cada una de las probetas a ensayar, por medio de un pie de rey digital, con el fin de tener mayor precisión en sus dimensiones. A continuación en la figura 9 se muestra el instrumento utilizado para medir las dimensiones de las probetas.

**Figura 9. Pie de rey digital de 0.02mm de sensibilidad**



**Fuente.** Los Autores

A continuación se conectaron los transductores a los puertos correspondientes en el equipo ya cargado. Se ajustaron los parámetros bajo los cuales iba a trabajar el equipo. (Ver tabla 9).

Se calibró el equipo según las recomendaciones del fabricante, se utilizó como acoplante vaselina y se empleó como método de transmisión el método directo. Con las condiciones indicadas se hicieron las mediciones en cada una de las probetas. Dichas mediciones se realizaron en tres puntos diferentes en cada probeta, repitiendo la medición dos veces por punto. Para obtener valores de velocidad de pulso ultrasónico más confiables se promediaron los valores obtenidos anteriormente. Los resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos, se presentan en el capítulo 4.

### **3.4.3 Etapa 3. Ensayo de resistencia a la compresión**

Este ensayo destructivo mide el comportamiento del concreto bajo cargas de compresión, estimando su máxima carga axial soportada. Esta prueba fue realizada a todas las probetas una vez terminada la prueba de ultrasonido.

La máquina universal de ensayos TREBEL fue la utilizada para realizar esta prueba, y se procedió a realizarla conforme a la norma NTC 673 [32].

Las probetas se situaban en el centro del disco base del equipo, seguidamente se daba vuelta al cabezal de la máquina hasta que quedaran en contacto las caras de las probetas con ella para aplicar la fuerza eléctricamente; inspeccionando que las agujas de la máquina estuvieran en cero.

Ensayadas las muestras se obtuvo los respectivos valores de máxima carga axial para cada probeta, este resultado de carga aplicada se divide entre el área de contacto, obteniéndose así la resistencia máxima soportada por cada cilindro. En la figura 10 se muestra la disposición de las probetas para este ensayo.

**Figura 10. Disposición de la probeta para la prueba de compresión**



**Fuente.** Los Autores

### **3.5 FASES 5 y 6: Análisis de resultados y elaboración del informe final.**

Estas dos fases se llevaron a cabo simultáneamente a medida que se desarrolló el proyecto de investigación.

## **4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se muestran los diferentes resultados obtenidos en las fases del proceso de fabricación del concreto y ensayos experimentales, así como su respectivo análisis. Adicionalmente se muestran las correlaciones obtenidas entre resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y tiempo de curado y velocidad de pulso ultrasónico y tiempo de curado.

### **4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO**

Para esta fase se tuvo en cuenta: la caracterización de la materia prima, diseño de la mezcla, elaboración de probetas, fraguado y curado de las mismas.

#### **4.1.1 Caracterización de la materia prima**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las etapas de caracterización de materia prima y diseño de mezcla.

En las tablas 10 y 11 se muestran las diferentes propiedades y características obtenidas para el agregado fino y el agregado grueso utilizados para la elaboración de las probetas ensayadas en esta investigación.

**Tabla 10. Propiedades de los agregados**

	<b>AGREGADO FINO</b>	<b>AGREGADO GRUESO</b>
<b>Peso Unitario Suelto (g)</b>	1373,02	1466,66
<b>Peso Unitario Compacto (g)</b>	1582,8	1589,88
<b>Absorción (%)</b>	2,249	1,419
<b>Porcentaje de Vacios (%)</b>	40,16	39,4

Fuente. Los Autores

**Tabla 11. Gravedades específicas**

	<b>AGREGADO FINO</b>	<b>AGREGADO GRUESO</b>
<b>Real</b>	2,747	2,672
<b>Aparente</b>	2,587	2,574
<b>Aparente SSS</b>	2,645	2,611

Fuente. Los Autores

#### **4.1.1.1. Análisis granulométrico**

A continuación se presentan el análisis granulométrico tanto para el agregado fino como para el agregado grueso utilizado.

- **Agregado fino**

En la tabla 12 se detallan los análisis granulométricos del agregado fino.

**Tabla 12. Análisis granulométrico del agregado fino**

TAMIZ	PESO RETENIDO (G)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4	52,8	5,28	5,28	94,72
8	48,1	4,81	10,01	89,91
16	154,3	10,43	20,52	79,48
30	228,4	22,84	43,36	56,64
50	238,9	23,89	67,25	32,75
100	260,6	26,06	93,31	6,69
Fondo	63	6,3	99,61	0,39
Total	1000	99,61	Peso Muestra	1000 g

Fuente. Los Autores

**Modulo de Finura (MF)** =  $\sum \% \text{Retenido Acumulado (Tamiz 4 al 100)} / 100$

$$MF = 239,73 / 100 = 2,3973$$

El MF cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33, indicando que debe ser mayor de 2.3 y menor de 3.1.

- **Agregado grueso**

En la tabla 13 se detallan los análisis granulométricos del agregado grueso.

**Tabla 13. Análisis granulométrico del agregado grueso**

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3/4	-	-	-	-
1/2	694.8	9.926	9.926	90.074
3/8	4375	62.5	72.42	27.58
4	1930.2	27.57	99.99	0.01
Fondo	-	100		
Total	7000			

**Fuente.** Los Autores

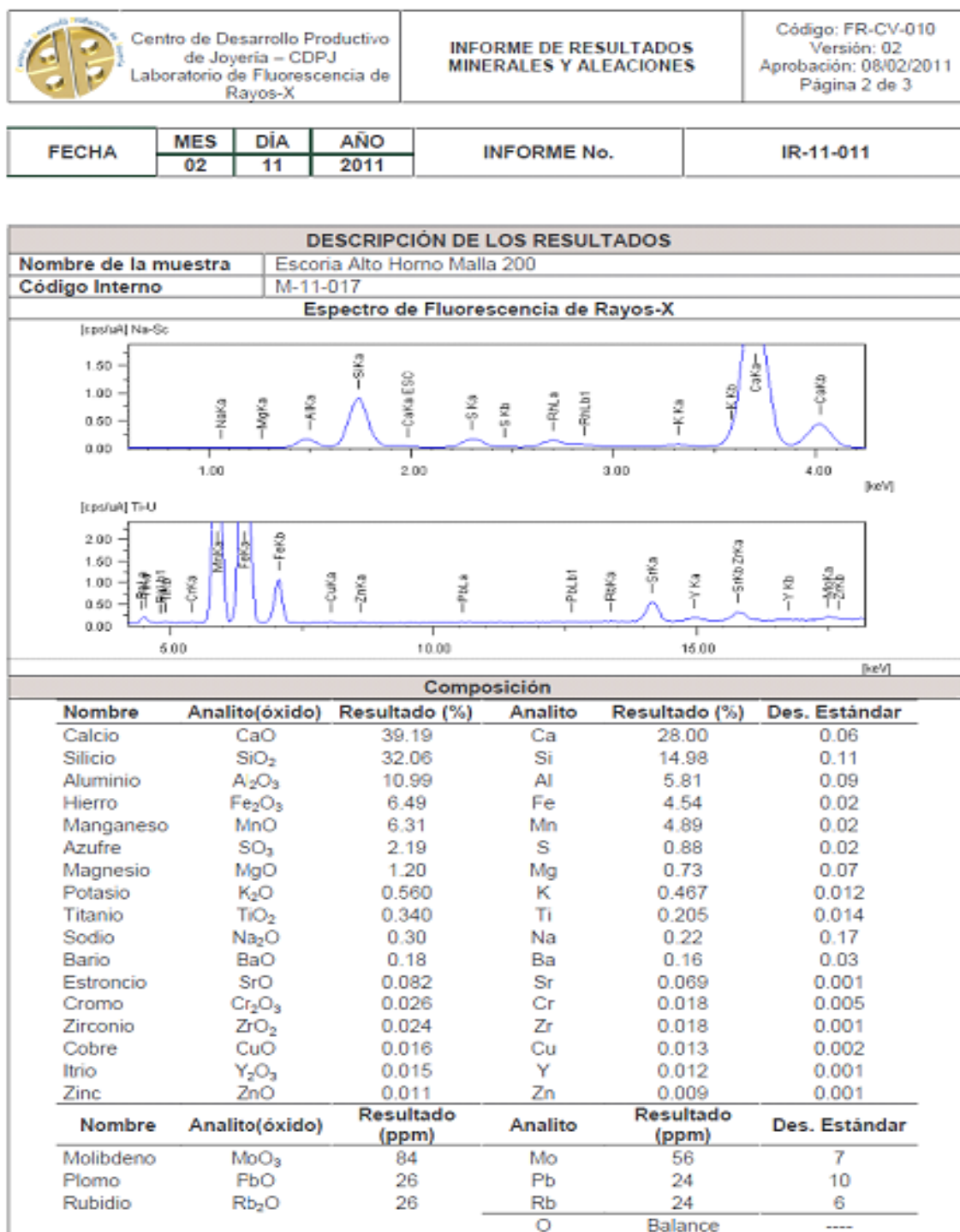
Para este agregado se obtuvo un tamaño máximo de 3/4" (19,05mm) y un tamaño máximo nominal de 1/2" (12.7mm).

#### **4.1.1.2. Análisis de la escoria**

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X realizado a la escoria empleada en esta investigación. Dicho análisis fue realizado en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Centro de Desarrollo Productivo de Joyería – CDPJ en la ciudad de Bucaramanga.

En la figura 11 se puede observar que el CaO (39,19%), el SiO<sub>2</sub> (32,06%) y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10,99%) alcanzan más del 80% de la composición química de la escoria utilizada y por consiguiente, son estos los más determinantes a la hora de establecer el índice de basicidad de la escoria y su capacidad cementante.

Figura 11. Composición química de la escoria



Fuente. Centro de Desarrollo Productivo de Joyería - CDPJ

Las características y composiciones químicas de la escoria siderúrgica utilizada durante la investigación, están de acuerdo a lo establecido por la norma NTC 4018 [34], por lo cual, se procedió a utilizar esta escoria siderúrgica como aditivo mineral en el concreto.

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de Fluorescencia de Rayos X, se determinaron el índice de basicidad de la escoria y su capacidad cementante.

De acuerdo a la ecuación 1 [19] establecida en el capítulo 2, se tiene que el índice de basicidad de la escoria empleada es:

$$P = \frac{39.19\%}{32.06\%} = 1.22$$

Si:  $0.4 \leq P \leq 1.0$  La escoria es ácida.

Si:  $1.0 \leq P \leq 1.6$  La escoria es básica.

Por consiguiente, la escoria empleada para esta investigación, es de carácter básico.

Se tiene también que de acuerdo a la ecuación 2 [19] indicada en el capítulo 2, la capacidad cementante de la escoria es:

$$F = \frac{39.19\% + 0.6\% + 10.99\%}{32.06\% + 6.31\%} = 1.323$$

Si:  $F \leq 1.5$  La escoria no es apta como material cementante.

Si:  $1.5 < F < 1.9$  La escoria es aceptable como material cementante.

Si:  $F > 1.9$  La escoria es excelente como material cementante.

Con el valor obtenido y de acuerdo a los valores establecidos de  $F$ , se tiene que la escoria utilizada para este estudio, no es apta como material cementante.

#### 4.1.2. Diseño de mezcla

En las tablas 14 y 15 se presentan las dosificaciones empleadas de cada uno de los materiales en la fabricación de las probetas para las relaciones  $A/C$  0,35 y 0,45 respectivamente. Se tomó como base de cálculo  $1\text{m}^3$  de concreto.

- Relación  $A/C = 0,35$

Tabla 14. Dosificación para una relación  $A/C = 0,35$

MATERIALES	ESCORIA (%)		
	0	20	40
Agua (Kg/m <sup>3</sup> )	200	200	200
Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	571,43	457,144	342,858
Escoria (Kg/m <sup>3</sup> )	0	114,286	228,572
Agregado Grueso (Kg/m <sup>3</sup> )	1049,32	1049,32	1049,32
Agregado Fino (Kg/m <sup>3</sup> )	554,21	554,21	554,21
Superplastificante (%)	0,5	0,5	0,5

Fuente. Los Autores

- Relación A/C = 0,45

**Tabla 15. Dosificación para una relación A/C = 0,45**

MATERIALES	ESCORIA (%)		
	0	20	40
Agua (Kg/m <sup>3</sup> )	257,14	257,14	257,14
Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	571,43	457,144	342,858
Escoria (Kg/m <sup>3</sup> )	0	114,286	228,572
Agregado Grueso (Kg/m <sup>3</sup> )	1049,32	1049,32	1049,32
Agregado fino (Kg/m <sup>3</sup> )	554,21	554,21	554,21
Superplastificante (%)	0,5	0,5	0,5

Fuente. Los Autores

## 4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

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

### 4.2.1 Inspección visual

Los resultados mostrados a continuación corresponden a los cálculos dimensionales realizados a las probetas, así como el estado superficial de las mismas.

- **Cálculos dimensionales**

A cada una de las probetas elaboradas se les midió el diámetro y la longitud por medio de un pie de rey digital de 0.02 mm de sensibilidad (ver figura 10), después

de extraerlas del molde, esto con el fin de determinar el área de aplicación de carga, necesario para los cálculos en la prueba de resistencia a la compresión. Los valores promedios de los diámetros y longitudes de las probetas, necesarias para el cálculo de la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión de las relaciones A/C 0,35 y 0,45 se presentan en los anexos G y H respectivamente.

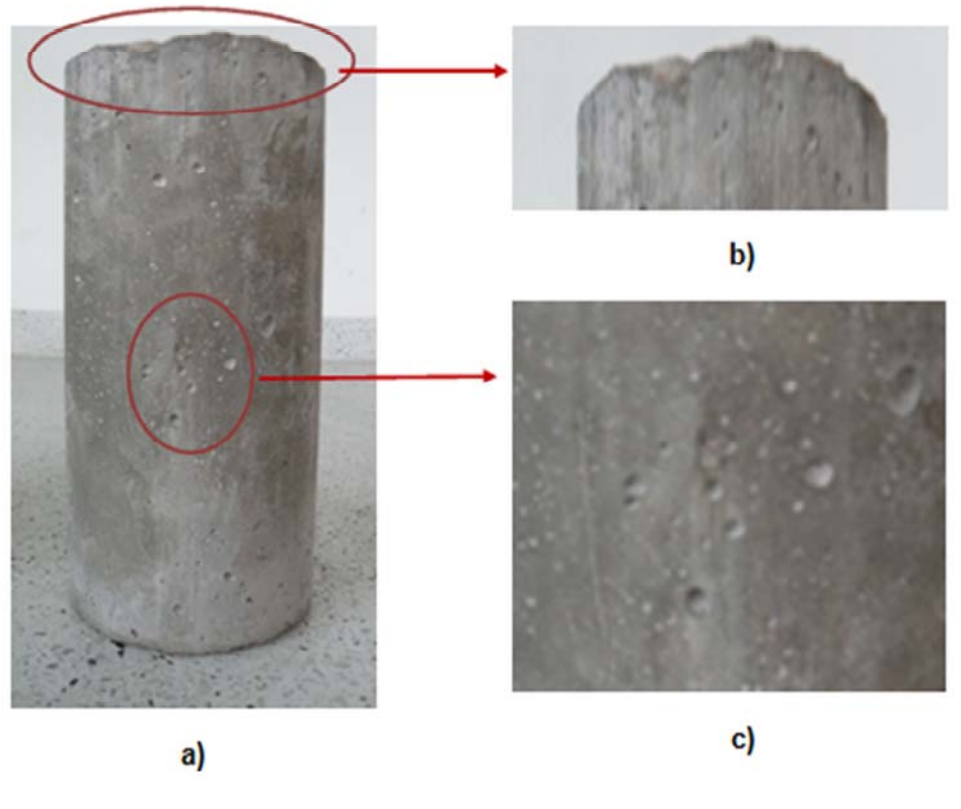
- **Estado superficial de las probetas**

Antes de realizar los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, fue necesario determinar si las probetas realizadas, una vez extraídas del molde, se encontraban aptas o no para los respectivos ensayos, debido a que por diferentes factores como: el medio ambiente, el aire atrapado durante el proceso de fraguado, el método de extracción de la probeta y el acabado superficial de la misma, las probetas de concreto podrían no estar en condiciones óptimas para llevar a cabo los ensayos.

Al observar una a una las probetas se encontró que la mayoría presentaban un estado superficial aceptable en lo que respecta al cuerpo, aunque debido al aire atrapado, algunas presentaban bastante porosidad (Ver figura 12).

También se observó que en las caras paralelas había superficies rugosas y poco uniformes, lo cual dificultaba el ensayo de la velocidad de pulso ultrasónico, por lo que fue necesario pulir todas las probetas hasta obtener una superficie lisa y así asegurar mediciones más confiables en la velocidad de pulso ultrasónico.

**Figura 12. Estado superficial de las Probetas a ensayar. a) Estado general de la probeta. b) Superficie no uniforme. c) Porosidad**



**Fuente.** Los Autores

#### **4.2.2. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico**

Las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico se realizaron a tres probetas por cada porcentaje de adición de escoria (0%, 20% y 40%) para cada relación A/C (0,35 y 0,45) para cada día de ensayo (días 3, 7, 14, 21 y 28 de curado), dando así un total de 9 probetas por relación A/C y 18 probetas por día de ensayo.

A continuación en las tablas 16 y 17 se puede comprobar que entre mayor sea el porcentaje de adición de escoria en la mezcla, más bajos son los valores de velocidad de pulso ultrasónico.

A partir de las tablas 16 y 17 se puede decir que para ambas relaciones A/C se aprecia que para cada porcentaje de escoria hay un aumento de la velocidad de pulso ultrasónico, a medida que aumenta el tiempo de curado, lo cual se encuentra de acuerdo a lo expresado por algunos investigadores. [41], [42]. De igual manera se muestra un descenso en el valor de la velocidad a medida que aumenta el porcentaje de escoria adicionada al concreto.

Se puede observar de los resultados obtenidos, que los valores de velocidad de pulso ultrasónico de la relación A/C=0,35 son mayores que los de la relación A/C=0,45, esto debido a que la mezcla de A/C=0,35 es más densa (tiene menor porosidad), por lo que el tiempo de vuelo de la onda a través de ésta, es menor que el de la mezcla de A/C=0,45.

Como la relación A/C=0,45 tiene mayor contenido de agua, es más susceptible a la porosidad y dicha porosidad se produce cuando no se han completado las reacciones de hidratación del concreto, dejando así espacios vacíos (poros) los cuales obstaculizan el paso del haz sonoro debido a las diferencias en las impedancias acústicas entre los poros llenos de aire y la pasta de cemento endurecida. [23].

**Tabla 16. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico A/C=0,35**

<b>% DE ESCORIA</b>	<b>DÍAS DE CURADO</b>	<b>VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)</b>
<b>0</b>	3	3427,87
	7	3652,67
	14	3784,33
	21	3874,23
	28	3995,45
<b>20</b>	3	3209,57
	7	3296,57
	14	3411,89
	21	3529,37
	28	3652,39
<b>40</b>	3	3029,8
	7	3123,56
	14	3304,38
	21	3358,14
	28	3522,66

**Fuente.** Los Autores

**Tabla 17. Resultados promedio de la velocidad de pulso ultrasónico A/C=0,45**

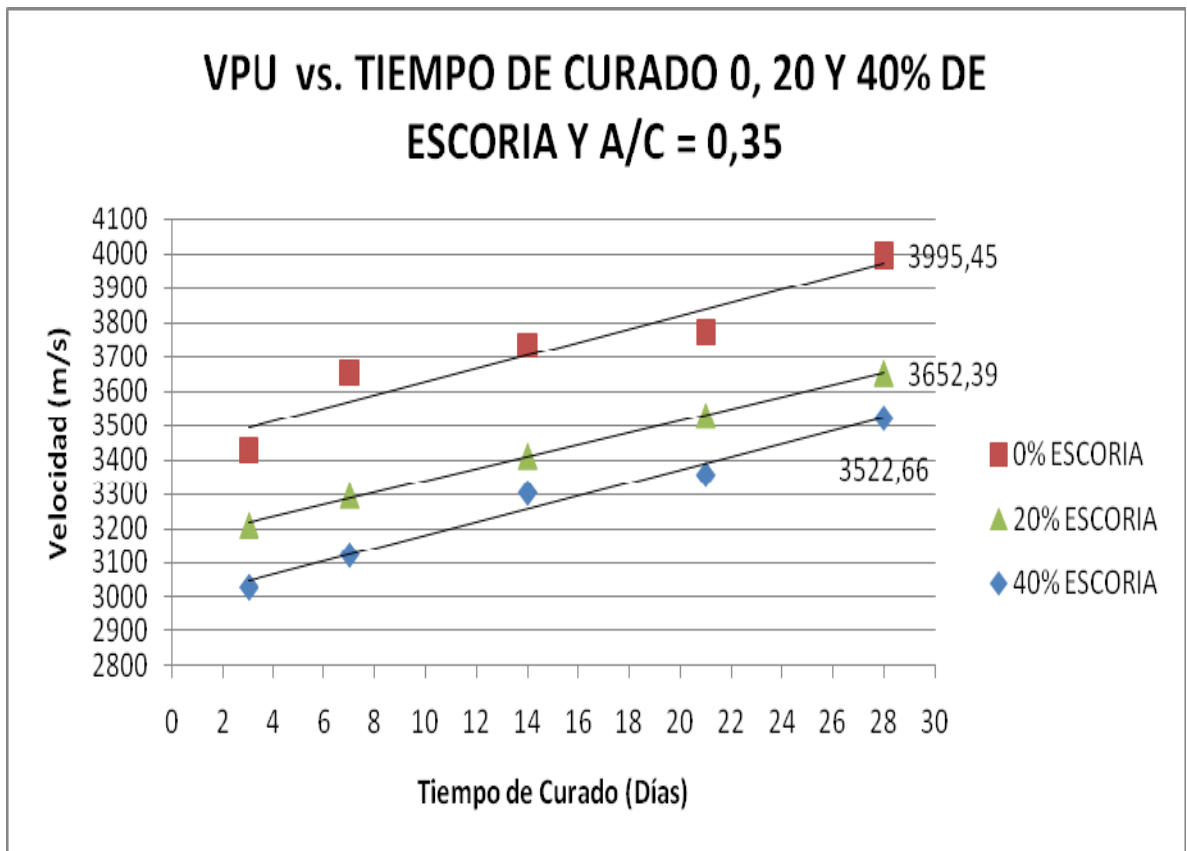
<b>% DE ESCORIA</b>	<b>DÍAS DE CURADO</b>	<b>VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)</b>
<b>0</b>	3	3265,54
	7	3363,01
	14	3523,44
	21	3769,12
	28	3974,81
<b>20</b>	3	3156,89
	7	3297,89
	14	3474,79
	21	3508,69
	28	3610,77
<b>40</b>	3	3016,67
	7	3190,37
	14	3317,77
	21	3468,23
	28	3549,66

**Fuente.** Los Autores

También se observa que a medida que transcurre el tiempo de curado, los valores de velocidad de pulso ultrasónico van aumentando, dando su valor máximo en el día 28 para las dos relaciones A/C, confirmando así lo revisado en la bibliografía consultada. [13], [23].

En el gráfico 1 se presentan los resultados de velocidad de pulso ultrasónico a medida que avanza el tiempo de curado, para cada porcentaje de escoria adicionado para una relación  $A/C=0,35$ .

**Gráfico 1. Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación  $A/C = 0,35$  a diferentes edades**



Fuente. Los Autores

En el gráfico 1 se puede observar que para una mezcla con relación  $A/C=0,35$ , sin adición de escoria, el valor máximo de velocidad obtenido es de 3995,45 m/s (Ver tabla 16) a los 28 días de curado, valor que prevé una resistencia a la compresión mayor, ya que se espera que entre mayor sea la velocidad de pulso ultrasónico, mayor será la resistencia a la compresión. [23]. Por otra parte, es notoria también

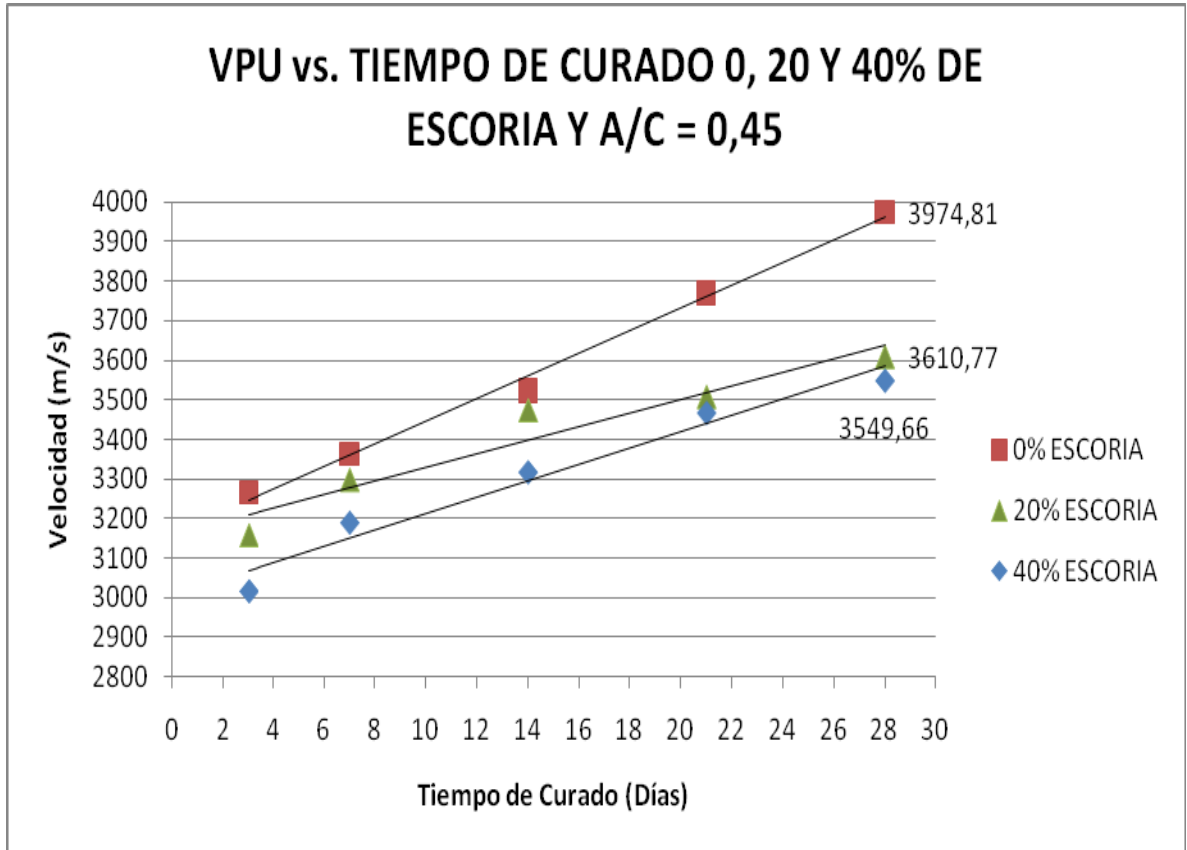
la caída en los valores de velocidad de pulso ultrasónico, a medida que aumenta el porcentaje de adición de escoria y dicha caída en los valores es bastante pronunciada a partir del día tres.

En el gráfico 2 se presentan los resultados de velocidad de pulso ultrasónico a medida que avanza el tiempo de curado, para cada porcentaje de escoria adicionado para una relación  $A/C=0,45$ .

En el gráfico 2 se puede observar exactamente la misma tendencia del gráfico1, en el cual existe un aumento de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta el tiempo de curado, pero con la diferencia que para la relación  $A/C=0,45$  el valor máximo de velocidad encontrado es de 3974,81 m/s (Ver tabla 17) y es menor que el encontrado en la relación  $A/C=0,35$ .

Para esta relación  $A/C$ , los valores de velocidad de pulso ultrasónico también disminuyen a medida que aumenta la adición de escoria, pero, aunque este efecto se presenta desde el día tres, se hace más notorio a partir del día 14 de curado. Lo anterior evidencia que para concretos adicionados con escoria, el tiempo de curado debería ser mucho mayor que en aquellos sin adiciones, debido al efecto retardante presentado por la escoria.

**Grafico 2. Registro de velocidades de pulso ultrasónico para un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C = 0,45 a diferentes edades**



Fuente. Los Autores

#### 4.2.3 Ensayo de resistencia a la compresión

Siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior, este ensayo se realizó inmediatamente después del ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico utilizando las mismas probetas. Los resultados de este ensayo se expresan en unidades de esfuerzo (MPa). En las tablas 18 y 19 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión para las relaciones A/C 0,35 y 0,45 respectivamente.

En la tabla 18 se puede observar que los mayores resultados de resistencia en una mezcla con relación  $A/C=0,35$ , se obtienen en un concreto sin adición de escoria, dando su máximo valor en el día 28 de curado. También es notoria la drástica caída en la resistencia a la compresión en las probetas con adiciones de escoria, es decir que entre más alto sea el porcentaje de adición de escoria, la resistencia a la compresión va a ser cada vez menor, debido al bajo poder cementante encontrado en la escoria utilizada para esta investigación.

A continuación en la tabla 19 se observa que la mezcla con relación  $A/C=0,45$  arroja un valor máximo de resistencia a la compresión en el día 28 de curado, al igual que lo ocurrido con la mezcla con relación  $A/C=0,35$ .

Para las dos relaciones  $A/C$  se obtuvo resultados semejantes al adicionar la escoria en porcentajes de 20% y 40%; en ambos casos la adición de escoria disminuye la resistencia a la compresión drásticamente, efecto que se puede apreciar en los gráficos 3 y 4.

**Tabla 18. Valores promedio de resistencia a la compresión para A/C = 0,35**

<b>% DE ESCORIA</b>	<b>DÍAS DE CURADO</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)</b>
<b>0</b>	3	35,6278
	7	39,3876
	14	43,7475
	21	45,3391
	28	48,0038
<b>20</b>	3	25,4590
	7	29,6457
	14	32,4408
	21	35,3648
	28	37,3591
<b>40</b>	3	9,8954
	7	14,4567
	14	18,3694
	21	19,1837
	28	23,1255

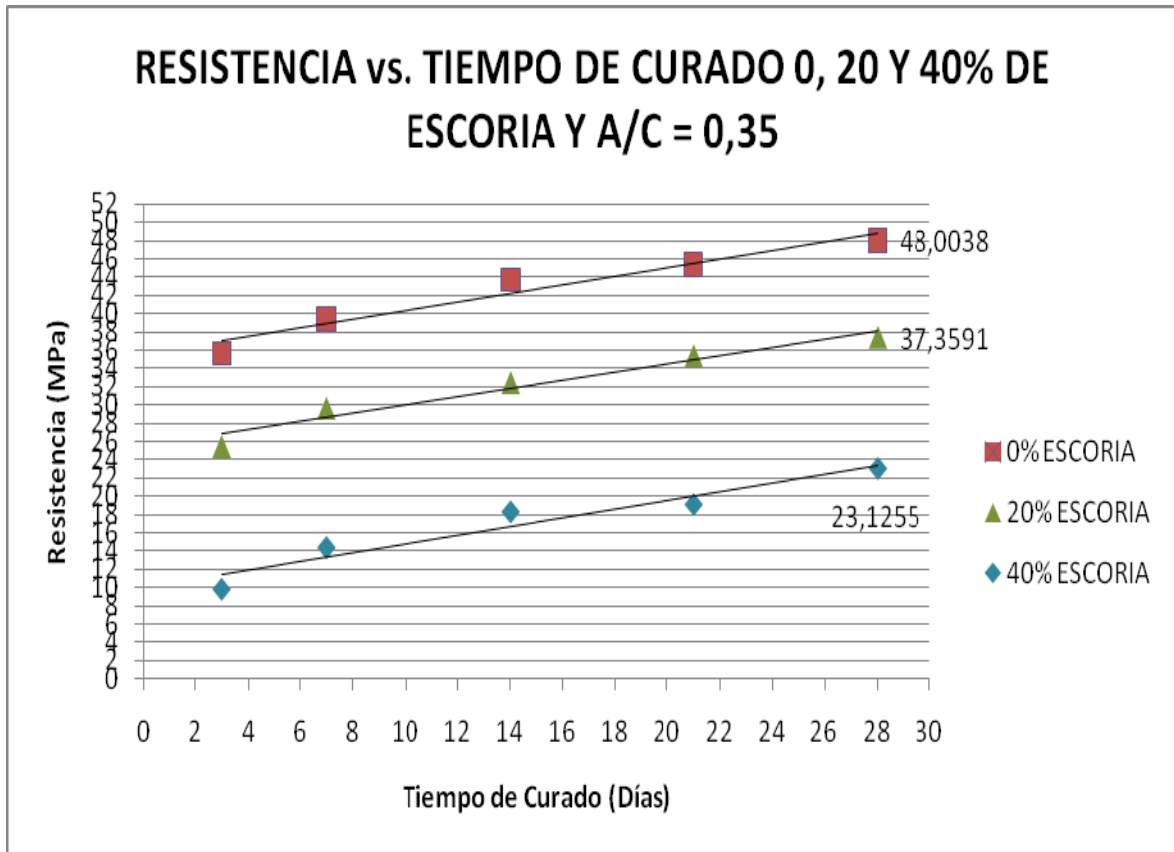
**Fuente.** Los Autores

**Tabla 19. Valores promedios de resistencia a la compresión para A/C=0,45**

<b>% DE ESCORIA</b>	<b>DÍAS DE CURADO</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)</b>
<b>0</b>	3	22,5436
	7	26,7469
	14	33,5498
	21	37,4525
	28	39,7643
<b>20</b>	3	12,3973
	7	16,5876
	14	22,6543
	21	24,8755
	28	27,3498
<b>40</b>	3	8,5674
	7	10,6293
	14	15,7365
	21	18,5378
	28	22,2764

**Fuente.** Los Autores

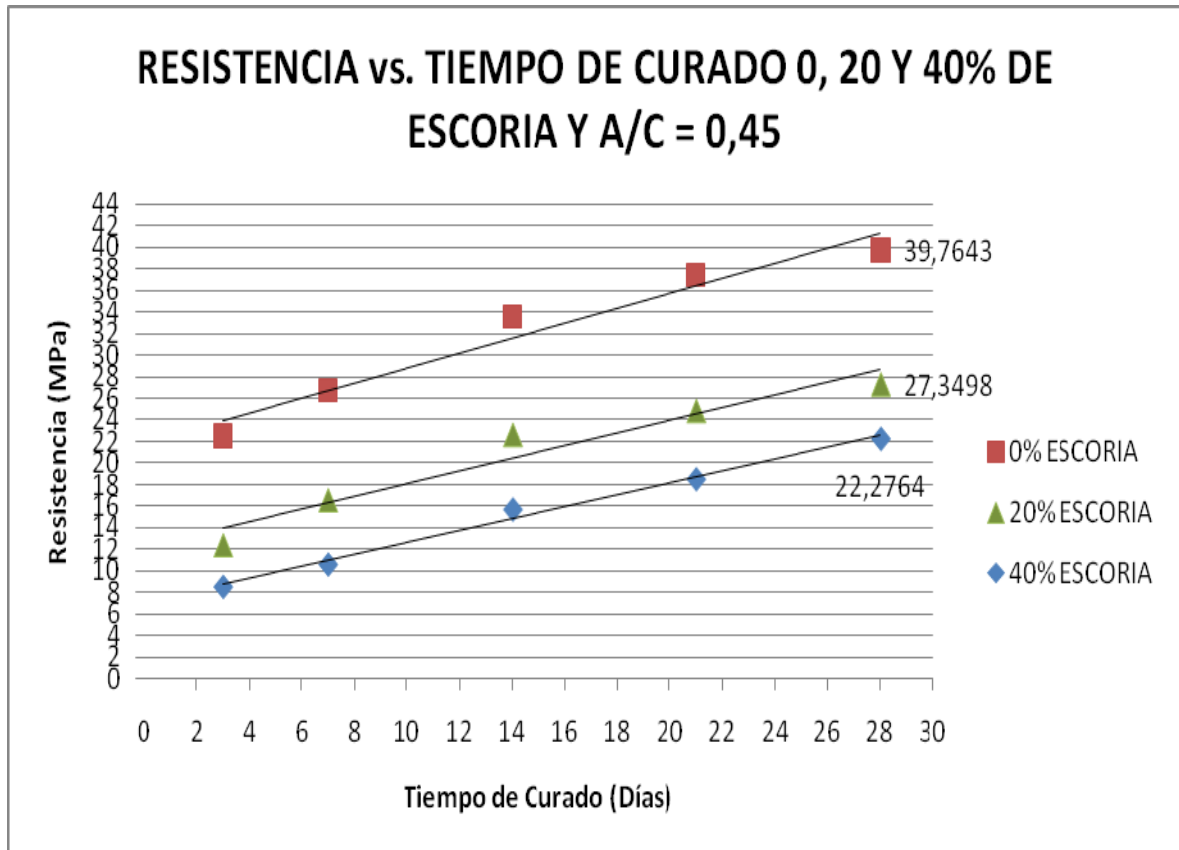
**Gráfico 3. Valores de resistencia a la compresión en un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C=0,35 a diferentes edades**



Fuente. Los Autores

De acuerdo a los gráficos 3 y 4 se puede comprobar que al reemplazar el cemento Portland con escoria, disminuye en gran medida la resistencia a la compresión, sin importar la relación A/C. Estos resultados obtenidos de resistencia en el concreto adicionado con escoria, van de acuerdo con las características encontradas de la escoria utilizada, la cual debido a su bajo poder cementante, no proporciona las propiedades mecánicas deseadas, ya que está comportándose como agregado fino.

**Gráfico 4. Valores de resistencia a la compresión en un concreto con adiciones de escoria de 0, 20% y 40% para una relación A/C=0,45 a diferentes edades**



**Fuente.** Los Autores

Para ambas relaciones A/C a medida que aumenta el tiempo de curado, aumenta también la resistencia, mostrando un comportamiento casi lineal en los primeros días de curado, aproximadamente hasta el día 14, a partir del cual la resistencia aumenta a una velocidad cada vez más baja, debido de este día en adelante, la reacción de hidratación del cemento se hace más lenta.

En el gráfico 3, se observa que para los porcentajes de adición de 0% y 20% de escoria el intervalo de resistencia es menor que el que hay entre 20% y 40% de adición, así puede ser previsto que los concretos con una relación A/C = 0,35 y

40% de escoria adicionada obtienen valores de resistencia muy bajos debido a la disminución del contenido de Aluminato tricálsico por gramo de cemento que se da al reemplazar el cemento Portland por escoria.

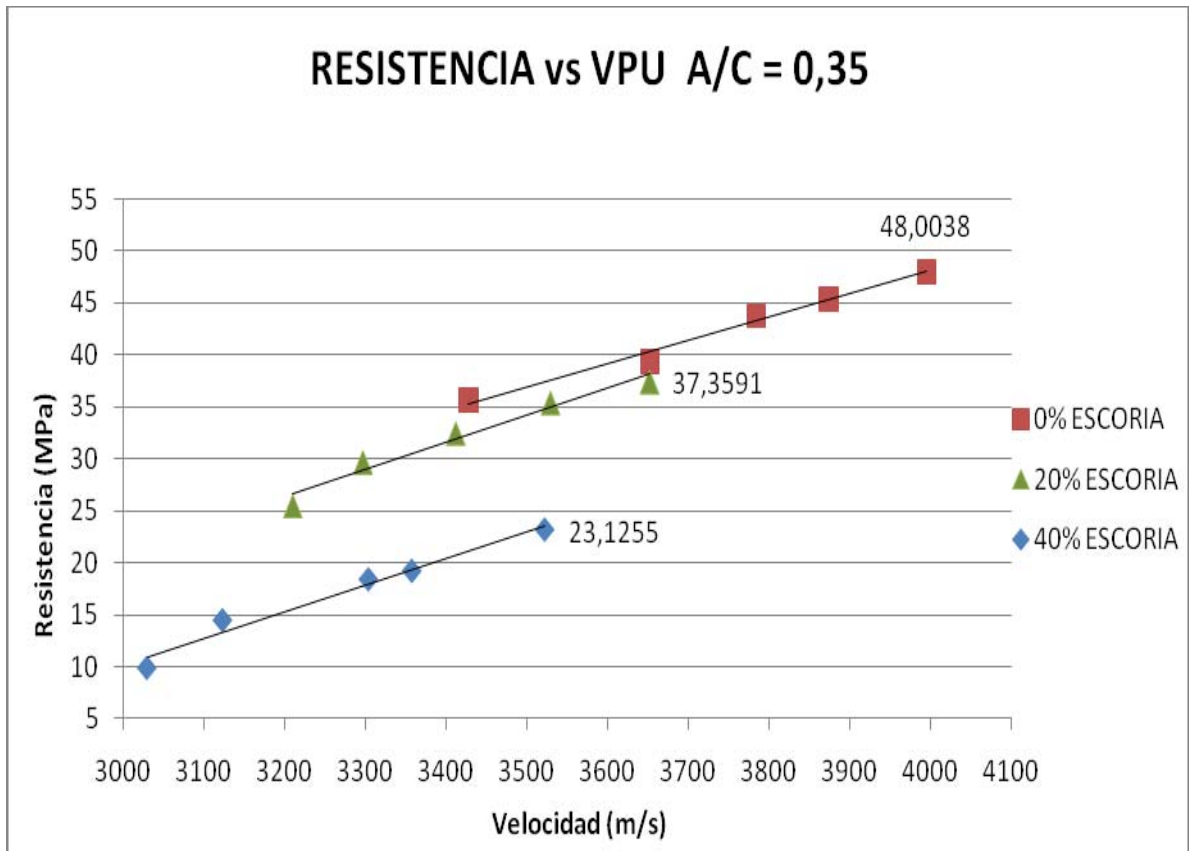
En el gráfico 4 el intervalo de resistencia entre 0% y 20% de escoria es muy grande comparado con el existente entre 20% y 40% de adición. Además puede verse que entre 0% y 20% de escoria, dicho intervalo se hace cada vez mayor a partir del día 14 de curado, debido a que en el concreto sin adición de escoria las reacciones de hidratación ocurren a una mayor velocidad y de manera completa alcanzando su máxima resistencia en el día 28, comportamiento que no ocurre con los concretos con adiciones de escoria, en los cuales, debido al contenido de aditivo, las reacciones de hidratación suceden de manera parcial y se hacen cada vez más lentas, a medida que transcurre el tiempo de curado.

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

En los gráficos 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la compresión contra los valores de velocidad de pulso ultrasónico para las dos relaciones A/C (0.35 y 0.45).

- RELACION A/C = 0,35

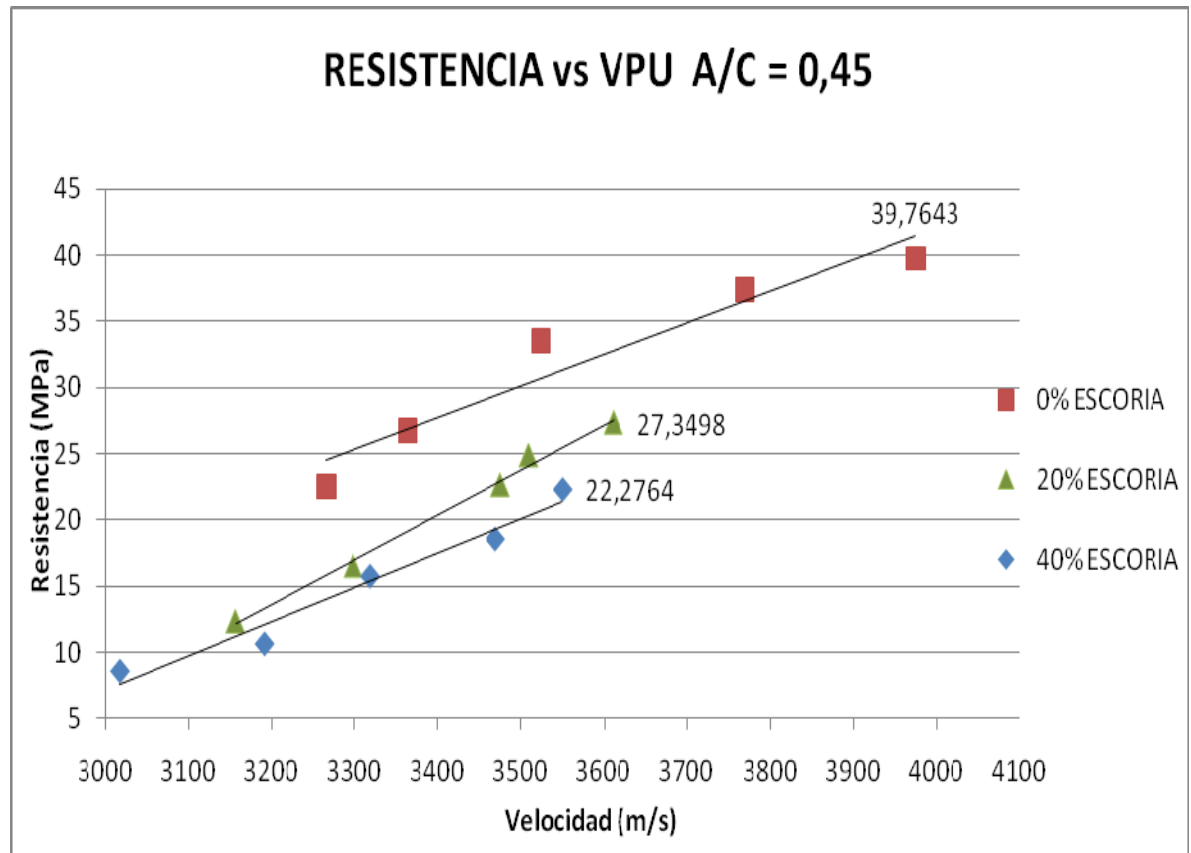
**Gráfico 5. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para un concreto con adiciones de 0%, 20% y 40% de escoria.**



Fuente. Los Autores

- RELACION A/C = 0,45

**Gráfico 6. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para un concreto con adiciones de 0%, 20% y 40% de escoria.**



Fuente. Los Autores

Las ecuaciones presentadas a continuación se ajustan a un modelo matemático lineal debido al alto grado de correlación conseguido para el intervalo de datos manejados. El modelo encontrado es del tipo:

$$f'(c) = mX + b$$

**Ecuación 5**

Donde  $f'(c)$  representa la resistencia a la compresión (MPa) y  $X$  representa los valores de velocidad de pulso ultrasónico (m/s).

Las tablas de datos tomados para hallar estas correlaciones se encuentran en los anexos B y C.

En las tablas 20 y 21 se presentan las expresiones matemáticas así como los coeficientes de correlación para cada porcentaje de adición de escoria con relaciones A/C 0,35 y 0,45 respectivamente.

**Tabla 20. Expresiones matemáticas y coeficientes de correlación para una relación A/C=0,35**

% de adición de escoria	Ecuación	R <sup>2</sup>
0	$f'(c) = 0,0224X - 41,603$	0,9874
20	$f'(c) = 0,0261X - 57,208$	0,9659
40	$f'(c) = 0,0255X - 66,164$	0,9733

Fuente. Los Autores

**Tabla 21. Expresiones matemáticas y coeficientes de correlación para una relación A/C=0,45**

% de adición de escoria	Ecuación	R <sup>2</sup>
0	$f'(c) = 0,0238X - 53,292$	0,9243
20	$f'(c) = 0,0339X - 94,811$	0,9939
40	$f'(c) = 0,0258X - 70,247$	0,9641

Fuente. Los Autores

Como se observó en los gráficos 1 al 4, una vez más se puede comprobar que al adicionar escoria al concreto, esta disminuye tanto la velocidad de pulso ultrasónico como la resistencia a la compresión, a medida que aumenta el porcentaje de adición, sin importar la relación A/C.

Puede ser visto también que para un concreto sin adición de escoria se obtienen los mejores resultados de velocidad de pulso ultrasónico y de resistencia a la compresión.

Los valores altos de coeficientes de correlación  $R^2$  indican una muy buena relación lineal entre velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, para ambas relaciones A/C (0,35 y 0,45).

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en probetas de concreto elaboradas con diferentes relaciones A/C y curadas en condiciones ambientales bajo techo, se puede concluir que:

En las distintas relaciones A/C (0,35 y 0,45) adicionadas con escoria, los mejores resultados de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico se obtuvo para las probetas de concreto con relación A/C = 0,35 y 20% de escoria. Adicionalmente, se pudo observar que a mayores cantidades de escoria, los valores de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico eran menores que los valores obtenidos en las probetas de concreto sin adición de escoria. Esto debido a las características de la escoria y a las condiciones de curado las cuales establecen las propiedades al concreto.

Esta investigación permitió establecer la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en concretos con adiciones de escoria, por medio de técnicas no destructivas y destructivas. Se encontró un modelo matemático lineal entre las variables consideradas de la forma  $f'(c) = mX + b$ , con índices de correlación superiores a 0,992.

Este estudio permitió comprobar para en ambas relaciones A/C, la existencia de un efecto retardante sobre las reacciones de curado del concreto, debido a la escoria siderúrgica utilizada.

Durante la investigación se confirma la gran importancia que tiene el tiempo de curado de los concretos y en particular, cuando han sido adicionados con escoria. Un corto tiempo de curado ocasiona una mayor pérdida de propiedades en el concreto adicionado que en el concreto sin adición.

## 6. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos durante esta investigación, se recomienda:

Continuar los estudios de concretos adicionados con escoria siderúrgica, variando tanto el tipo como el tiempo de curado, con el fin de establecer una mejor correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión de dichos concretos.

Que para próximas investigaciones con este tipo de escoria, hacer un tratamiento de activación de la misma, para mejorar su poder cementante y su influencia en las propiedades mecánicas del concreto adicionado.

Evaluar otras propiedades del concreto adicionado con escoria, como lo son: porosidad, carbonatación, resistencia a los cloruros, entre otras, que son determinantes en la estimación de la durabilidad del mismo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM C597-02.USA, 2003.*
- [2]. \_\_\_\_\_. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. ASTM C215.USA.*
- [3]. \_\_\_\_\_. *Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33-01. Philadelphia, USA, 2001.*
- [4]. \_\_\_\_\_. *Standard Specification for Portland Cement. ASTM C150-07. Philadelphia, USA, 2007.*
- [5]. \_\_\_\_\_. *Standard Test Method for Compressive Strength for Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39-09a USA, 2009.*
- [6]. \_\_\_\_\_. *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. ASTM C595-10. USA, 2010.*
- [7]. \_\_\_\_\_. *Standard Test Method for specification for slag cement for use in concrete and mortars. ASTM C989-09 USA, 2009.*
- [8]. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA “Acueducto Metropolitano de Bucaramanga” <Disponible en: < [http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/control\\_calidad\\_bga2011.pdf](http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/control_calidad_bga2011.pdf) > visitada en mayo de 2011.

- [9].** ARIZA D., Diana Marcela; ATUESTA E., Javier Andrés. "Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo". Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Bucaramanga. 2010.
- [10].** CASTELLANOS G. "Aplicaciones del método de velocidad de pulso ultrasónico correlacionado con la resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad del concreto hidráulico". Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán. (1985), p. 218-230.
- [11].** CEMENTOS ARGOS S.A. [en línea] Pagina Web. Colombia. < Disponible en: <http://www.argos.com.co> >. Visitada en marzo de 2011.
- [12].** CHAN YAM, José Luís. Solís Carcaño. Moreno, Eric Iván. "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto" Chan J., et. al. / *Ingeniería 7-2* (2003) p. 39-46.
- [13].** CHUNG H., LAW K. S.: "Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique". Concrete International Design and Construction ACI, Octubre, (1983), p. 42-47.
- [14].** CORZO P., Laura Angélica; García D., Johanna Ximena. "Relación entre resistencia a la compresión, la porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento". Universidad

Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Bucaramanga. 2009.

- [15]. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto—1ª Edición, 2004, Capítulo 5, p. 103- 134.*
- [16]. *EL AGUA DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/EI%20Agua%20del%20Concreto> > Visitado en mayo de 2011.*
- [17]. *EL CONCRETO EN LA OBRA. PROBLEMAS, Causas y Soluciones., IMCYC (Instituto Mexicano del Concreto y el Cemento), Junio 2006. p. 20-22.*
- [18]. *FRAGUADO DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html> > Visitado en mayo de 2011.*
- [19]. *GONZÁLES DE LA CORETA, Manuel. Informe final: Cemento Portland de escoria. Cementos Norte Pacasmayo. Mayo de 2011.*
- [20]. *HANDBOOK NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Chapter 8.*
- [21]. *ICONTEC 1377 (1995). Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.*
- [22]. *ICONTEC 550 Y 673. Método para ensayos de cilindros de concreto a la compresión" ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.*

- [23]. KUMAR MEHTA P; MONTEIRO Paulo J.M. *Concrete. Microstructure, Properties and Materials*. Tercera edición. McGraw- Hill. 2006. p. 10-15.
- [24]. LUCO, Luis Fernando. *Importancia del Curado en la Calidad del Hormigón de Recubrimiento. Parte I: Análisis Teórico de los Efectos del Secado Prematuro*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Mayo 2009.
- [25]. MALHOTRA V. M. (1985). "Non-destructive testing of concrete structures". *International Atomic Energy Agency. Training course series No. 17*. Vienna, 2002. p. 44-46.
- [26]. MALHOTRA V. M. *Nondestructive methods for testing concrete*. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Septiembre, 2002. p. 110.
- [27]. MALHOTRA V. M. *Nondestructive methods for testing concrete*. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Septiembre, 2002.
- [28]. MEZCLAS DE CONCRETO < Disponible en: <http://www.arqhys.com/contenidos/mezcla-concreto.html> > Visitado en febrero de 2011.
- [29]. NAWY G. Edward. *Concrete Construction Engineering Handbook*. Taylor and Francis Group. Second edition. 2008. p. 21-5; 21-16.
- [30]. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. *Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas*. NTC 121 (1995).

- [31]. \_\_\_\_\_. *Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso NTC 176 (1995).*
- [32]. \_\_\_\_\_. *Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC 673. 2000.*
- [33]. \_\_\_\_\_. *Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC 237 (1995).*
- [34]. \_\_\_\_\_. *Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones químicas. NTC 321 (1995).*
- [35]. \_\_\_\_\_. *Escoria de alto horno granulada y molida para uso en concretos y morteros. NTC 4018 (1995).*
- [36]. POPOVICS S. *Analysis of the concrete strength versus ultrasonic. Pulse velocity relationship. Materials Evaluation. Febrero 2001. p. 123–130.*
- [37]. SALAZAR JARAMILLO, Alejandro. *Estudio de la durabilidad de concretos adicionados con escoria siderúrgica, con diferentes formas de curado. Corporación Construir. 2010.*
- [38]. SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. *Concretos y Morteros “Manejo y Colocación en obra”. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004. p. 27.*
- [39]. SOLÍS R y BAEZA J. *Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto.*

- [40]. SOLÍS R; MORENO Erick. y R William. *Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Universidad Autónoma de Yucatán, México. Revista técnica de ingeniería. Vol. 8, no. 002. (2004). p. 41-42.*
- [41]. TÜRKMEN Ibrahim, *Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Atatürk, Turquía. Abril de 2003.*
- [42]. TÜRKMEN Ibrahim, DEMIRBOGA Ramazan y KARAKOÇ Mehmet. *Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Atatürk, Turquía. Abril de 2004.*
- [43]. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. *Cursos. Composición del concreto simple. Sede Manizales. [en línea] Pagina Web. <Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/Lecciones/Capitulo%203/COMPOSICION%20DEL%20CONCRETO%20SIMPLE.htm>*

## ANEXOS

### ANEXO A. Metodología para el diseño de mezcla

**PASO I. Selección del asentamiento.** Al seleccionar la consistencia adecuada deberá usarse el asentamiento más reducido posible compatible con la adecuada colocación del concreto en obra, y para ello el método entrega una tabla para distintos tipos de construcciones y su asentamiento óptimo. En la tabla 1 se presentan los asentamientos recomendados según el tipo de estructura y condiciones de colocación.

**PASO II. Selección de la relación agua-cemento.** La relación agua/cemento, también conocida como razón agua/cemento,  $a/c$ , es uno de los parámetros más importantes de la tecnología del concreto, pues influye de manera significativa en su durabilidad y resistencia final y también determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida. Expresa la íntima relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento.

$$R = \frac{a}{c}$$

**Ecuación 1**

Donde: R: Relación agua / cemento.  
a: Masa del agua del concreto fresco en Kg.  
c: Masa del cemento del concreto en Kg.

**Tabla 1. Asentamientos recomendados para diversos tipos de estructuras.**

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (mm)	TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
<b>Muy seca</b>	0 - 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación.	Vibradores con formaleta; concreto lanzado	Secciones sujetas a vibración extrema (puede requerirse presión)
<b>Seca</b>	20 - 35	Pavimentos	Pavimentador con terminador vibratorio	Secciones sujetas a vibración intensa
<b>Semi-seca</b>	35 - 50	Pavimentos, fundiciones en concreto simple	vibrador normal	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
<b>Media</b>	50 - 100	<b>Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas</b>	<b>Colocación manual</b>	<b>Secciones medianamente reforzadas, sin vibración</b>
<b>Húmeda</b>	100 - 150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
<b>Muy húmeda</b>	> 150	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo - embudo. Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (autonivelante)

**Fuente.** Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

**PASO III. Estimación del contenido de agua.** Para poder determinar la cantidad necesaria de agua a utilizar se debe tener en cuenta que el agua dentro de la mezcla de concreto cumple dos funciones: la primera es la de hidratar el cemento, y la segunda es la de producir la fluidez necesaria. Por lo tanto, la estimación de esta cantidad está sujeta al tipo de asentamiento que se quiera producir y el tamaño máximo de agregado con el cual se va a trabajar. La tabla 2, proporciona estimaciones de la cantidad de agua necesaria en la mezcla de concreto según el tamaño máximo de agregado y el asentamiento sin aire incluido.

**Tabla 2. Agua en Kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados para mezclas de concreto sin aire incluido.**

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	10 mm.	13 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	75 mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
5 a 10	225	215	<b>200</b>	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

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

**PASO IV. Estimación del contenido de cemento.** La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene a partir de la relación agua cemento y

del contenido de agua encontrado en el paso anterior. Por medio de la siguiente ecuación:

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

**Ecuación 2**

**PASO V. Estimación del contenido de agregado grueso.** El contenido de agregado grueso se calcula a partir de la siguiente ecuación:

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

**Ecuación 3**

Donde:

**b** = Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

**b<sub>0</sub>** = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto

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

La tabla 3 muestra el valor de la relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso ( $b/b_0$ ) de acuerdo al tamaño máximo de agregado y el módulo de finura de la arena.

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

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

Fuente. Tecnoconcreto. Diseño de Mezcla

**PASO VI. Estimación del contenido de agregado fino.** El volumen de agregado fino 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.

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

**Ecuación 4**

Donde:  $V_{af}$  = Volumen de agregado fino ( $\text{m}^3$ )  
 $V_a$  = Volumen de agua ( $\text{m}^3$ )  
 $V_c$  = Volumen de cemento ( $\text{m}^3$ )  
 $V_{ag}$  = Volumen de agregado grueso ( $\text{m}^3$ )

Para calcular la cantidad de agregado fino en peso, se divide el volumen de agregado fino entre la densidad aparente, la cual se calcula en la caracterización de la materia prima y se encuentra especificada en la tabla XI.

De esta manera se calculan las cantidades necesarias de cada uno de los componentes del concreto para soportar una determinada resistencia.

**PASO VII. Fraguado.** El fraguado puede definirse como el lapso de tiempo necesario para que la mezcla pase de un estado fluido a un estado sólido, debido a las reacciones químicas que se producen cuando se ponen en contacto el cemento con el agua de mezclado, causando un endurecimiento paulatino de la mezcla. El fraguado ocurre al exponer las probetas al aire libre durante mínimo 10 horas en las que se busca obtener una parte del endurecimiento que será completado con los 28 días del proceso de curado [16].

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

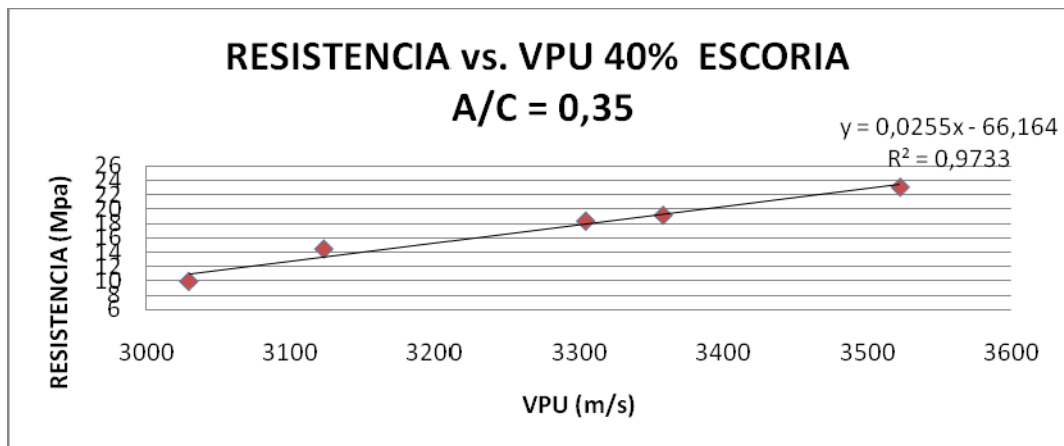
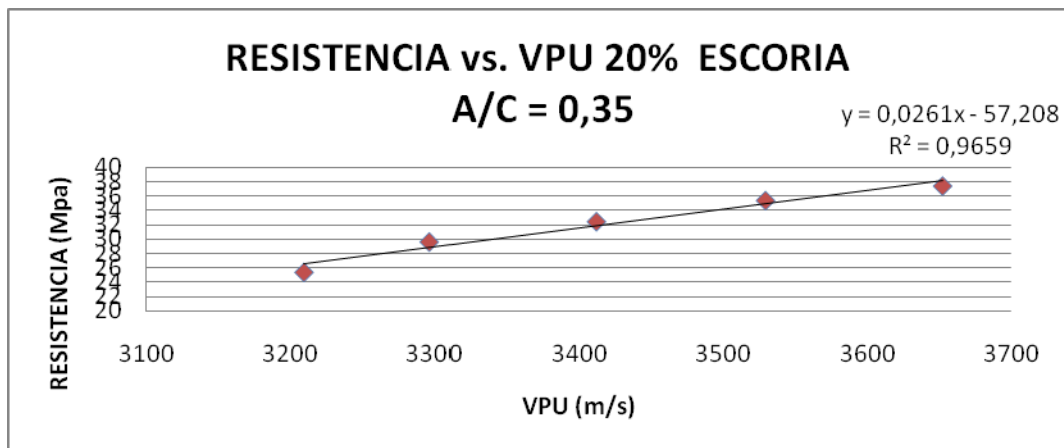
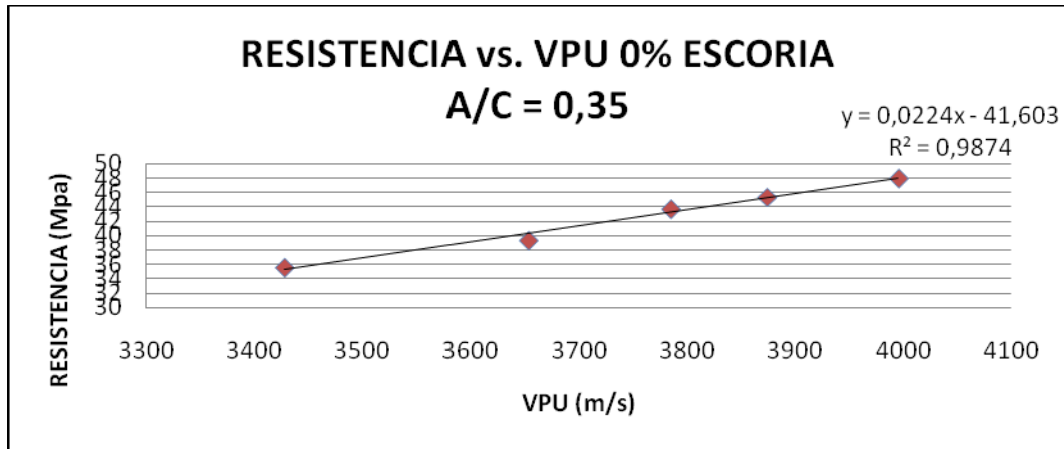
**ANEXO B. Tabla de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para una relación A/C = 0.35**

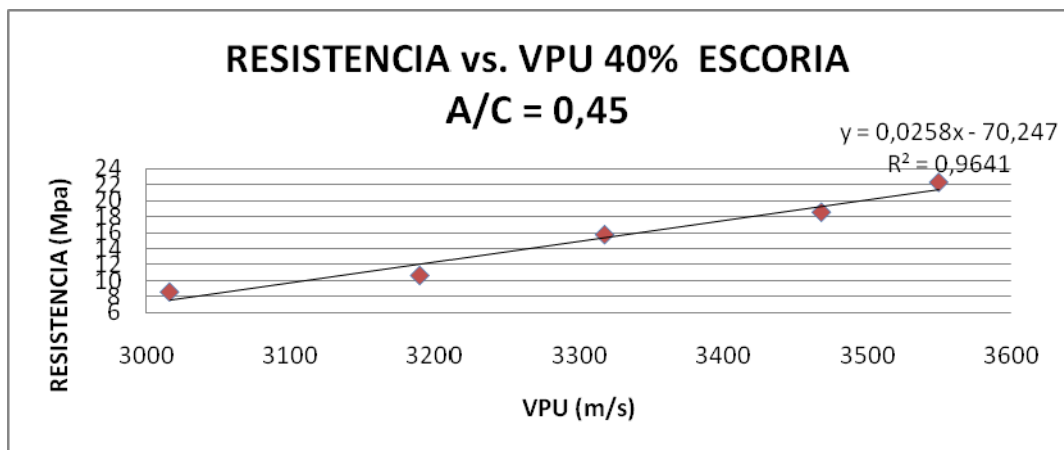
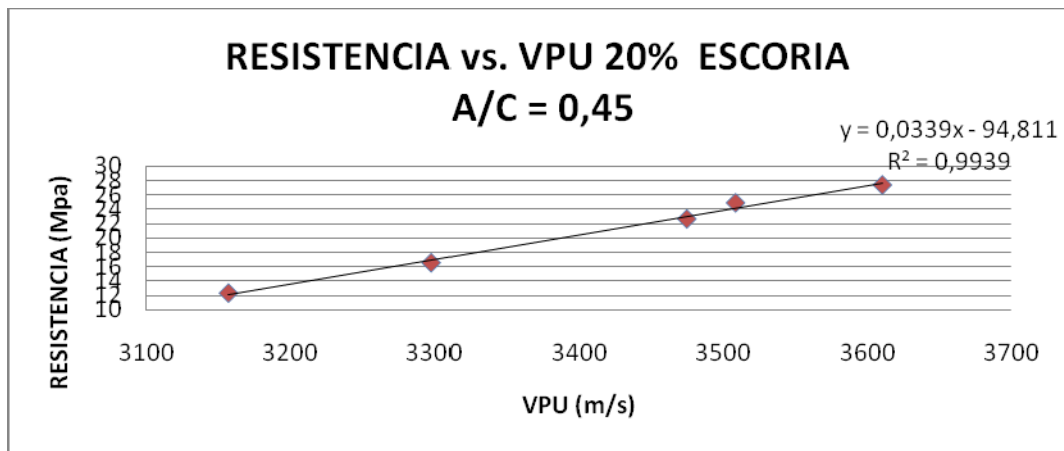
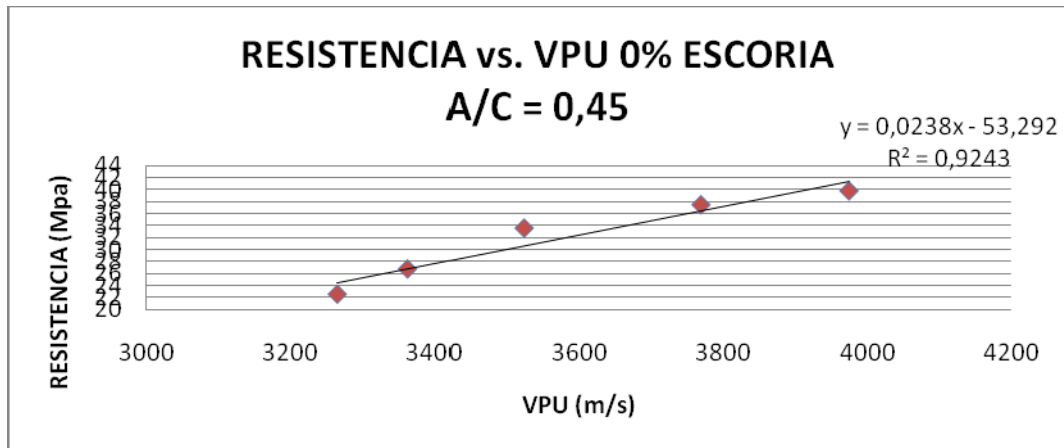
RELACION A/C	%ESCORIA	DÍAS DE CURADO	ULTRASONIDO	RESISTENCIA
0.35	0	3	3427,87	35,6278
		7	3652,67	39,3876
		14	3784,33	43,7475
		21	3874,23	45,3391
		28	3995,45	48,0038
	20	3	3209,57	25,4590
		7	3296,57	29,6457
		14	3411,89	32,4408
		21	3529,37	35,3648
		28	3652,39	37,3591
	40	3	3029,8	9,8954
		7	3123,56	14,4567
		14	3304,38	18,3694
		21	3358,14	19,1837
		28	3522,66	23,1255

**ANEXO C. Tabla de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para una relación A/C = 0.45**

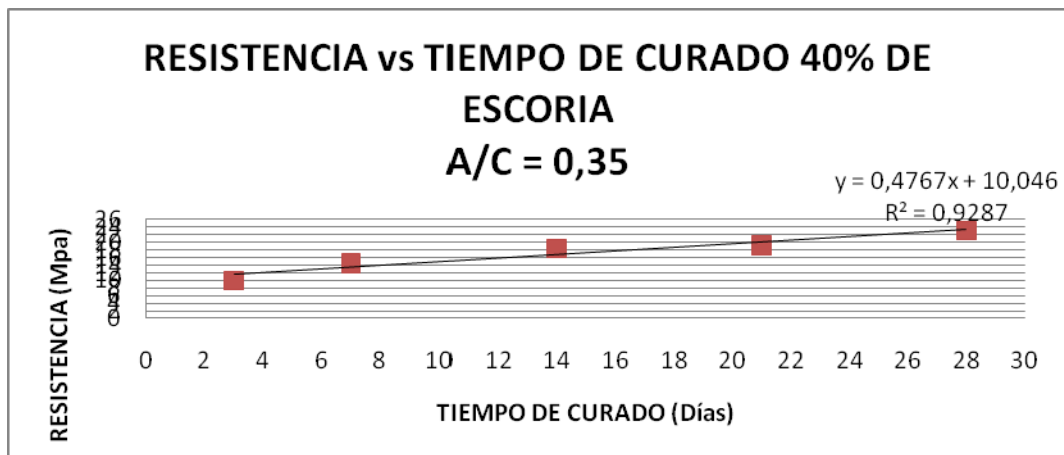
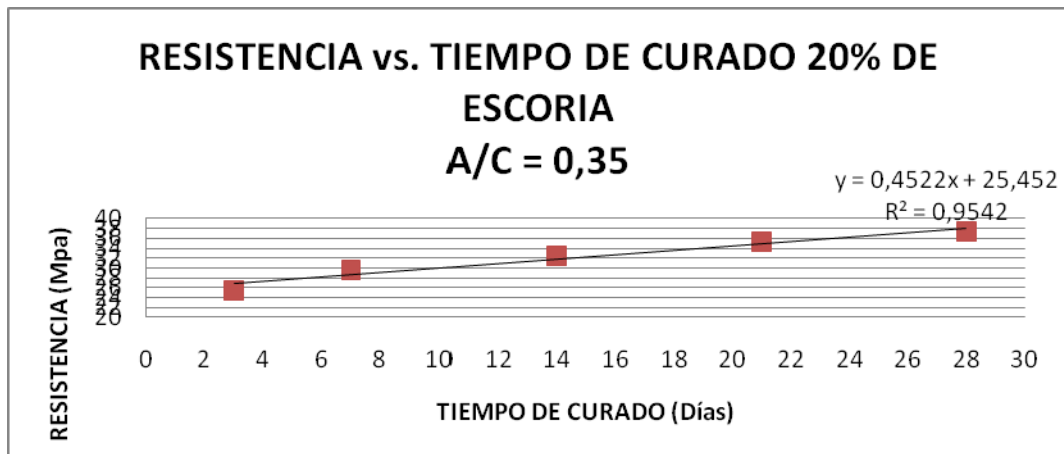
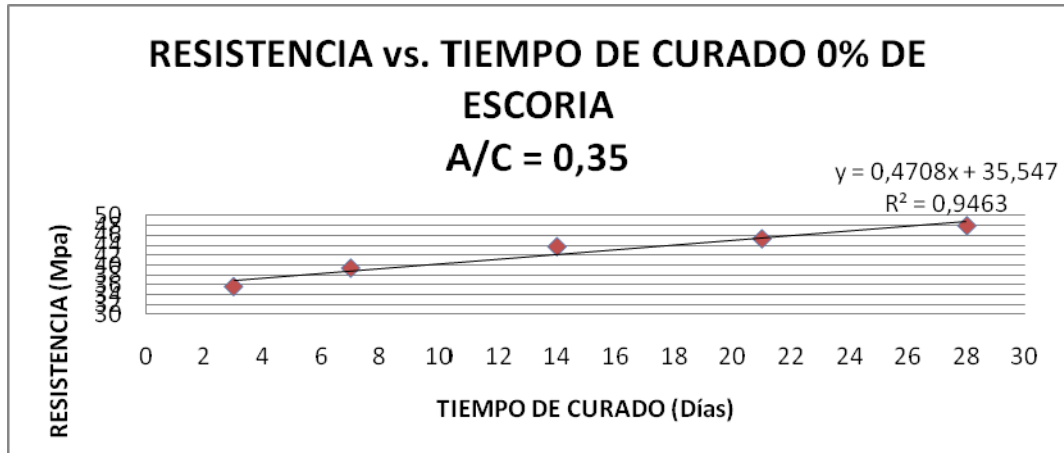
RELACION A/C	%ESCORIA	DÍAS DE CURADO	ULTRASONIDO	RESISTENCIA
0.45	0	3	3265,54	22,5436
		7	3363,01	26,7469
		14	3523,44	33,5498
		21	3769,12	37,4525
		28	3974,81	39,7643
	20	3	3156,89	12,3973
		7	3297,89	16,5876
		14	3474,79	22,6543
		21	3508,69	24,8755
		28	3610,77	27,3498
	40	3	3016,67	8,5674
		7	3190,37	10,6293
		14	3317,77	15,7365
		21	3468,23	18,5378
		28	3549,66	22,2764

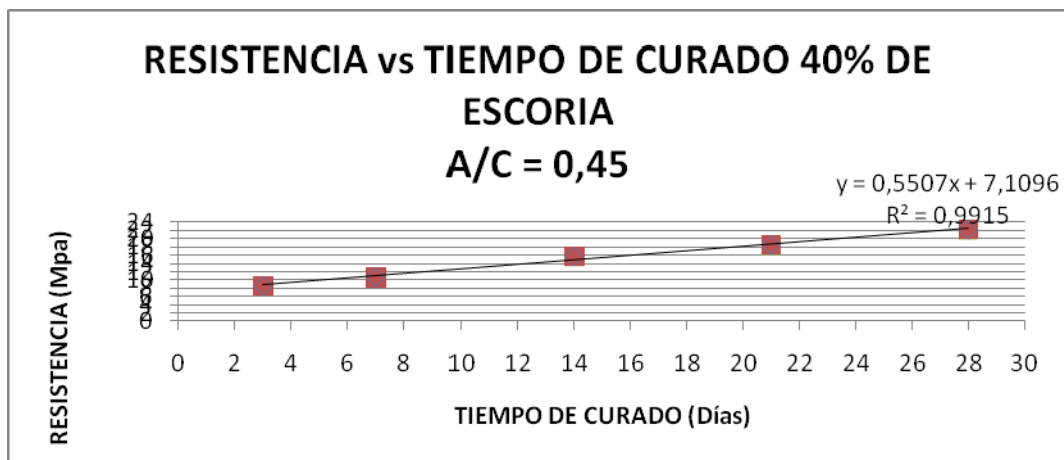
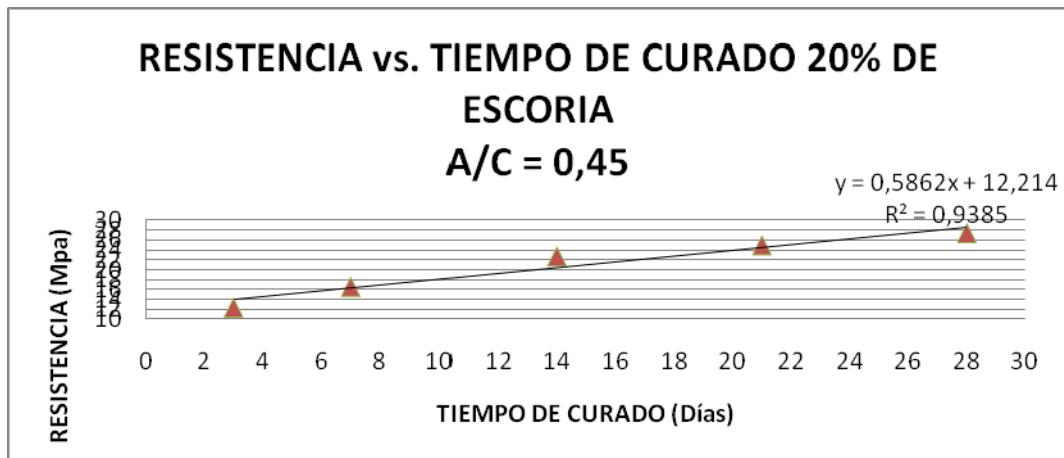
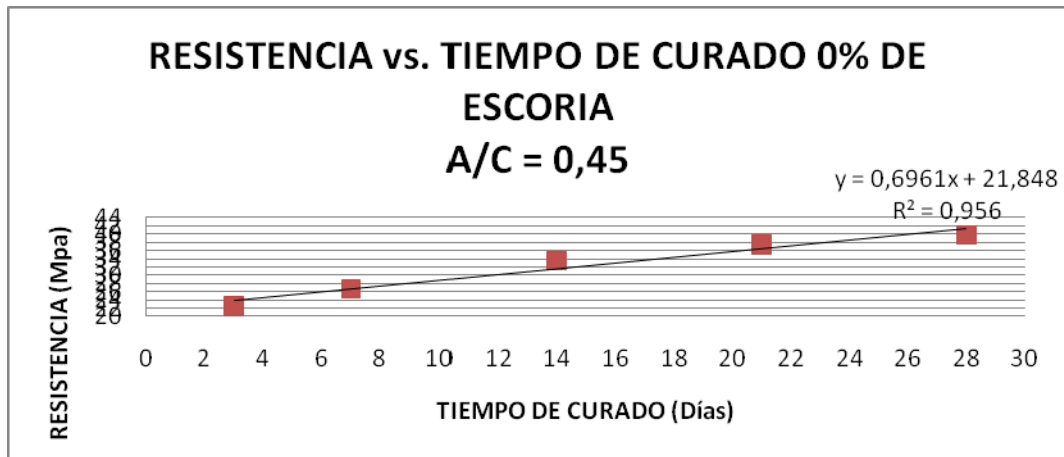
**ANEXO D. Gráficos de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para las relaciones A/C = 0.35 y 0.45**



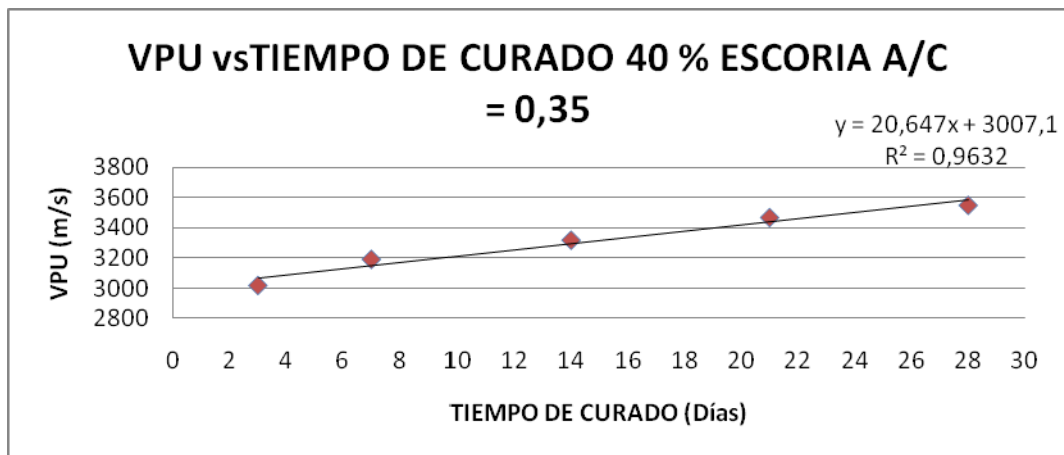
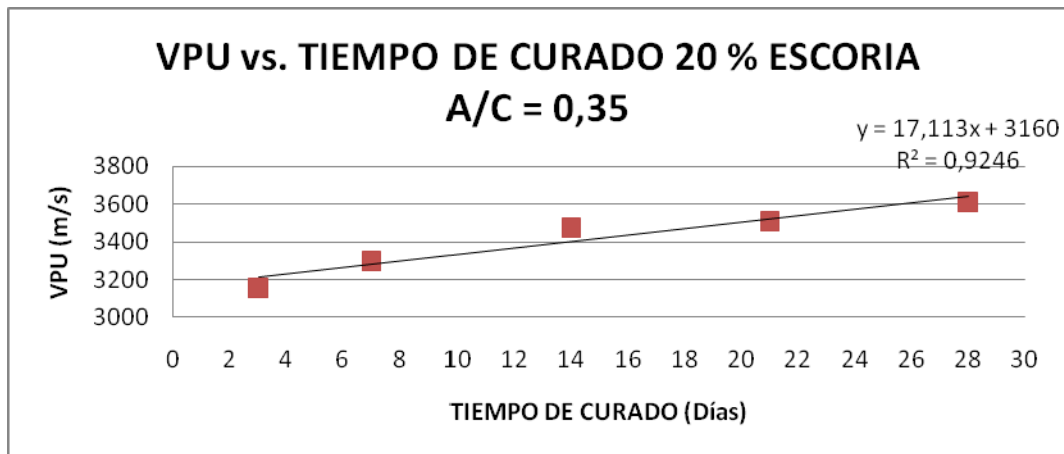
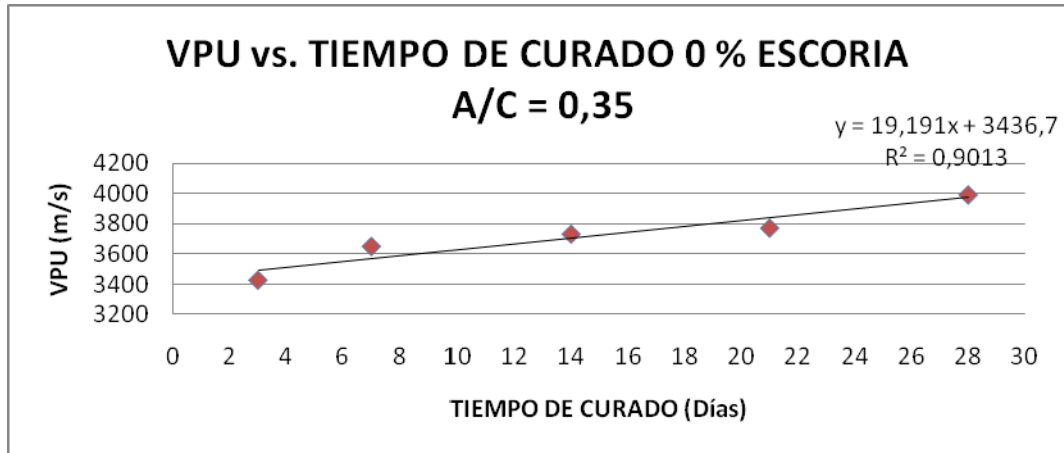


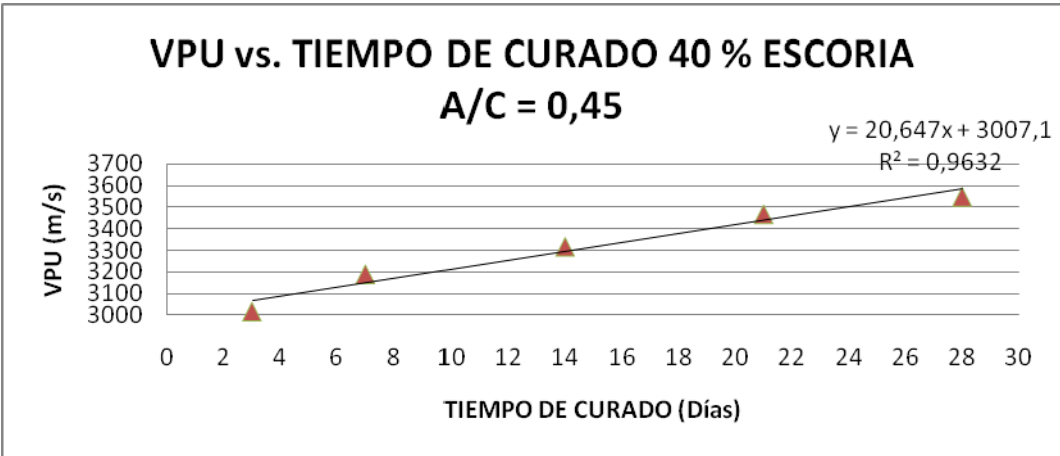
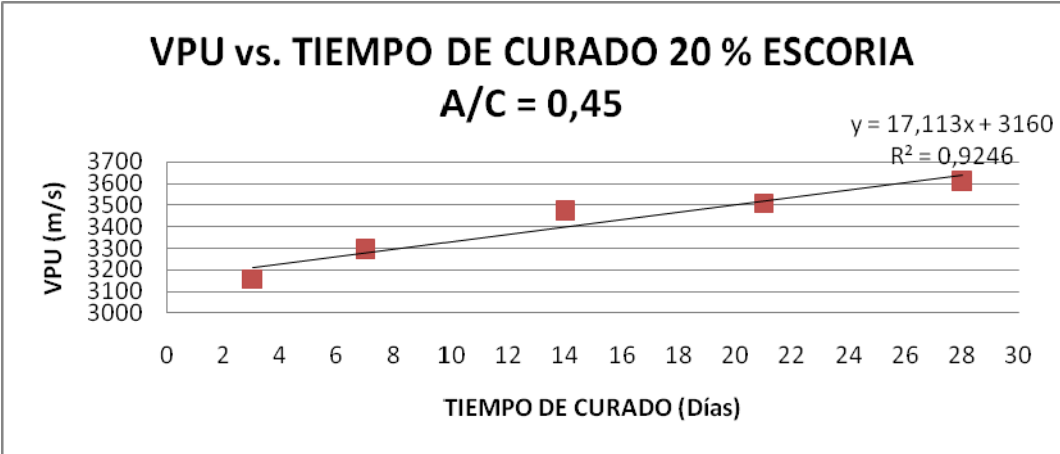
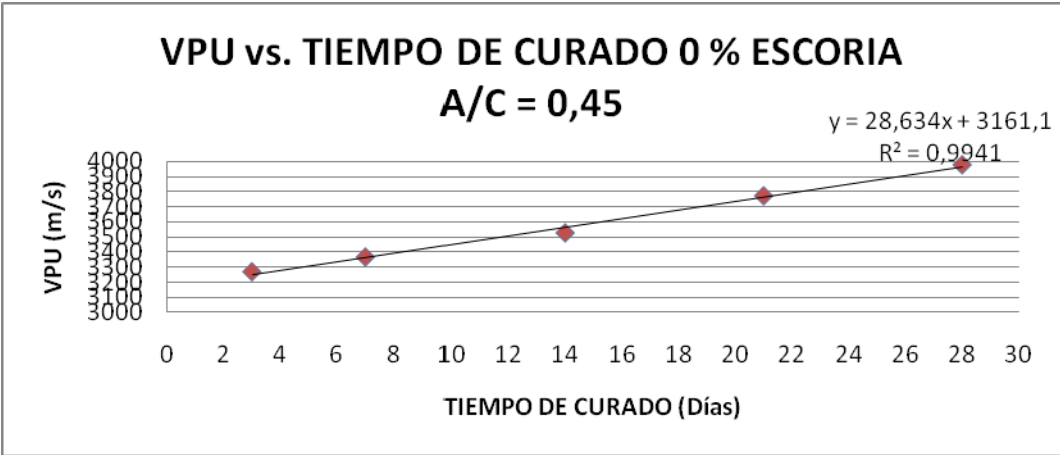
**ANEXO E. Gráficos de correlación entre las medidas de resistencia a la compresión y el tiempo de curado para las relaciones A/C = 0.35 y 0.45**





**ANEXO F. Gráficos de correlación entre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para las relaciones A/C = 0.35 y 0.45**





**ANEXO G. Tabla de valores de los diámetros y longitudes promedio en las probetas de concreto de relación A/C = 0,35**

# de probeta	Diámetro	Longitud	# de probeta	Diámetro	Longitud	# de probeta	Diámetro	Longitud
1	10,2667	20,2667	16	10,2667	20,2667	31	10,2667	20,3333
2	10,3333	20,1333	17	10,3333	20,2000	32	10,2667	20,4333
3	10,4000	20,0333	18	10,3333	20,1667	33	10,2667	20,3333
4	10,2332	20,4000	19	10,1667	20,5667	34	10,3000	20,0333
5	10,3367	20,1667	20	10,2333	20,7667	35	10,3333	20,4667
6	10,3667	20,3667	21	10,2333	20,8667	36	10,3667	20,1333
7	10,2633	20,4337	22	10,2667	20,2667	37	10,2667	20,2667
8	10,3000	20,1000	23	10,2667	20,3667	38	10,3333	20,9000
9	10,3267	20,3000	24	10,3000	20,4667	39	10,4333	20,6667
10	10,1333	20,3000	25	10,2667	20,2667	40	10,3667	20,2333
11	10,2333	20,6667	26	10,3667	20,1000	41	10,4000	20,4667
12	10,3667	20,0333	27	10,2667	20,2667	42	10,3333	20,6000
13	10,0333	20,0333	28	10,2667	20,6333	43	10,3333	20,3667
14	10,3000	20,0333	29	10,2667	20,8000	44	10,4000	20,3667
15	10,3000	20,0000	30	10,2667	20,7667	45	10,3333	20,3667

**ANEXO H. Tabla de valores de los diámetros y longitudes promedio en las probetas de concreto de relación A/C = 0,45**

# de probeta	Diámetro	Longitud	# de probeta	Diámetro	Longitud	# de probeta	Diámetro	Longitud
1	10,3332	20,1333	16	10,3000	20,4332	31	10,4332	20,7000
2	10,3332	20,2666	17	10,3997	20,4667	32	10,2662	20,6666
3	10,4329	20,1666	18	10,3662	20,1332	33	10,4332	20,5998
4	10,3996	20,3667	19	10,3997	20,2666	34	10,3326	20,5332
5	10,2996	20,4667	20	10,2997	20,4666	35	10,4000	20,1998
6	10,3332	20,3667	21	10,3997	20,4666	36	10,3665	20,4329
7	10,3332	20,1332	22	10,3332	20,5333	37	10,4000	20,4666
8	10,3990	20,1333	23	10,4329	20,4998	38	10,3332	20,5000
9	10,5332	20,3666	24	10,3997	20,5333	39	10,4666	20,4666
10	10,2996	20,2667	25	10,3997	20,1332	40	10,4997	20,4666
11	10,4666	20,3666	26	10,3662	20,3666	41	10,4332	20,6329
12	10,3332	20,1666	27	10,2997	20,2666	42	10,3994	20,4998
13	10,	20,1332	28	10,4666	20,3666	43	10,4332	20,2666
14	10,	20,3667	29	10,4332	20,4333	44	10,3665	20,4666
15	10,	20,2667	30	10,3332	20,4666	45	10,3332	20,4333