

**RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA CONCRETOS SIN REFUERZO  
ADICIONADOS CON HUMO DE SÍLICE Y ESCORIA**

**MAYRA ALEJANDRA JAIMES PINZÓN  
SANDRA MILENA CARREÑO RAMÍREZ**

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

**2011**

**RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA CONCRETOS SIN REFUERZO  
ADICIONADOS CON HUMO DE SÍLICE Y ESCORIA**

**MAYRA ALEJANDRA JAIMES PINZÓN  
SANDRA MILENA CARREÑO RAMÍREZ**

**Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniera Metalúrgica**

**Director**

**Ph.D. RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ  
Ingeniería Civil Universidad Industrial de  
Santander**

**Codirector(a)**

**Ms.C LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ  
Ingeniería Metalúrgica Universidad Industrial de Santander**

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

**2011**

## DEDICATORIA

*A ese ser superior que me dio la vida, que me acompaña, que me cuida y que  
pone lo mejor en mi camino.*

*A la persona que más amo en el mundo, a la mujer más importante en mi vida,  
mi motor, la fuerza que me impulsa, la luz que me guía, la que me enseñó sobre  
todo a resistir las dificultades y a vencer los obstáculos. Leticia, Mami Gracias  
por todo, lo que soy te lo debo a ti, a tu inmenso amor y sacrificio.*

*A mis abuelos por su compañía y atención, a mi tía Olga que aún estando lejos  
siempre recuerdo sus palabras y sus consejos, a mis primos; mis niños, aunque  
ya estén grandes, los adoro con toda mi alma, Gracias por llenar la casa de  
color con su presencia.*

*A todas las personas que son importantes en mi vida y que me han enseñado a  
disfrutar de los pequeños detalles.*

*A mis dos grandes amigas con quienes he compartido momentos de alegría y de  
tristeza, quienes me han acompañado desde el colegio y han sido mis hermanas,  
inseparables, incondicionales, protectoras, la familia que sin duda, yo elegí.  
Leidy y Karina. Gracias por creer en mí, Gracias por sostenerme en momentos  
de desánimo y enseñarme a tener fe, por enseñarme que todo en la vida, con  
amor, esfuerzo y dedicación, se puede lograr.*

*Quiero agradecer inmensamente a la Trabajadora Social Adriana Cáceres y la  
Psicóloga Gloria Paulina Uribe, integrantes del equipo de Bienestar  
Universitario, dos personas que han sido importantes, que me han orientado,  
aconsejado y animado.*

**Mayra Alejandra Jaimes Pinzón**

*Al Todo Poderoso, quien por su voluntad me ha permitido surgir como humano  
y formarme como profesional.*

*A mi bella madre “Estrella Ramírez”, pues siempre ha sido para mí, amor,  
apoyo y sacrificio; tú, madre, una buena y muy valiosa razón para aprender y  
querer vivir.*

*A mis maestros, una gran guía y aporte de sabiduría para mi correcta  
formación.*

*Y al gran honor de ser Ingeniera Metalúrgica y desempeñarme con ética y  
profesionalismo.*

***Sandra Milena Carreño***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a:

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma máter, por permitirnos formarnos y crecer.

A nuestro director de proyecto Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz, por orientarnos y brindarnos su gran conocimiento.

A nuestra codirectora de Proyecto, Ms.C Luz Amparo Quintero Ortiz, por apoyarnos de manera incondicional, por su paciencia, su disposición en todo momento, por sus consejos, la confianza brindada, por su entrega, su enorme compromiso con la escuela y con los estudiantes.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica, nuestra segunda casa, que nos acogió, que nos permitió formarnos profesionalmente y también nos brindó la oportunidad de vivir momentos inolvidables. Gracias a los profesores y técnicos por sus enseñanzas y por compartir sus experiencias.

A los Profesores Luis Orlando Aguirre, Luz Amparo Quintero, Custodio Vásquez, Afranio Cardona, Darío Yesid Peña, Elcy Córdoba, Iván Uribe, Gustavo Neira, Julio E. Pedraza, Orlando Gómez, Jaime González, Walter Pardavé, Emiro Muñoz quienes nos brindaron las herramientas y los conocimientos, quienes compartieron su sabiduría y nos enseñaron el amor por esta carrera.

A los técnicos Ambrosio Carrillo, Mario Navarrete y Javier Quintana, por su colaboración, disposición y conocimiento.

A la escuela de Ingeniería Civil, por proporcionarnos sus instalaciones, sus laboratorios, los equipos, materiales y herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo.

A Jairo Hernández, técnico de la Escuela de Ingeniería Civil, a quien le agradecemos especialmente, por su colaboración, confianza, disposición y orientación.

A nuestro Director y nuestra codirectora de proyecto, por la paciencia, por la colaboración y por compartir su gran conocimiento.

A Ms.C Julián Herrera por aconsejarnos y orientarnos.

A nuestros familiares y amigos cercanos. A todas las personas que nos apoyaron y creyeron en nosotras.

A nuestros compañeros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

A todas las personas que de alguna manera hacen parte de nuestra vida, de nuestro corazón y de nuestra formación como profesionales y como seres humanos.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	22
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2 JUSTIFICACIÓN	26
1.3 ESTADO DEL ARTE	26
1.4 OBJETIVOS	28
1.4.1 General	28
1.4.2 Específicos	28
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	30
2.1 COMPONENTES DEL CONCRETO	30
2.1.1 El cemento	30
2.1.2 El agua	30
2.1.2.1 Hidratación del cemento	30
2.1.3 Agregados	32
2.1.4 Aditivos	32
2.1.4.1 Plastificantes retardantes	33
2.1.5 Aire	33
2.1.6 Adiciones minerales	33
2.1.6.1 Humo de sílice	34
2.1.6.2 Escoria siderúrgica	37
2.2 FRAGUADO DEL CONCRETO	38
2.3 CURADO POR INUNDACIÓN Ó INMERSIÓN DEL CONCRETO	39
2.4 POROSIDAD DEL CONCRETO	39
2.5 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	39
2.5.1 Inspección visual	39
2.5.2 Velocidad de pulso ultrasónico	40
2.5.2.1 Factores que influyen en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico	41
2.5.2.2 Principio de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico	42
2.6 ENSAYO DESTRUCTIVO	43
2.6.1 Resistencia a la compresión	43
3. METODOLOGÍA	45
3.1 I FASE: REVISIÓN Y RECOLECCIÓN BIBLIOGRÁFICA	46
3.2 II FASE: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	46
3.2.1 I Etapa: Adquisición de materiales	46

3.2.2 II Etapa: Caracterización de materiales	47
3.2.2.1 Cemento	47
3.2.2.2 Agregado grueso	48
3.2.2.3 Agregado fino	48
3.2.2.4 Agua	48
3.2.2.5 Humo de sílice (adición 1)	49
3.2.2.6 Escoria (adición 2)	49
3.2.2.7 Aditivo Plastificante retardante del fraguado	49
3.2.3 III Etapa: Diseño de la mezcla	50
3.2.4 IV Etapa: Elaboración de las probetas	51
3.2.5 V Etapa: Medición del asentamiento	53
3.2.6 VI Etapa: Fraguado	54
3.2.7 VII Etapa: Curado	54
3.2.8 VIII Etapa: Capacitación preliminar	55
3.3 III FASE. ENSAYOS EXPERIMENTALES	55
3.3.1 Contenido de agua	56
3.3.2 Preparación superficial de las probetas	56
3.3.3 Inspección visual	57
3.3.4 Velocidad de pulso ultrasónico (V.P.U.)	58
3.3.5 Resistencia a la compresión	60
3.4 IV FASE: RESULTADOS	62
3.5 V FASE: INFORME FINAL	62
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	63
4.1.1 Caracterización de materiales	63
4.1.1.1 cemento	63
4.1.1.2 Agregados	64
4.1.1.3 Agua potable	65
4.1.1.4 Humo de sílice (adición 1)	65
4.1.1.5 Escoria (adición 2)	66
4.1.1.6 Plastificante-retardante	67
4.1.2 Diseño de mezcla	69
4.1.3 Elaboración de las Probetas	69
4.2 MEDICIÓN DE ASENTAMIENTO	71
4.3 FRAGUADO Y CURADO	73
4.4 ENSAYOS EXPERIMENTALES	74
4.4.1 Cambios de peso	74
4.4.2 Inspección Visual	78
4.4.3 Evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico V.P.U.	85
4.4.3.1 Influencia del Tiempo de curado en la velocidad de pulso	90

ultrasónico	
4.4.4 Evaluación de la resistencia a la compresión	91
4.4.4.1 Influencia del Tiempo de curado en la resistencia a la compresión	95
4.4.4.2 Forma de fractura de las probetas	96
4.4.5 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión	97
4.4.6 Análisis estadístico	103
5. CONCLUSIONES	107
6. OBSERVACIONES	109
7. BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	116

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Principales componentes del cemento Pórtland tipo I.	31
Tabla 2. Propiedades del humo de sílice.	35
Tabla 3. Requerimientos Químicos para el humo de Sílice.	36
Tabla 4. Clasificación del concreto de acuerdo a la velocidad de pulso ultrasónico.	41
Tabla 5. Nomenclatura asignada a las mezclas de concreto fabricadas.	50
Tabla 6. Parámetros de trabajo del equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA.	59
Tabla 7. Peso específico del cemento.	64
Tabla 8. Cantidad necesaria de cada componente para la fabricación de una probeta cilíndrica de concreto (Referencia).	69
Tabla 9. Resultados del asentamiento, medido con el cono de Abrams.	72
Tabla 10. Contenido de agua en % para las mezclas fabricadas.	76
Tabla 11. Resultados de la prueba de Porosidad efectiva, realizada a cinco muestras diferentes, cuando estaban saturadas de agua.	84
Tabla 12. Resultados de la prueba de ultrasonido para cada una de las mezclas en los días de curado evaluados.	86
Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión para las mezclas en los días de curado de curado evaluados.	93
Tabla 14. Modelos determinados para las mezclas de concreto fabricadas.	102
Tabla 15. Modelos determinados con el Software estadístico para las mezclas fabricadas.	104

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Clasificación de las adiciones minerales para el cemento.	34
Figura 2. Microestructura de la pasta de cemento	37
Figura 3. Tipos de transmisión de la Velocidad de pulso ultrasónico.	40
Figura 4. Esquema del aparato de Pulso Ultrasónico.	42
Figura 5. Esquema de la metodología para el desarrollo del trabajo de investigación.	45
Figura 6. Moldes y su preparación (engrasamiento)	52
Figura 7. Equipo de Ultrasonido de baja frecuencia CNS FARNELL PUNDIT PLUS modelo PC 1006.	
Figura 8. Preparación superficial de las probetas en los días de evaluación.	
Figura 9. Ubicación de los transductores para la medición del tiempo de vuelo.	59
Figura 10. Calibración y toma de tiempo de vuelo del haz sonoro.	60
Figura 11. Ensayo de Resistencia a la compresión.	61
Figura 12. Fractura Cónica de las probetas cilíndricas de concreto.	61
Figura 13. Ensayo de materia orgánica del agregado fino.	64
Figura 14. Proceso de fabricación de probetas cilíndricas de concreto.	70
Figura 15. Proceso para la determinación del asentamiento.	71
Figura 16. Proceso de fraguado y proceso de curado.	74
Figura 17. Porosidad abierta a la superficie de una probeta P1.	78
Figura 18. Inspección visual de la porosidad de las probetas de concreto.	79
Figura 19. Defectos encontrados en las probetas de concreto.	80

Figura 20. Observación de los poros en las probetas de concreto.	81
Figura 21. Velocidad de pulso ultrasónico vs. Tiempo de curado.	87
Figura 22. Resistencia a la compresión Vs. Tiempo de Curado.	94
Figura 23. Forma de fractura de las probetas en el ensayo de resistencia a la Compresión.	96
Figura 24. Correlación entre la V.P.U. y la R.C. para las mezclas de Humo de sílice y Escoria.	98
Figura 25. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P1 (Referencia).	99
Figura 26. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P2 (10% humo de sílice).	99
Figura 27. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P3 (10% escoria).	100
Figura 28. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P4 (10% humo de sílice-10% escoria).	100
Figura 29. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P5 (10% humo de sílice-20% escoria).	101
Figura 30. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P6 (10% humo de sílice-30% escoria).	101
Figura 31. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P7 (10% humo de sílice-40% escoria).	102
Figura 32. Gráficas de los límites de Confianza y límites de predicción.	106

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA.	116
ANEXO B. PROCESO DE MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO.	122
ANEXO C. POROSIDAD EFECTIVA.	124
ANEXO D. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.	127
ANEXO E. INSPECCIÓN VISUAL.	134
ANEXO F. DATOS PARA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.	137
ANEXO G. DATOS PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	138
ANEXO H. DATOS PARA ESTABLECER LA CORRELACIÓN DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	142
ANEXO I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON EL SOFTWARE STATGRAPHICS CENTURION XV VERSIÓN 15.2.06.	144

## GLOSARIO

**Aditivos:** son materiales distintos del agua, de los agregados y del cemento Portland, que se utiliza como componente del concreto y que se añade a éste antes o durante el proceso de mezclado con el fin de obtener o dar al concreto hidráulico características especiales ó modificar algunas de sus propiedades.

**Agregados:** son materiales inorgánicos naturales o artificiales embebidos en los aglomerados, conforman el 80-90% del peso total del concreto y son responsables de la mayor parte de las características del mismo. Los agregados son generalmente inertes y estables en sus dimensiones.

**Agregado grueso:** es el agregado cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

**Agregado fino:** consiste en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10mm.

**Cemento Portland tipo I:** es un cemento normal al que no se le exigen propiedades especiales, se produce por la adición de clinker más yeso. De uso general en todas las obras de ingeniería donde no se requiera miembros especiales. De 1 a 28 días realiza 1 al 100% de su resistencia relativa.

**Dosificación:** es un proceso por el cual se obtiene la correcta combinación de cemento, agregados, agua y aditivos. Éstos últimos se agregan con el fin de obtener concretos con determinadas especificaciones.

**Durabilidad:** el comité ACI 201 del Instituto Americano del concreto, define la durabilidad del concreto de cemento Portland, como la habilidad para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión, cualquier otro proceso, condición de servicio de las estructuras o cualquier otro proceso que produzca deterioro.

**Encofrado:** estructura de madera, acero o plástico que se utiliza para darle forma al concreto.

**Exudación:** flujo natural de una parte del agua utilizada en la mezcla de concreto.

**Fisuración:** agrietamiento del concreto por falta de un curado adecuado o mala calidad de los materiales.

**Fuga de lechada:** es una mancha blancuzca que se presenta en la superficie del concreto por exceso de agua.

**Gradación:** distribución del tamaño de las partículas del material que constituye el agregado.

**Homogeneidad:** es la cualidad que tiene un hormigón para que sus componentes se distribuyan de manera regular en toda la masa.

**Módulo de finura:** es el diámetro promedio de las partículas que hay en el material.

**Sangrado:** se denomina así a una forma de segregación en la cual una parte del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie de la mezcla de concreto y los componentes más pesados se asientan ayudados por la gravedad antes de que el concreto empiece su endurecimiento.

**Saturado y superficialmente seco (SSS):** todos los poros llenos de agua, pero sin película de humedad sobre la superficie de las partículas.

**Segregación:** es un término que se utiliza para referirse a que los agregados se separan del resto del concreto. Esto causa baja resistencia.

**Silicato de calcio hidratado (SCH):** es un compuesto importante en el concreto. Contiene cal (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>), en una proporción de 3 a 2.

**Plastificante:** es un aditivo que se emplea con el objetivo de disminuir la cantidad de agua para el amasado y obtener la docilidad y resistencia requerida para un concreto.

**Tamaño máximo nominal:** es el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal puede retener del 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

**Trabajabilidad:** facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado.

## RESUMEN

**TÍTULO: RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA CONCRETOS SIN REFUERZO ADICIONADOS CON HUMO DE SÍLICE Y ESCORIA.**

**AUTORES:** JAIMES PINZÓN, Mayra Alejandra. CARREÑO RAMÍREZ, Sandra Milena.

**PALABRAS CLAVES:** V.P.U., R.C., humo de sílice, escoria, aditivo, concreto.

### RESUMEN

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica utilizada para evaluar la resistencia a la compresión de los concretos mediante la correlación de los resultados obtenidos para V.P.U. y R.C. Se fabricaron probetas de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, con 0% adiciones, 10% humo sílice, 10% escoria y mezcla de los dos en diferentes proporciones de escoria, estas probetas se evaluaron en los días de curado 3, 7, 10, 14, 21 y 28, bajo condiciones estándar de temperatura y humedad. La adición de Humo de Sílice aumentó la V.P.U y la R.C. La adición de escoria aumenta la V.P.U pero disminuye la R.C. y el aumento de la adición de escoria genera concretos menos porosos y de menor resistencia. La V.P.U. y la R.C. aumentan con el incremento del tiempo de curado para las mezclas evaluadas.

La relación determinada para las variables estudiadas fue exponencial para todos los niveles de reemplazo del cemento, mostrando modelos con coeficientes de determinación bastante confiables. Las probetas adicionadas con 10% humo de sílice-10% escoria, son las que presentan los mejores resultados, obteniéndose concretos menos porosos, con una mayor V.P.U y R.C. en comparación con el concreto de Referencia. En general todos los concretos evaluados son de buena calidad, teniendo en cuenta el criterio de clasificación de Malhotra y tienen una resistencia a la compresión normal.

---

\* Proyecto de Grado

Facultad de Ingenierías físico-químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Director: Ph.D. Ricardo Cruz H. Codirectora: Ms.C Luz Amparo Quintero.

## ABSTRAC

**TITLE: RELATIONSHIP BETWEEN ULTRASONIC VELOCITY PULSE AND COMPRESSIVE STRENGTH FOR UNREINFORCED CONCRETE ADDED TO SILICA FUME AND SLAG.\***

**AUTHORS:** JAIMES PINZÓN, Mayra Alejandra. CARREÑO RAMÍREZ, Sandra Milena.

**KEYWORDS:** V.P.U., R.C., Silica Fume, Slag, Additive, Concrete.

### ABSTRACT

Ultrasonic pulse velocity is a technique used to evaluate the compression strength of concrete by correlating the obtained results for VPU and R.C. Concrete specimens were made of 10 cm in diameter and 20 cm tall, with 0% additions, 10% Silica Fume-10% slag and mixing both in different proportions of slag, these samples were evaluated in curing days 3, 7, 10, 14, 21 and 28, under standard conditions of temperature and humidity. The addition of silica fume increased the VPU and RC, the addition of slag increases VPU, but it decreases the RC and increasing the addition of slag produces less porous and less resistance concrete. The V.P.U. and R.C. increase with increasing cure time for the evaluated mixtures. The ratio determined for the studied variables was exponential for all cement replacement levels, showing models with fairly reliable determination coefficients. The specimens added with 10% silica fume -10% slag are those with the best results, obtaining less porous concretes with a higher VPU and RC compared to the Reference concrete.

Additionally the report contains the results of measuring the effective porosity, when the concrete specimens were saturated. Finally, it establishes the correlation between the variables of ultrasonic pulse velocity and compressive strength in the days of curing evaluated. All concrete studied were of good quality and normal resistance, except P2 record high value for resistance.

---

\* Research Work

- Faculty of physical Chemistry Engineering. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Ph.D Ricardo Cruz H. Codirectora: Ms.C Luz Amparo Quintero.

## INTRODUCCIÓN

El aumento acelerado de la demanda de concretos con excelentes propiedades mecánicas, ha conllevado a la búsqueda de adiciones que sustituyan parcialmente el cemento, que mejore una o varias de sus propiedades y ayuden al aprovechamiento de residuos industriales, con el fin de disminuir notablemente la contaminación debido a la producción del clinker.

La industria de la construcción exige altos estándares de calidad para los concretos, por lo que se debe profundizar en la investigación de métodos no destructivos de inspección que sean efectivos, confiables y que permitan un control de una manera sencilla y rápida. Uno de los métodos no destructivos más generalizados en la actualidad es el ultrasonido. Sin embargo, su aplicación requiere de entrenamiento y del conocimiento de los factores que afectan la velocidad de pulso ultrasónico.

Las adiciones químicas que se agregan de manera parcial al cemento afecta esta medida con respecto a un concreto ordinario. Estas adiciones químicas tales como el humo de sílice y la escoria siderúrgica son subproductos ó residuos de procesos industriales, que al ser agregados al cemento, modifican considerablemente una o más propiedades, tal como la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Normalmente se obtienen mayores beneficios en la fabricación de concretos adicionados con el uso de un material plastificante. En el presente trabajo, se tuvo en cuenta la influencia de estas adiciones en la velocidad de pulso ultrasónico y en la resistencia a la compresión.

La velocidad de pulso ultrasónico fue una técnica desarrollada por primera vez por Leslie y Cheesman en 1946 que permite evaluar la calidad de los concretos y se ha utilizado desde hace más de cincuenta años. Malhotra en 1985 propone un criterio de aceptación, clasificándolos de acuerdo a su calidad y basándose en la

medición del tiempo necesario para la propagación de la onda. Esta herramienta permite caracterizar el material por medio de la evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico. [1]

El comportamiento del concreto adicionado con humo de sílice y escoria, depende de factores como el tipo de cemento usado, las características físicas y químicas de dichas adiciones, el tiempo y condiciones de curado, así como de las características de los agregados. El ensayo más utilizado para determinar la calidad del concreto en estado endurecido es el ensayo de resistencia a la compresión. La incorporación de las adiciones minerales de humo de sílice y escoria siderúrgica, le representa al concreto una mejoría en algunas de sus propiedades y características. Estudios han demostrado, por ejemplo, que la capacidad potencial de incremento de la resistencia a la compresión que proporciona el humo de sílice ó llamado también microsílíce es superior a la que le proporciona la adición de escoria al concreto.

La correlación de la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión permite obtener modelos aproximados para predecir la resistencia a la compresión de los concretos, con ciertas características, basados en la velocidad de pulso ultrasónico. El estudio de los factores que afectan la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión son de suma importancia; permiten mejorar los modelos que relacionan estas dos mediciones y estimar de una manera confiable la resistencia a la compresión sin poner en riesgo el material y hace posible evitar la falla del mismo, lo cual podría conllevar a la pérdida total o parcial de las estructuras que consecuentemente pone en riesgo las vidas humanas.

# 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La industria moderna de la construcción exige concretos con buenas propiedades mecánicas y excelentes características tanto internas como externas, debido a su acelerado avance de la infraestructura, por este motivo se han buscado alternativas para mejorar los costos de producción obteniendo también un buen desempeño del material. Las adiciones como el humo de sílice y la escoria siderúrgica ofrecen al concreto la posibilidad de reducir el consumo de cemento y una disminución en la porosidad debido a que actúan como relleno.

El humo de sílice se utiliza especialmente para producir concretos de alto desempeño y la adición de escoria es utilizada principalmente para reemplazar de forma parcial al cemento, este último, componente fundamental para la fabricación de concretos. El reemplazo del cemento de forma parcial resulta en una menor producción del mismo debido a la disminución en su demanda, lo cual influye positivamente en el impacto ambiental, en el ahorro de energía y en la reutilización de residuos sólidos, que hasta hace unas décadas eran arrojados sin ninguna precaución, afectando la vida, los suelos, el agua y el aire.

La velocidad de pulso ultrasónico es un método no destructivo que permite la valoración de los concretos normales y adicionados, permite evaluar su calidad, sus características y condiciones para un posible servicio. Sin embargo ésta medición no determina su resistencia en estado endurecido, por tal razón, además de las pruebas no destructivas, se deben realizar ensayos de resistencia a la compresión.

Se han hecho pocos estudios sobre la relación existente entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto cuando éste

contiene una adición o mezcla de ellas, los estudios sobre el comportamiento de los concretos adicionados con mezclas de adiciones minerales como el humo de sílice y la escoria siderúrgica, es un tema que ha recibido muy poca atención.

Esta investigación pretendía responder a los siguientes interrogantes: ¿Cómo influye las adiciones al concreto de humo de sílice, escoria y mezcla de ambas en la velocidad de pulso ultrasónico y en la resistencia a la compresión?, ¿Cómo es la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para concretos adicionados con humo de sílice, escoria y mezcla de ambas en diferentes proporciones, manteniendo el humo de sílice constante?

Para evaluar la relación existente entre éstas dos variables, se realizaron mediciones de la velocidad de pulso ultrasónico y de la resistencia a la compresión en los días de curado 3, 7, 10, 14, 21 y 28 para diferentes porcentajes de adiciones de humo de sílice, escoria y mezcla de ambas en el concreto. Posteriormente se hará la correlación de los resultados derivados tanto de la prueba destructiva como de la no destructiva. Se pretende determinar la relación existente entre dos variables para poder predecir la resistencia a la compresión basándose en un modelo, con el cual es posible evaluar un concreto de las características señaladas para la correlación y determinar la resistencia a la compresión de manera aproximada.

Es necesario realizar este análisis con las diferentes proporciones de adiciones para evaluar la influencia que tiene la adición de un porcentaje de humo de sílice y un porcentaje de escoria en la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, así mismo la influencia que tiene la mezcla de estas dos adiciones, manteniendo el humo de sílice y aumentando la escoria siderúrgica. De los resultados que muestre esta investigación, se establecerá la factibilidad del uso de estas adiciones o mezcla de adiciones y en qué proporción.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

El ensayo más difundido para la evaluación de la calidad del concreto, sin duda ha sido la resistencia a la compresión. Sin embargo, se pueden obtener Resistencias aproximadas para cierta dosificación y características del concreto sin que se ponga en riesgo el material, esto se hace empleando otro ensayo que no requiera de su destrucción, este ensayo no destructivo es la velocidad de pulso ultrasónico.

Esta investigación proporciona información acerca del comportamiento de los concretos adicionados con humo de sílice, escoria y mezcla de las dos en las proporciones establecidas en este trabajo. Estas adiciones tienen como fin principal reemplazar el cemento y se estudió su comportamiento respecto al concreto de referencia ó que no contiene adiciones. Si al reemplazar parcialmente el cemento, se determinó que se tiene la misma o mejores resistencias que un concreto ordinario y además se disminuye la porosidad, existe la posibilidad de utilizarlos para la fabricación de estructuras que requieran cierta resistencia a la compresión y que además necesiten de una baja permeabilidad.

## 1.3 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, el concreto adicionado y sus propiedades han sido objeto de diversos estudios. En el Departamento de Ingeniería Civil de la universidad de Ataturk (Turquía), en el año 2003 se realizó una investigación sobre la influencia de las diferentes condiciones de curado sobre las propiedades físicas y químicas de los concretos con mezclas de humo de sílice y escoria de alto horno<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> TURKMEN, Ibrahim. Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag. Ataturk University. Department of Civil Engineering. 2003.

En la investigación mencionada anteriormente, se evaluó la velocidad de pulso ultrasónico para probetas de concreto, adicionadas de manera separada con humo de sílice y escoria de alto horno y variando el porcentaje. Los resultados mostraron un incremento en la resistencia a compresión para mayores adiciones de humo de sílice y una disminución de la misma para los concretos adicionados con escoria. Adicionalmente, el estudio mostró la influencia que tiene las condiciones de curado especialmente en soluciones clorurantes y sulfatantes, demostrando que al modificar la composición de la pasta de cemento agregando humo de sílice y escoria de alto horno en el concreto, se aumenta la resistencia del concreto a la agresión de estas sustancias, gracias a que disminuye la porosidad.

En el 2004, en la misma Universidad en Turquía, se realizó un estudio sobre la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para altos volúmenes de mezclas de mineral en el concreto.<sup>2</sup> En este trabajo, se demostró que la adición de escoria de alto horno, mayores al 50% en el concreto disminuye la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión con respecto a los concretos sin ningún porcentaje de adición de escoria. Posteriormente establece una relación entre estas dos variables estudiadas.

Otras investigaciones relacionadas con adiciones al cemento se han realizado en la Universidad Industrial de Santander. Tal es el caso del trabajo titulado: *“Hormigones de alta resistencia con adición de humo de sílice”*<sup>3</sup>, realizado por estudiantes de la escuela de ingeniería Civil en el año de 1.998, en donde se estudió la influencia en la resistencia a la compresión del concreto adicionado con dos marcas diferentes de humo de sílice. En todos los casos de reemplazo del

---

<sup>2</sup> DEMIRBOGA, Ramazan, TURKMEN, Ibrahim y KARAKOC, Mehmen. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. Ataturk University. Department of Civil engineering. 2004.

<sup>3</sup> MIRANDA, Gisela y GRIMALDOS, Gabriel. Hormigones de alta resistencia con adición de humo de sílice. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. 1998.

cemento se observó un incremento significativo de la resistencia a la compresión. Sin embargo, en este estudio no se contempla la aplicación de pruebas de velocidad de pulso ultrasónico.

Estudios previos han demostrado que el uso del humo de sílice para la fabricación del concreto, mejora significativamente la resistencia a la compresión.<sup>4</sup> Por el contrario, en algunos casos y dependiendo de las propiedades de la escoria, se disminuye de manera importante la resistencia a la compresión. Sin embargo, la influencia de esta adición en la velocidad de pulso ultrasónico, se ha estudiado muy poco, especialmente si está mezclada con otras adiciones.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

- Evaluar la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo adicionado con humo de sílice y escoria siderúrgica, curado bajo condiciones estándar.

### **1.4.2 Específicos**

- Determinar el efecto de la adición de humo de sílice y escoria siderúrgica sobre la velocidad de pulso ultrasónico del concreto sin refuerzo con relación A/C de 0.45 y curado bajo condiciones estándar.
- Evaluar la influencia de la adición de humo de sílice y escoria siderúrgica sobre la resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo con relación A/C de 0.45 y curado bajo condiciones estándar.

---

<sup>4</sup> DEMIRBOGA, Ramazan, TURKMEN, Ibrahim y KARAKOC, Mehmen. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. Ataturk University. Department of Civil engineering. 2004.

- Valorar el efecto del tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para cada una de las mezclas de concreto fabricadas.
- Establecer la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión con los resultados obtenidos para las diferentes mezclas de concreto estudiadas.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 COMPONENTES DEL CONCRETO

Los componentes básicos del concreto son cemento, agua, aire y agregados (finos y gruesos). Al concreto se le puede agregar aditivos de manera intencional, con el fin de modificar algunas de sus propiedades. [2] Se puede añadir aditivos y adiciones a la mezcla además de los componentes antes mencionados, los cuales se agregan para modificar una o más propiedades en el concreto. Por ejemplo: acelerar ó retardar el fraguado, mejorar la trabajabilidad, aumentar la resistencia a la compresión, entre otras. [3]

#### 2.1.1 El cemento

La norma ASTM C 150 [4] establece una clasificación de los cementos en función de sus usos y necesidades. Esta norma define al cemento Pórtland tipo I como un cemento de uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento y al que no se le exigen propiedades especiales. El cemento utilizado en la fabricación del concreto debe estar seco, suelto y sin grumos de fraguado anticipado. [5]

#### 2.1.2 El agua

El agua es el componente del concreto necesario para el proceso de hidratación.<sup>5</sup> Para la producción de concreto debe estar limpia y libre de sustancias nocivas, contaminantes, sedimentos, aceites, azúcares o químicos que pueden afectar la resistencia y el fraguado del cemento. La relación agua-cemento (A/C) es fundamental para determinar la calidad del concreto. [6]

---

<sup>5</sup> NEVILLE, A.M. Properties of Concrete. Pitman Publishing Corporation, London, 1981. Cap III.

### 2.1.2.1 Hidratación del cemento

Debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua, el cemento fragua y sufre endurecimiento. La reacción de hidratación del cemento es una reacción altamente exotérmica. [7]

En la Tabla 1 se exponen los cuatro principales componentes del cemento, que al reaccionar con el agua, dan origen a los productos hidratados: los silicatos cálcicos se transforman en silicatos cálcicos hidratados CSH e hidróxido de calcio CH, el aluminato tricálcico, el ferroaluminato tetracálcico, forman etringuita y monosulfato, respectivamente. [8]

**Tabla 1. Principales componentes del cemento Pórtland tipo I.**

Componente	Nivel de reacción	Calor liberado	Clase de cemento	Porcentaje en el cemento
Silicato Tricálcico (C3S)	Medio	Medio	Bueno	49
Silicato dicálcico (C2S)	Bajo	Pequeño	Bueno	25
Aluminato tricálcico (C3A)	Rápido	Grande	Pobre	12
Aluminoferrato tetracálcico (C4AF)	Lento	Pequeño	Pobre	8

Fuente. Colección básica del concreto. [8]

La reacción más rápida que ocurre es la hidratación del aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), el concreto tiende a volverse espeso y difícil de trabajar en cuestión de minutos, debido al calor emitido. Esto es conocido como falso fraguado. La resistencia principal del concreto es función de la hidratación de las fases silicato de calcio (C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S). Estos dos silicatos de calcio se combinan con agua para formar el silicato de calcio tipo gel hidratado, denominado C-S-H.

Debido a las reacciones de hidratación, el concreto se endurece y disminuye el volumen de la pasta, esto crea un sistema de poros capilares, que influyen directamente en la durabilidad del concreto y en otros factores como la susceptibilidad a agentes químicos agresivos. [9]

### **2.1.3 Agregados**

Los agregados son el material granulado que se agrega a la pasta de cemento y no contribuyen al endurecimiento de ésta. Componen más del 70% del material, por metro cúbico de concreto. [10]

El diseño de concretos es afectado por varios factores relacionados con los agregados: la gradación granulométrica, la esfericidad, el área superficial, angulosidad, textura, contenido de humedad, capacidad de absorción, entre otros [11]. Es recomendable utilizar agregado pétreo natural, de alta densidad, granulometría cerrada, partículas redondeadas y textura rugosa (de cara fracturada), además debe tener baja absorción y estar libre de partículas menores a 0,074 mm de diámetro (arcilla), limpio de materia vegetal (materia orgánica), y libre de partículas blandas y frágiles como mica, carbón o lignito. [12]

El agregado fino o arena debe cumplir con lo establecido en la norma ASTM C 33, este no debe contener cantidades perjudiciales de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias [13].

### **2.1.4 Aditivos**

Los aditivos se le adicionan al concreto antes o durante el mezclado con el objeto de modificar alguna de sus propiedades.

#### **2.1.4.1 Plastificantes retardantes**

Los plastificantes retardantes combinan las propiedades de los aditivos tipo A y los retardantes tipo B. A estos aditivos se les conoce como Tipo D según la norma ASTM C 494 [14] y se utilizan para lograr la reducción del agua y darle a la mezcla del concreto mayor manejabilidad y un control del tiempo de fraguado de manera simultánea. El retraso en la hidratación se debe a que el aditivo es absorbido por las partículas de cemento demorando el contacto del agua con el cemento, esto evita que la mezcla se haga rígida en el tiempo de acción del aditivo.

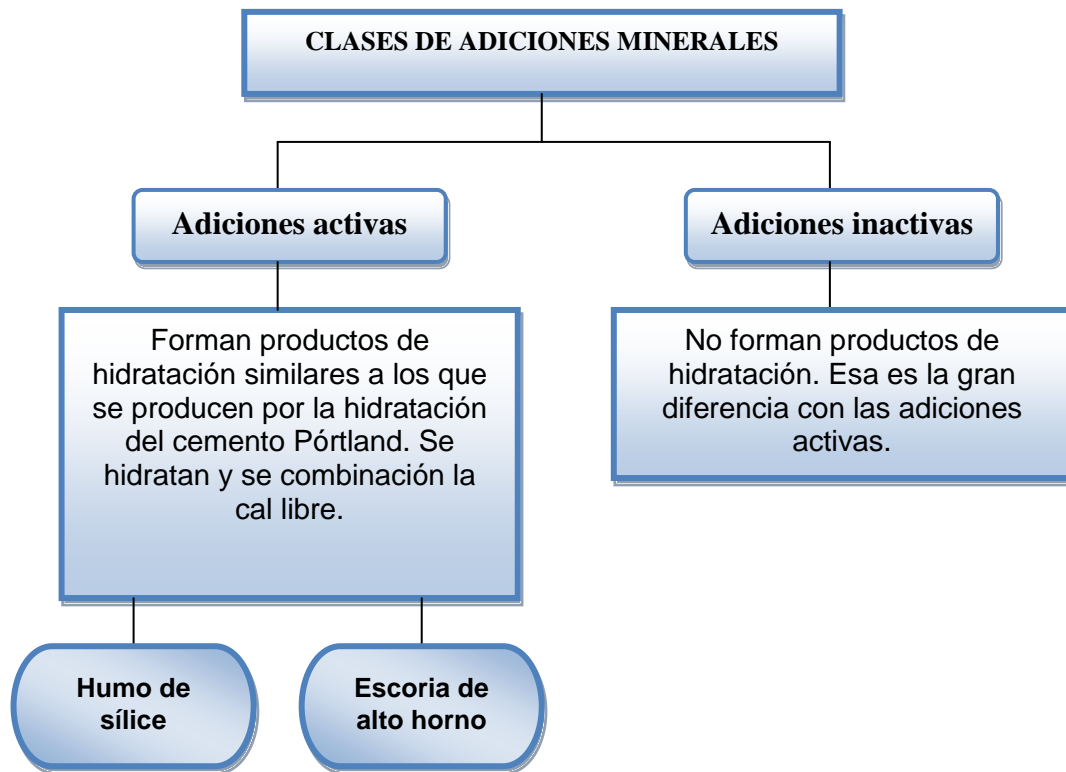
Se debe atender con especial cuidado a las especificaciones de éstos aditivos químicos en cuando a la dosificación. Si ésta supera el límite óptimo se rompe la armonía en las propiedades aglomerantes de los compuestos potenciales debido a la acción química que éste aditivo ejerce en el aluminato de calcio presente en el cemento. [15]

#### **2.1.5 Aire**

El aire en el concreto tiene el inconveniente de incluirse sin ser requerido en la mezcla. Las burbujas de aire pueden provenir de un mezclado deficiente, presentando en su acabado una forma irregular. [16]

#### **2.1.6 Adiciones minerales**

Las adiciones minerales se clasifican en dos grandes grupos: las adiciones activas y las adiciones inactivas. En la Figura 1 se representa esta clasificación y sus características principales.



**Figura 1. Clasificación de las adiciones minerales para el cemento.**

Fuente. Las autoras.

### 2.1.6.1 Humo de sílice

El humo de sílice es una sílice ( $\text{SiO}_2$ ) muy fina, no cristalina, producida en hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de aleaciones silíceas o aleaciones que contienen silicio [17]. Es un compuesto mineral, usualmente de color gris, partículas esféricas y de gran pureza (85-98% de  $\text{SiO}_2$ ), contiene porciones minoritarias de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ . Este material se utiliza como reemplazo del cemento Pórtland y adición en el concreto. [18] Las propiedades químicas y físicas del humo de sílice son importantes y de ellas depende en gran medida el comportamiento de los concretos adicionados con este material. La Tabla 2 menciona las propiedades más importantes:

**Tabla 2. Propiedades del humo de sílice.**

Propiedades químicas	Propiedades físicas
Partículas amorfas	Tamaño de partícula < 1 µm (0,1-0,2 µm)
Contenido de dióxido de silicio >85%-90%	Densidad aparente <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Como se produce: 130-430 Kg/m<sup>3</sup></li> <li>▪ Densificado: 480-720 Kg/m<sup>3</sup></li> </ul>
Otros elementos: Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, Na <sub>2</sub> O y K <sub>2</sub> O.	Gravedad específica: 2,2 Superficie específica: 20 m <sup>2</sup> /gramo

Fuente. Las autoras.

Las propiedades químicas y físicas del humo de sílice, más importantes son:

- **Partículas amorfas:** el humo de sílice es un material no cristalino por lo tanto se disolverá en el concreto.
- **Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>):** Es el material reactivo del humo de sílice.
- **Otros elementos:** Dependen del metal que se produce en la fundición de donde es recogido el humo de sílice. Estos elementos no tienen influencia en el comportamiento del humo de sílice utilizado en concretos.
- **Tamaño de partículas:** la mayor parte de las partículas son menores a un micrómetro.
- **Densidad aparente:** depende del metal que se funde en el horno y del funcionamiento de éste último.
- **Gravedad específica:** tiene una gravedad específica menor que la del cemento Pórtland.
- **Superficie específica:** la superficie específica del humo de sílice es grande debido a que sus partículas son muy pequeñas. (15-30m<sup>2</sup>/g).

El humo de sílice le confiere propiedades muy importantes al concreto. La función del humo de sílice es doble: actuar como puzolana y como relleno o "filler". La velocidad de reacción del humo de sílice es mayor que las puzolanas naturales

debido a que al combinarse con la cal libre, permite una distribución más uniforme de los productos hidratados.[19]

La utilización del humo de sílice en concretos se basa en las especificaciones y exigencias dadas por la norma ASTM C 1240 [20], en la cual se establece los requerimientos que son resumidos en la Tabla 3.

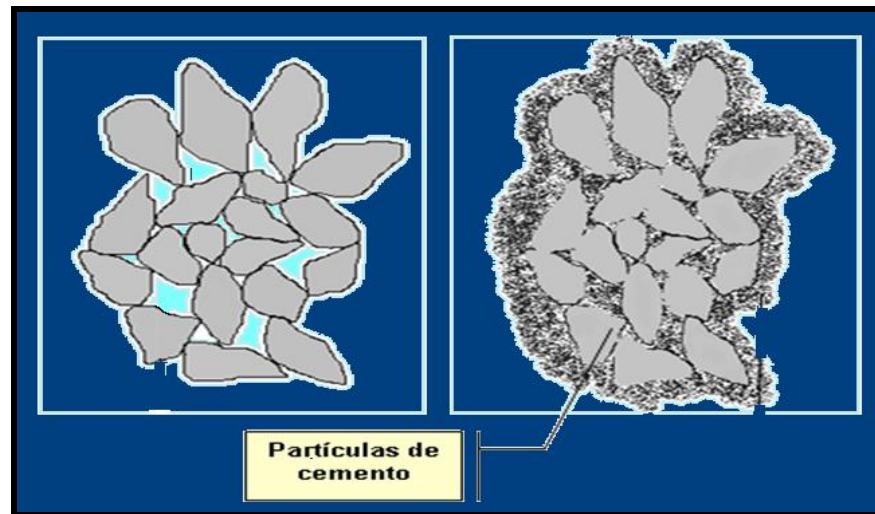
**Tabla 3. Requerimientos Químicos para el humo de Sílice.**

<b>REQUERIMIENTOS QUÍMICOS</b>	<b>%</b>
<b>Mínimo porcentaje de SiO<sub>2</sub></b>	<b>85</b>
<b>Máximo contenido de humedad</b>	<b>3</b>
<b>Máxima pérdida en la ignición</b>	<b>6</b>
<b>Cloruros</b>	<b>&lt; 0,10</b>
<b>Pérdida al fuego</b>	<b>&lt; 5</b>
<b>Índice de actividad</b>	<b>&gt; 100</b>

Fuente. Norma ASTM C1240 [20]

- **Efectos del humo de sílice en el concreto [19]**
  1. Incrementa la resistencia a la compresión
  2. Reduce la permeabilidad.
  3. Mayor cohesión y menor segregación.
  4. Reduce la exudación.
  5. Asentamiento: La adición de humo de sílice, disminuye el asentamiento.

En la Figura 2 se muestra la microestructura de un concreto sin humo de sílice y con humo de sílice. Las partículas de humo de sílice siendo mucho más pequeñas que las partículas de cemento y de agregados, ocupan los espacios que quedan entre los agregados, las partículas de cemento y las burbujas de aire atrapadas en el concreto.



a) Concreto sin Humo de Sílice b) Concreto con humo de sílice.

**Figura 2. Microestructura de la pasta de cemento**

Fuente. Las autoras.

- **Influencia de la adición de humo de sílice al concreto en la resistencia a la compresión.**

Los concretos adicionados con humo de sílice mayor a 5% presentan un incremento en la resistencia a la compresión como se ha demostrado en diversos estudios. [21] En algunos casos, se han registrado incrementos del 50% de la resistencia desde el día 3 hasta el día 28, obteniendo en este último su máxima resistencia. También se han demostrado incrementos del 70% desde el día 7 hasta el día 28. En algunos casos, los concretos con humo de sílice desarrollan mayores resistencias a compresión a edades menores de 28 días [21].

#### **2.1.6.2 Escoria siderúrgica**

La escoria siderúrgica es un subproducto no metálico que se obtiene en estado de fundido y contiene esencialmente silicatos y alumino-silicatos de calcio, provenientes del proceso de la reducción de los minerales de hierro hasta el hierro metálico [22].

La constitución química de la escoria es similar a la del clinker, pero sus proporciones varían de acuerdo a los componentes que se introducen en el horno. Las propiedades del concreto más importantes debido a la adición de escoria se mencionan a continuación [22]:

- ✓ **Asentamiento:** Tiene un efecto benéfico sobre la manejabilidad del concreto, debido a que se crean planos suaves y lisos en la pasta.
  - ✓ **Trabajabilidad:** se mejora debido al incremento a la cohesividad de la pasta, fluidez y dispersión de las partículas.
  - ✓ **Exudación:** Si la escoria es más gruesa que el cemento la exudación aumentará.
  - ✓ **Fraguado:** se retarda el tiempo de fraguado.
  - ✓ **Resistencia a la compresión:** Esta propiedad que se desarrolla en estado endurecido. Se evidencia el desarrollo de resistencias de manera más lenta que los concretos normales. Los concretos adicionados con escoria suelen ser muy sensibles a las condiciones de curado.
- 
- **Influencia de la adición de la escoria al concreto en la resistencia a la compresión.**

Para conseguir resultados significativos en las pruebas de resistencia a la compresión, el curado para las probetas, especialmente las adicionadas con escoria siderúrgica debe ser mínimo de 7 días. [23]

## **2.2 FRAGUADO DEL CONCRETO**

Se refiere a la velocidad de cambio del estado plástico al estado endurecido del concreto y es medido en función del tiempo. Hay que diferenciar el fraguado y el endurecimiento, debido a que ésta diferencia marca el límite de tiempo para iniciar

el curado con agua. La mayoría de las especificaciones exigen que para el fraguado del concreto, la temperatura esté por debajo de 32 °C. [24]

### **2.3 CURADO POR INUNDACIÓN Ó INMERSIÓN DEL CONCRETO**

La inmersión total en agua de las probetas terminadas de concreto, es el procedimiento ideal para mantener el concreto saturado o tan saturado como sea posible, de manera que se promueva la hidratación de materiales cementantes, debido a que la velocidad máxima de hidratación se presenta en condiciones de saturación; es decir, con los capilares llenos de agua. Si el curado húmedo es continuo, la resistencia posterior es mayor. [25]

Los concretos elaborados con cemento Pórtland tipo I en climas con temperaturas ambientales superiores a los 4 °C, el curado húmedo deberá cubrir un período mínimo de 7 días o el tiempo necesario para llegar al 70% de la resistencia a la compresión especificada. [26]

### **2.4 POROSIDAD DEL CONCRETO**

Las adiciones de mezclas minerales como el humo de sílice y escoria ayudan a disminuir la porosidad abierta a la superficie, permitiendo obtener concretos más densos.

### **2.5 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

#### **2.5.1 Inspección visual**

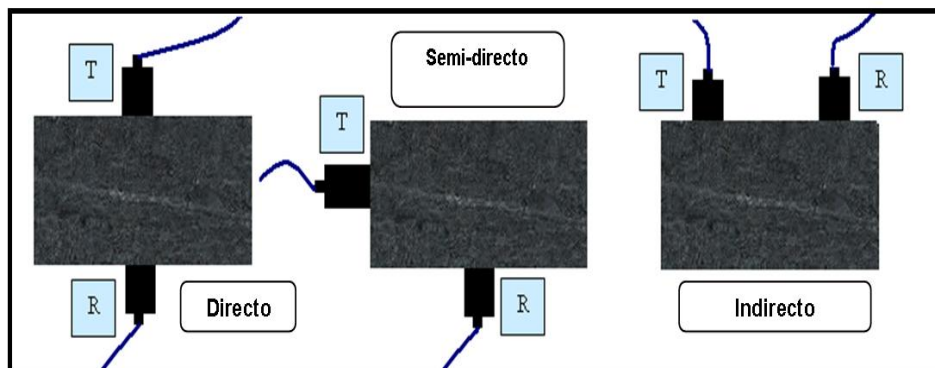
El ensayo de Inspección visual es no destructivo y es el primer paso para la evaluación del concreto, su mayor ventaja es que no requiere un equipo especializado. Una observación minuciosa y detallada del material, puede dar

información acerca de los defectos presentes en el concreto y permite identificar daños que pueden llegar a afectar la lectura del equipo de ultrasonido y el ensayo de resistencia a la compresión.

### 2.5.2 Velocidad de pulso ultrasónico

El ultrasonido se caracteriza por tener longitudes de onda cortas y alta frecuencia, este ensayo consiste en medir la velocidad de transmisión de una onda de pulso ultrasónico a través de la masa de concreto. La prueba se efectúa considerando la norma ASTM C 597 [27].

Para generar dichas ondas ultrasónicas, se utiliza un transductor piezoeléctrico que se encuentra insertado en un alojamiento a prueba de agua, facilitando la conexión a un generador ó transmisor-receptor de pulsos. El transductor convierte las señales eléctricas en señales sonoras y viceversa. [28] Para realizar mediciones de pulso ultrasónico se puede situar los transductores ó palpadores de varias maneras como se evidencia en la Figura 3 [27]. El método de transmisión directa es el más conveniente y de mayor sensibilidad, los resultados suelen ser satisfactorios debido a que la máxima energía de pulso es transmitida y recibida directamente.



**Figura 3. Tipos de transmisión de la Velocidad de pulso ultrasónico.**

Fuente. Las autoras.

Para la evaluación de la calidad del concreto Mohan Malhotra estableció un criterio de aceptación para los concretos en base a la medición de la velocidad de pulso ultrasónico [29]. Esta clasificación se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Clasificación del concreto de acuerdo a la velocidad de pulso ultrasónico.**

Velocidad de la onda longitudinal (m/s)	Condición del hormigón
V > 4575	Excelente
4575-3660	Bueno
3660-3050	Cuestionable
3050-2135	Pobre
V < 2135	Muy pobre

Fuente. SOLÍS, R. MORENO, E. & R, William [29]

### 2.5.2.1 Factores que influyen en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico

Algunos factores pueden afectar la medición de la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto y se deben tener en cuenta para obtener resultados reproducibles y que solamente dependan de las propiedades del concreto, estos factores son [30]:

- Contenido de humedad
- Temperatura del concreto
- Forma y tamaño del espécimen
- Tipo de cemento y relación agua-cemento (A/C)
- Proceso de curado

### 2.5.2.2 Principio de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico

Según lo establecido en la norma ASTM C 597 [27], la técnica de Velocidad de Pulso Ultrasónico VPU, consiste en determinar el tiempo que demora una onda de pulso ultrasónico en atravesar cierta longitud de concreto, ya conocida. De esta manera se divide esta trayectoria o longitud por el tiempo que tarda en recorrerla. (Ver Ecuación 1)

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Donde:

$V$  = velocidad de pulso ultrasónico

$L$  = Longitud o distancia

$t$  = Tiempo que tarda en atravesar la longitud del espécimen de concreto.

En la Figura 4 se muestra un esquema del equipo de pulso ultrasónico basado en la norma ASTM C 597 [27].

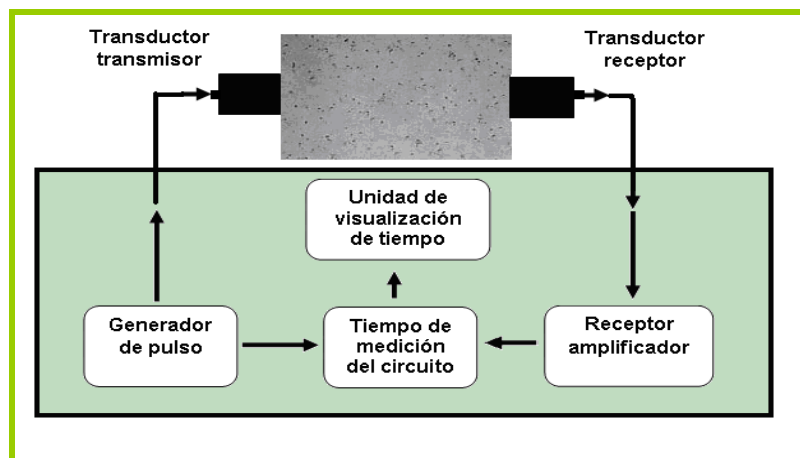


Figura 4. Esquema del aparato de Pulso Ultrasónico.

Fuente. ASTM C 597. [27]

El equipo consiste esencialmente de un generador de pulso eléctrico, un par de transductores, un amplificador y un dispositivo de cronometraje electrónico para la medición del tiempo que transcurre entre la generación del pulso que es transmitido por el transductor-transmisor hasta su llegada al transductor-receptor, que recibe este pulso [31].

## 2.6 ENSAYO DESTRUCTIVO

### 2.6.1 Resistencia a la compresión

La resistencia de la pasta de cemento es función de la relación agua-cemento (A/C), de la microestructura que se desarrolla durante el proceso de hidratación, de las características físicas y químicas del cemento, de la temperatura a la que ocurre la hidratación y del contenido de aire en la mezcla.

Se considera que un concreto tiene resistencia normal cuando ésta no supera los 42 MPa (420 Kg/cm<sup>2</sup>). Un concreto es de alta resistencia, cuando a los 28, 56 o 90 días, según el caso, se obtienen resistencias a la compresión mayores a 42 MPa (420 Kg/cm<sup>2</sup>). La resistencia de los concretos de alto desempeño, generalmente está comprendida entre 56 MPa (560 Kg/cm<sup>2</sup>) y 63 MPa (630 Kg/cm<sup>2</sup>). Normalmente la resistencia a la compresión de un concreto se mide a los 28 días de curado y se determina en probetas cilíndricas estandarizadas a las cuales se les aplica cargas relativamente rápidas. [32] La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga aplicada por el área de la sección de la probeta cilíndrica (Ver Ecuación 2):

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Donde:

$P$  = Carga axial aplicada al cilindro en Kg-Fuerza

$A$  = Área del cilindro en  $\text{cm}^2$

$H/D = 2$

En los cilindros de concreto se debe cumplir una relación de altura-diámetro igual a 2. [33]

Se ha demostrado que el curado en húmedo causa mayores resistencias que el curado en aire, debido a que en aire no hay condiciones de saturación que permitan que las reacciones de hidratación se completen. [34]

### 3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se planteó una metodología que consta de cinco fases principales como se expone en la Figura 5: Revisión y recolección bibliográfica, Proceso de fabricación del concreto, Ensayos experimentales, Resultados, y por último la realización del Informe final.

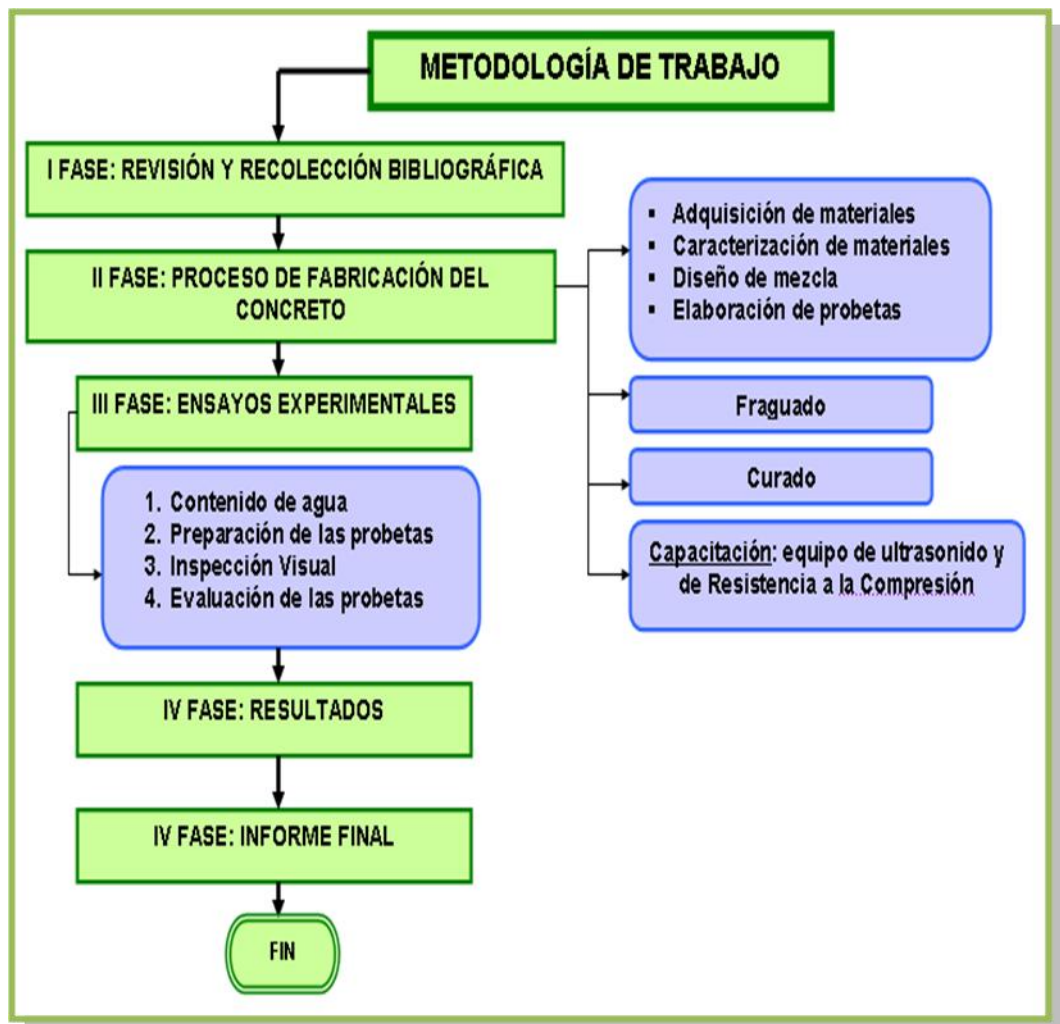


Figura 5. Esquema de la metodología para el desarrollo del trabajo de investigación.

Fuente. Las autoras.

### **3.1 I FASE: REVISIÓN Y RECOLECCIÓN BIBLIOGRÁFICA**

La recolección y selección de información se hizo durante todo el desarrollo de la investigación, en esta fase del trabajo se realizó una minuciosa revisión bibliográfica, se recopilaron normas, artículos y documentos relacionados con el concreto normal y con adiciones minerales, sus propiedades, características, aditivos, humo de sílice, escoria siderúrgica, tamaño y tipo de agregados, fraguado, tiempo de curado, la aplicación en concretos de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (V.P.U.) y el ensayo destructivo conocido como resistencia a la compresión.

### **3.2 II FASE: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO**

Esta fase comprende todo el proceso para la fabricación del concreto hasta el fraguado y curado. Una vez terminada esta fase, se procedió a la fase de ensayos experimentales.

El desarrollo de esta fase se llevó a cabo a través de cuatro etapas: adquisición de materiales, caracterización de materiales, diseño de mezclas, elaboración de probetas, medición del asentamiento, fraguado y curado. Todas estas actividades se adelantaron en el Centro de Caracterización de materiales de la Escuela de Ingeniería Civil.

#### **3.2.1 I Etapa: Adquisición de materiales**

Consistió en la obtención de los materiales necesarios para la elaboración de las probetas cilíndricas de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Estos materiales son: el humo de sílice (adición 1), escoria siderúrgica (adición 2) y cemento Pórtland tipo I. Los agregados (finos y gruesos) fueron proporcionados

por el Grupo de Investigación INME de la Escuela de Ingeniería Civil, perteneciente a la Universidad Industrial de Santander (UIS).

El agua potable se tomó de los laboratorios del Centro de Caracterización de materiales ubicados en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la UIS.

### **3.2.2 II Etapa: Caracterización de materiales**

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvo en cuenta como materia prima para la fabricación del concreto: cemento Pórtland tipo I, agregado grueso, agregado fino, agua, humo de sílice, escoria y aditivo plastificante.

La caracterización de la escoria (adición 2) fue realizada por el Centro de Desarrollo Productivo de Joyería-CDPJ, en el laboratorio de Fluorescencia de rayos-x. El análisis y caracterización de los agregados se adelantaron en el Centro de Caracterización de materiales, mencionado anteriormente, en la Etapa I.

Las características de los materiales necesarios para la fabricación de las mezclas de concreto tales como: cemento Pórtland tipo I, agua potable, plastificante y las adiciones (humo de sílice y escoria siderúrgica) se presentan en el capítulo 4. A continuación se indican algunas particularidades de esta caracterización.

#### **3.2.2.1 Cemento**

El cemento utilizado fue Pórtland tipo I, que según la norma NTC 30 [35] es un cemento de uso general y fraguado normal. Se utilizó este cemento cumpliendo con las especificaciones establecidas en las normas NTC 121 [36] y NTC 321 [37]. Se determinó el peso específico del cemento que se utilizó, de acuerdo con la norma NTC 221 [38].

### **3.2.2.2 Agregado grueso**

El agregado grueso es proveniente del municipio de pescadero en el departamento de Santander. La clasificación por tamaños se llevó a cabo utilizando el juego de tamices: 1",  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y 4". El tamaño máximo del agregado grueso seleccionado fue de  $\frac{3}{4}$ ".

Se determinó la gravedad específica según la norma NTC 176 [39], el porcentaje de absorción (ASTM C 127 [40]), la masa unitaria suelta y masa unitaria compactada (NTC 92 [41]), y el porcentaje de vacíos (ASTM C 29 [42]). El tamaño máximo se determinó con base a lo establecido en la norma NTC 77 [43].

### **3.2.2.3 Agregado fino**

Se determinó mediante ensayos experimentales, la gravedad específica o peso específico según lo establecido en la norma NTC 237 [44], el porcentaje de vacíos (ASTM C 29 [40]), el porcentaje de absorción (ASTM C 128 [45]) y análisis granulométrico, basado en las normas: NTC 77 [43], NTC 78 [46], ASTM C 136 [47]. Se determinó la materia orgánica presente según lo determina la norma NTC 127 [48].

Para la clasificación granulométrica o por tamaños se utilizó la serie de tamices: 4, 8, 16, 30, 50 y 100. El material retenido en cada tamiz fue pesado en una balanza analítica. Con estos pesos se obtuvo un análisis granulométrico y los resultados se muestran en el siguiente capítulo.

### **3.2.2.4 Agua**

Se utilizó agua potable proveniente del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). El análisis fisicoquímico y microbiológico del agua suministrada por esta

Empresa cumple con los requerimientos establecidos en la norma NTC 3459 [49]. Este análisis se muestra con mayor detalle en el capítulo 4.

#### **3.2.2.5 Humo de sílice (adición 1)**

Las especificaciones químicas del humo de sílice deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C 1240 [20]. La información de las propiedades químicas y físicas del humo de sílice utilizado fue consultada en la página Web: [www.toxement.com](http://www.toxement.com) [50] de la Empresa Toxement y se presentan en el capítulo de resultados.

#### **3.2.2.6 Escoria (adición 2)**

La adición 2 corresponde a una escoria de alto horno que se pasó por un tamiz N° 4 antes de ser agregada a las mezclas de concreto, con el fin de que las partículas de escoria estuvieran más sueltas y evitar que se incorporaran a la mezcla inclusiones grandes de metal y aglomeraciones de escoria. No se le realizó ningún proceso de molienda o trituración. Esta escoria fue suministrada por la Empresa Acerías Paz del Río. La composición química de esta escoria es mostrada detalladamente en la Tabla 6 del anexo D.

#### **3.2.2.7 Aditivo Plastificante retardante del fraguado**

El aditivo Plastificante utilizado fue suministrado por el Grupo de Investigación INME de la Escuela de Ingeniería Civil. Las características químicas y físicas de este material fueron tomadas de la página Web: [www.sika.com](http://www.sika.com) [51] de la empresa SIKA y su dosificación en las mezclas de concreto se hizo con base en lo establecido en la ficha técnica de éste aditivo y en la norma ASTM C 1017 [52].

### 3.2.3 III Etapa: Diseño de la mezcla

Una vez se realizó la caracterización de los materiales se dio inicio a la etapa correspondiente al diseño de la mezcla para una relación de agua-cemento (A/C) de 0.45 y con un tamaño máximo de agregado grueso de  $\frac{3}{4}$ " y módulo de finura de 2.4 para el agregado fino. El diseño de mezcla se hizo siguiendo la guía metodológica del laboratorio de caracterización de materiales para la construcción, basada en el método ACI (American Concrete Institute) para la fabricación de mezclas de concreto.

Los detalles referentes al diseño de mezcla se muestran en el Anexo A. La dosificación de las mezclas de concreto, se muestran en el Capítulo de Resultados y en la Tabla 4 en el anexo A. Las probetas de concreto adicionadas con humo de sílice y escoria siderúrgica se fabricaron teniendo en cuenta el mismo diseño de mezcla que para las probetas de referencia (0% adiciones), pero reemplazando parcialmente el cemento. En total fueron 7 mezclas y en la Tabla 5, se muestra la nomenclatura que se le ha asignado a cada una.

**Tabla 5. Nomenclatura asignada a las mezclas de concreto fabricadas.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Composición</b>
P1: Referencia	Referencia ó 0% de adiciones
P2: 10% humo de sílice	10% humo de sílice
P3: 10% escoria	10% escoria
P4: 10% humo de sílice-10% escoria	10% humo de sílice-10% escoria
P5: 10% humo de sílice-20% escoria	10% humo de sílice-20% escoria
P6: 10% humo de sílice-30% escoria	10% humo de sílice-30% escoria
P7: 10% humo de sílice-40% escoria	10% humo de sílice-40% escoria

**Fuente. Las autoras.**

Se hicieron algunos ensayos preliminares, que consistieron en la fabricación de 20 probetas cilíndricas de concreto con 0% de adición, con el objetivo de adquirir la destreza necesaria para la fabricación de las probetas cilíndricas posteriores y reducir de manera significativa, los errores en el procedimiento de fabricación de las probetas de concreto.

Para la elaboración de las probetas se utilizaron moldes plásticos prefabricados, los cuales permiten un dimensionamiento uniforme de las probetas cilíndricas de concreto. Se fabricaron 24 probetas de cada mezcla. En total fueron fabricadas 186 probetas de concreto, 168 inicialmente y 17 más que fueron necesarias para garantizar la confiabilidad del ensayo de resistencia a la compresión. Se fabricaron estas probetas con base en el diseño de mezcla y de acuerdo a lo que indica la norma NTC 1377 [52].

#### **3.2.4 IV Etapa: Elaboración de las probetas**

Se fabricaron cuatro probetas para cada mezcla y para cada día de evaluación. Una de ellas se descartó en la etapa de Inspección Visual. Todas las mezclas tenían una relación agua-cemento (A/C) de 0.45, un tamaño máximo de agregado de  $\frac{3}{4}$ " y módulo de finura de 2,4.

Las dimensiones de los moldes de pasta utilizados son de  $10.0 \pm 0.5$  cm de diámetro y  $20.0 \pm 0.5$  cm de largo, con un volumen total de  $1.76 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  (Figura 6-a). Antes de preparar cada mezcla se lavaron y se secaron los moldes. Posteriormente, con ayuda de una brocha se humedeció la superficie interior del molde con ACPM (aceite comprimido para motor) con el fin de lubricar la superficie del molde y evitar que la mezcla de concreto quedara adherida a las paredes del molde cuando ésta se secase y así facilitar la etapa de desencofrado logrando que no se afectara las superficies de las probetas cilíndricas (Figura 6-b).



a. Dimensiones de los moldes.

b. Preparación y engrasamiento.

### Figura 6. Moldes y su preparación (engrasamiento)

Fuente. Las autoras.

Siguiendo el procedimiento que establece la norma NTC 1377 [53] para la elaboración y curado de las probetas de concreto, se pesaron los materiales para la fabricación de las mezclas de concreto en una balanza analítica con una precisión de  $\pm 0,001$  Kg, según la dosificación correspondiente. Los cálculos para dicha dosificación se presentan en el anexo A (Tabla 4). Los materiales líquidos, tal como el agua y el aditivo plastificante se midieron por volumen. El agua se midió con una probeta graduada y el plastificante líquido se midió con una micropipeta graduada, debido a que se requería un volumen muy pequeño del mismo.

Las probetas cilíndricas de concreto se fabricaron mezclando los materiales mencionados anteriormente; primero los materiales finos como el cemento, la arena (agregado fino), la adición o las adiciones en el caso del reemplazo parcial del cemento. Posteriormente se incorpora el agregado grueso y finalmente el agua y el plastificante. Este último se mezcló primero con un volumen de agua, antes de agregarlo a la mezcla de materiales sólidos. El aditivo plastificante utilizado, es un material miscible en el agua, lo que permitió una buena disolución y homogeneidad.

Esta mezcla preliminar de los dos líquidos se hizo con el fin de garantizar una distribución uniforme de plastificante en la mezcla y de evitar los grumos o masas de material. El plastificante fue mezclado con la última fracción de agua agregada a la mezcla. Se consideró que el proceso de mezclado fue de gran importancia, este se hizo de manera rápida, procurando siempre que todos los materiales que conformaban la mezcla se incorporaran, para garantizar la homogeneidad de la mezcla y una buena consistencia de las probetas de concreto.

Cuando la mezcla de concreto estaba lista, se procedió a llenar los moldes en tres capas iguales y proporcionando en cada capa 25 golpes distribuidos uniformemente con una varilla compactadora de 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud, como lo establece la norma NTC 1377 [53]. Una vez dados los 25 golpes en cada capa, antes de continuar con el llenado de la siguiente capa, se le proporcionaron unos golpes laterales con un martillo de goma con el objetivo de eliminar burbujas de aire y llenar los espacios vacíos existentes entre los agregados. En la figura 1 del anexo A, se hace una ilustración del procedimiento descrito anteriormente para la fundición de las probetas cilíndricas de concreto.

### **3.2.5 V Etapa: Medición del asentamiento**

El asentamiento se determinó con el ensayo del cono de Abrams siguiendo el procedimiento que señala la norma NTC 396 [54]. Para cada mezcla de concreto, se realizó esta prueba y se registró el asentamiento ó también llamado “slump” en centímetros. La consistencia de las mezclas de concreto se determina con el asentamiento. Un concreto puede tener una consistencia: muy seca, seca, semi-seca y fluida. La prueba de asentamiento se realizó con un cono truncado que tiene un volumen de 0,02199 m<sup>3</sup> (cono de Abrams). Las dimensiones del cono utilizado se pueden apreciar en la figura 1 del anexo B.

En el presente trabajo se registraron en total 21 valores de asentamiento, tres por cada mezcla fabricada, para calcular un valor promedio. En total se evaluó el asentamiento de las siete mezclas fabricadas. Estos valores se presentan en el capítulo 4.

### **3.2.6 VI Etapa: Fraguado**

Para las mezclas de concreto sin ningún tipo de aditivo el tiempo de fraguado normalmente es de 24 horas. El tiempo de fraguado de las probetas de concreto fabricadas para esta investigación, se retrasa aproximadamente 4 horas, de acuerdo a lo establecido en las normas ASTM C 494 [14] y NTC 1299 [55].

Lo anterior se debió al uso del aditivo ASTM tipo D (plastificante-retardante del fraguado y reductor de agua). Este material se le proporcionó al concreto con la dosificación que establece el fabricante (0.3%-0.5% de la masa del cemento o del material cementante). Se utilizó la máxima dosis permisible (0.5% del peso del cemento). Este aditivo es admisible para la temperatura a la cual se llevó a cabo el fraguado, debido a que deja de ser efectivo a muy bajas temperaturas y también a temperaturas superiores a 60° C. Una vez se completó el tiempo de fraguado se desencofraron las probetas con ayuda de un compresor de aire, con una presión de 50 PSI.<sup>6</sup>

### **3.2.7 VII Etapa: Curado**

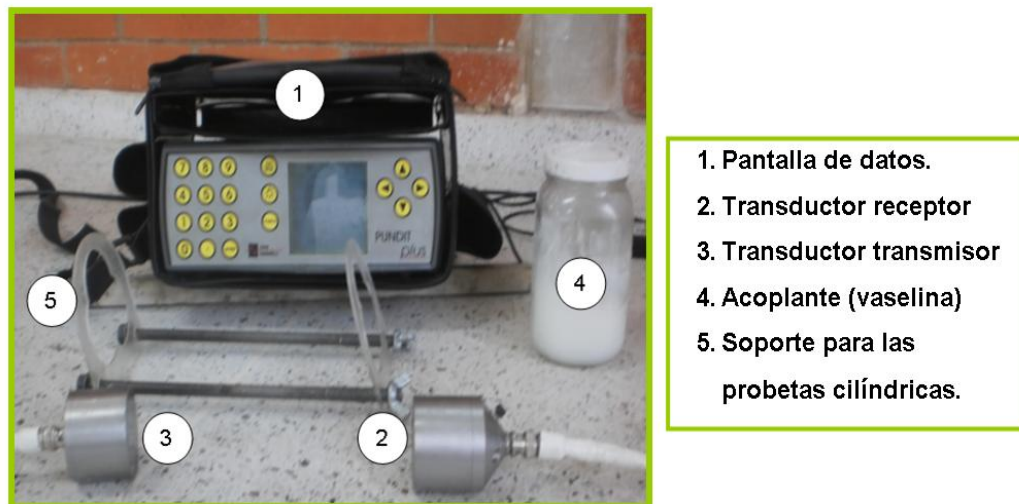
Las probetas cilíndricas fueron sometidas a curado por inmersión del 100% en agua a 23° C, durante 3, 7, 10, 14, 21 y 28 días según norma NTC 1377. [53]

---

<sup>6</sup> Presión recomendada por el fabricante

### 3.2.8 VIII Etapa: Capacitación preliminar

Para desarrollar este trabajo de investigación fue necesario un entrenamiento previo en el manejo del equipo de ultrasonido de baja frecuencia **CNS FARNELL PUNDIT PLUS, modelo PC 1006** (Ver Figura 7), con el objetivo de realizar las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico de manera adecuada, reduciendo los errores. Este equipo pertenece al Laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander.



**Figura 7. Equipo de Ultrasonido de baja frecuencia CNS FARNELL PUNDIT PLUS modelo PC 1006.**

Fuente. Las autoras.

### 3.3 III FASE. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Esta fase se subdividió en cuatro etapas: Contenido de agua, preparación de las probetas, inspección visual y evaluación de las probetas de concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión. A

continuación se presentan detalles de la metodología seguida en cada una de éstas fases.

### **3.3.1 Contenido de agua**

Se determinó el contenido de agua de cada probeta de concreto, por medio de la diferencia de peso, para cada una de las mezclas. Las probetas fabricadas se pesaron en los días de curado: 3, 7, 10, 14, 21 y 28.

Para el cálculo del contenido de agua, en cada día de evaluación se sacaron de la piscina cuatro probetas de concreto de cada mezcla, se dejaron escurrir por cinco minutos y con ayuda de un paño limpio se secó el agua superficial para lograr una superficie superficial seca (S.S.S.). Por último, se pesaron las probetas y se calculó el contenido de Agua. En el capítulo 4, se muestran éstos resultados, teniendo en cuenta que en la etapa de inspección visual se descartó una probeta por día de evaluación. Se registraron los resultados del contenido de agua, para tres probetas por día de curado evaluado. Las mismas tres probetas, fueron evaluadas posteriormente por medio de ultrasonido y resistencia a la compresión.

### **3.3.2 Preparación superficial de las probetas**

El objetivo de esta preparación era lograr una superficie nivelada, uniforme y libre de cualquier aspereza que permita un buen acoplamiento entre la superficie y los transductores y evitar que la lectura del tiempo de vuelo en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, se advirtiera afectada.

Para la preparación de la superficie se pulieron las caras transversales de las probetas cilíndricas con una piedra esmeril, piedra lija y lijas de agua nº 80 y 180 como se aprecia en la Figura 8. Finalmente, se tomó el diámetro y la altura de cada probeta utilizando un calibrador digital con  $\pm 0,001$  mm de precisión. Con

estas medidas se determinó el área transversal y la trayectoria que recorrió el pulso Ultrasónico, respectivamente.

Se tomaron 6 medidas para las caras transversales, tres por cada cara. Para la altura de las probetas o trayectoria del pulso ultrasónico, también se tomaron 6 mediciones, finalmente estos datos se promediaron.



**Figura 8. Preparación superficial de las probetas en los días de evaluación.**

Fuente. Las autoras.

### **3.3.3 Inspección visual**

Este ensayo se le realizó a cada probeta de concreto con el fin de evaluar su estado superficial y determinar si se encontraba en buenas condiciones para ser sometida a la prueba de pulso ultrasónico. Se evaluaron por inspección visual 4 probetas por cada mezcla para los días de curado: 3, 7, 10, 14, 21 y 28. Después de éste ensayo se descartó una probeta de cada cuatro. Las tres restantes fueron destinadas a las prueba de velocidad de pulso ultrasónico y a la resistencia a la compresión.

Se realizó la observación cuidadosa de la superficie de las probetas, para detectar posibles defectos tales como segregación, fisuras, sangrado, discontinuidades abiertas a la superficie, porosidad, descascaramiento ó desprendimiento de la superficie de las caras transversales. Los resultados encontrados se presentan en el próximo capítulo. Adicionalmente, se sometió a algunas probetas de concreto a pruebas de porosidad efectiva, cuando éstas ya se encontraban saturadas. Lo anterior se muestra con mayor detalle en el capítulo de resultados.

### **3.3.4 Velocidad de pulso ultrasónico (V.P.U.)**

Este ensayo no destructivo se realizó a tres probetas de cada mezcla en los días de evaluación: 3, 7, 10, 14, 21 y 28. La medición de la velocidad de pulso ultrasónico (V.P.U.), se realiza de acuerdo a la norma ASTM C 597 [27]. La medición de la velocidad de pulso ultrasónico se realizó, como ya se indicó, con el equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA. Se utilizaron transductores de 54 Khz. de frecuencia.

Con el equipo de ultrasonido mencionado anteriormente, fue posible la medición del tiempo que tarda en propagarse la onda a través de las probetas cilíndricas de concreto, con relación a la distancia que separa los transductores. Esta medición se le realizó a tres probetas de cada mezcla que fueron sometidas inicialmente a inspección visual, en los días de evaluación 3, 7, 10, 14, 21 y 28.

Se tomaron dos lecturas por cada punto seleccionado; en cada una de las dos caras. De cada punto, se tomaron dos medidas de tiempo de vuelo (Figura 9), previamente a las mediciones se realizó la respectiva calibración del equipo de ultrasonido. En la Tabla 6, se presentan los parámetros de calibración del equipo y en la Figura 10, se muestra el proceso de calibración y la medición de la velocidad de pulso ultrasónico. El procedimiento para la determinación de la velocidad de

pulso ultrasónico (VPU), se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM C 597 [27].

**Tabla 6. Parámetros de trabajo del equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA.**

PARÁMETROS GENERALES DEL EQUIPO	
Voltaje	500 v
Unidades	Métricas
Modo de pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	Apagado
Pulso de referencia	10 s
VELOCIDAD	
Distancia entre transductores	0.21 m
Límite superior	9999
Límite inferior	1
Velocidad/límite	Vel

Fuente. Las autoras.



a. Guía soporte

b. Toma de lectura del tiempo de vuelo

**Figura 9. Ubicación de los transductores para la medición del tiempo de vuelo.**

Fuente. Las autoras.



a. Calibración del equipo

b. Medición de VPU-transmisión directa

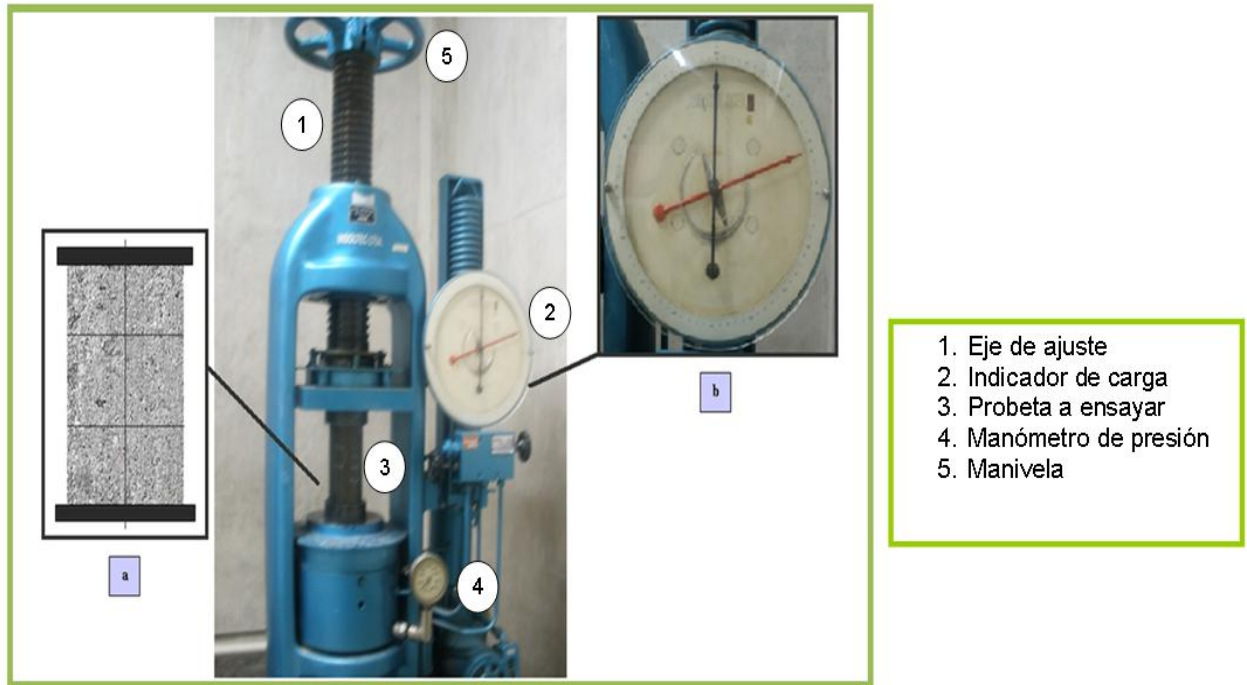
**Figura 10. Calibración y toma de tiempo de vuelo del haz sonoro.**

Fuente. Las autoras.

### 3.3.5 Resistencia a la compresión

Para la prueba de resistencia a la compresión se utilizó la máquina universal de ensayos marca TREBEL, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas. Este ensayo destructivo se realizó siguiendo la norma ASTM C 39 [56]. El primer paso consistió en medir tres veces el diámetro de cada cara para así calcular su promedio y el área sobre la cual se estaba aplicando la carga para cada probeta [56]. Como a estas probetas ya se les había realizado el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico, se debió remover la vaselina que tenían en las caras y posteriormente se llevaron a la máquina universal de ensayos.

Se acomodó cada probeta en el equipo, de manera que su eje alineara con el centro de la placa de carga. Se bajó la placa superior, accionándola manualmente hasta que se produjo el contacto. Finalmente se aplicó la carga cuidando de graduarla a una velocidad continua y uniforme hasta producir la falla del cilindro de concreto, como se aprecia en la Figura 11. Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión (R.C.) se presentan detalladamente en el Capítulo 4. El tipo de ruptura más observado fue la fractura cónica. (Ver Figura 12)



a. Probeta cilíndrica y el centro de carga a compresión b. resultado del ensayo de Resistencia a la compresión en Kg-fuerza.

**Figura 11. Ensayo de Resistencia a la compresión.**

Fuente. Las autoras.



**Figura 12. Fractura Cónica de las probetas cilíndricas de concreto.**

Fuente. Las autoras.

La resistencia a la compresión del concreto se calculó dividiendo la máxima carga soportada por la probeta de concreto cilíndrica hasta producirse la fractura, entre

el área transversal promedio. La relación altura-diámetro (H/D) de la probeta cilíndrica fue aproximadamente de 2, por este motivo no fue necesario utilizar los factores de corrección contemplados en la norma ASTM C 39 [56].

### 3.4 IV FASE: RESULTADOS

Esta fase consistió en el establecimiento de resultados, realización de cálculos, procedimientos y análisis de resultados para finalmente establecer las conclusiones y observaciones.

- **Recolección de datos:** Esta recolección se muestra en el capítulo 4 y en los anexos.
- **Realización del informe final:** A partir de las gráficas y las observaciones realizadas en el trabajo experimental, se procedió a la realización del informe escrito, resultados, análisis y conclusiones.
- **Análisis, conclusiones y observaciones:** En esta etapa se analizaron los resultados obtenidos durante la investigación y se estableció la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para cada mezcla fabricada. Se hicieron los análisis de las gráficas relacionadas con la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado en húmedo.

### 3.5 V FASE: INFORME FINAL

- **Presentación:** En esta última fase se dan las conclusiones finales y se hizo la preparación del informe final para su evaluación.

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

Este capítulo muestra los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo de investigación y el análisis de las pruebas, según se planteó en la metodología. Se presentan en su orden, los resultados del proceso de fabricación del concreto, ensayos experimentales y resultados finales del cemento

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

Los resultados obtenidos durante las actividades desarrolladas necesarias para la fabricación de las probetas de concreto, como son la caracterización de materiales, diseño de mezcla y la elaboración de probetas, se presentan como sigue.

#### **4.1.1 Caracterización de materiales**

Los resultados obtenidos del proceso de caracterización de los diferentes materiales utilizados en la fabricación del concreto se muestran a continuación.

##### **4.1.1.1 cemento**

El cemento utilizado para la fabricación de las probetas cilíndricas de concreto fue Pórtland tipo I, que cumple con las especificaciones y requerimientos físicos y químicos establecidos por las normas técnicas Colombianas para la fabricación de concretos. (Normas NTC 121 [36] y NTC 321 [37]). Se le realizó a éste cemento el ensayo para determinar su peso específico con base en la norma NTC 221 [38]. Los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla 1 del anexo D y el valor del peso específico obtenido se presenta en la Tabla 7, a continuación.

**Tabla 7. Peso específico del cemento.**

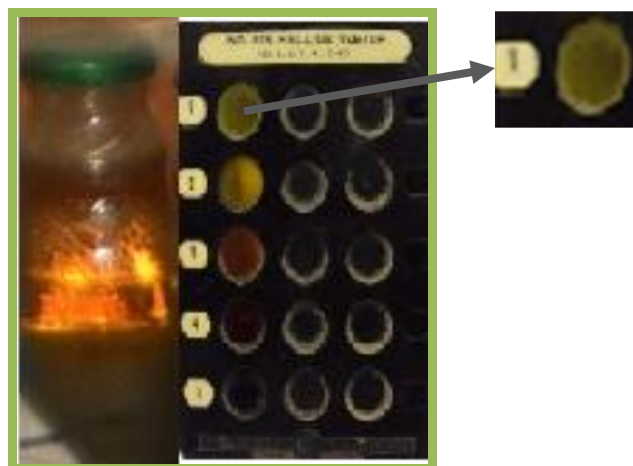
<b>Tipo de cemento</b>	Pórtland tipo I
<b>Peso específico</b>	3,03

Fuente. Las autoras.

#### 4.1.1.2 Agregados

Los resultados de las pruebas del agregado grueso y del agregado fino se presentan en las Tablas 3 y 4 del anexo D. Adicionalmente, se realizó la prueba de colorimetría al agregado fino tal como aprecia en la Figura 13. Esta prueba se realizó según lo establecido en la norma NTC 127 [48] para calcular el contenido de materia orgánica, de una manera aproximada.

El análisis de colorimetría mostró que el agregado fino contiene un 1% de materia orgánica, aproximadamente. El contenido de materia orgánica fue aceptable teniendo en cuenta la norma NTC 127 [48] y ASTM C 40 [57]. Con base en este resultado, se determinó que el agregado fino no debía ser sometido a un proceso de lavado, ya que el porcentaje de materia orgánica era muy bajo.



**Figura 13. Ensayo de materia orgánica del agregado fino.**

Fuente. Las autoras.

El tamaño máximo del agregado grueso fue de  $\frac{3}{4}$ " y el tamaño máximo nominal de  $\frac{1}{2}$ ". Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la Tabla 4 del anexo D. El módulo de finura del agregado fino, cumple con los requerimientos de la norma NTC 77 [43], que establece un valor aceptable dentro del intervalo de 2,3 a 3,1. El análisis granulométrico indica que los agregados tienen una buena gradación o distribución granulométrica.

#### **4.1.1.3 Agua potable**

El agua utilizada en la fabricación de las mezclas de concreto fue agua potable, la cual cumple con los exigencias y requerimientos que menciona la norma NTC 3459 [49], la cual no contenía cloruros, aceites, azúcares, ácidos, álcalis, sales y material orgánico en cantidades perjudiciales para la fabricación de concreto. El agua potable fue suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). El análisis fisicoquímico y microbiológico del agua se presenta en la Figura 1 del anexo D.

Se puede ver en los análisis de control de la calidad realizados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), que el agua que se utilizó para la fabricación de las probetas de concreto, contenía menos de 1 mg/L de cloro residual, presentó un leve color y no presentó olor ni sabor. El contenido de Cloruros, Sulfatos, Nitratos, Hierro y Aluminio fue muy bajo. El PH fue aceptable, tal como lo indica la norma, siendo éste menor a 7,74.

#### **4.1.1.4 Humo de sílice (adición 1)**

El humo de sílice utilizado como adición 1 fue EUCON MSA de TOXEMENT el cual cumple con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C1240 [20]. Es un aditivo en polvo, de color gris que le proporciona al concreto, características de alta resistencia mecánica y química. Reacciona químicamente con el hidróxido

de calcio del cemento produciendo una mayor cantidad de gel de silicato de calcio. La información técnica del humo de sílice utilizado, se presenta con más detalle, en la Tabla 5 del anexo D.

Es importante mencionar que la dosis máxima recomendable para esta adición está normalmente entre el 5% y 10% del peso del cemento. Se utilizó el porcentaje más alto recomendado por el fabricante que es de 10%, así mismo, se agregó esta adición cuando la mezcla de cemento y arena aún estaba seca, tal como se recomienda en la ficha técnica. Para la fabricación de las mezclas de concreto con humo de sílice fue necesario el uso de un plastificante con el fin de proporcionarle a la mezcla una mayor manejabilidad.

#### **4.1.1.5 Escoria (adición 2)**

La caracterización química de la escoria fue realizada, como ya se indicó, por el Centro de desarrollo productivo de Joyería-CDPJ, en el laboratorio de Fluorescencia de rayos-x. La Figura 2 en el anexo D, muestra los resultados de este análisis, adicionalmente en la Tabla 6 del anexo D, se presenta la composición de la escoria siderúrgica utilizada como adición 2. La escoria siderúrgica utilizada, presenta un porcentaje de SO<sub>3</sub> permitido, tal como lo establece la norma ASTM C 989 [58]. Esta adición, se utilizó sin someterla a ningún tratamiento de trituración y molienda.

Antes de incorporarla a las mezclas de concreto se pasó la escoria por un tamiz N° 4, para evitar que se incluyera en el concreto, este material aglomerado. En la escoria se observó la presencia de diminutas partículas metálicas. La calidad de la escoria como adición depende de muchos parámetros tales como la composición química, la composición mineralógica, el grado de vitrificación, la granulación y la finura de molienda [59]. Para este trabajo, solo se tuvo en cuenta la composición química. La escoria utilizada contiene principalmente óxidos de Calcio, de silicio,

de aluminio y de magnesio, que constituyen aproximadamente el 83,4% de la composición química de este material.

El porcentaje encontrado para los óxidos principales (Ver Tabla 6 en el anexo D), como el óxido de calcio y óxido de silicio tienen un contenido aceptable, según lo han establecido las normas estadounidenses y alemanas ( $\text{CaO} = 35\text{-}48\%$  y  $\text{SiO}_2 = 30\text{-}38\%$ ). [59] Algunos autores establecen una relación entre el poder aglomerante con el índice de basicidad. Según las normas DIN, el índice de basicidad encontrado fue de 1.3, por lo tanto, teniendo en cuenta el criterio establecido, la escoria tiene un bajo poder aglomerante. Sin embargo, el módulo de hidraulicidad (calculado con base en la composición química) es mayor a 1. [59] Las ecuaciones y los cálculos respectivos, se muestran con más detalle en el anexo D. (Ver ecuaciones 1 y 2 del anexo D)

El contenido de  $\text{SO}_3$  es de 2,19%, el cual es aceptable, debido a que no supera el 40% tal como lo indica la norma ASTM C 989 [58]. La escoria utilizada como adición 2, tiene un bajo poder aglomerante, aunque probablemente presente propiedades hidráulicas. Es decir, que es una adición que puede formar productos de hidratación y combinarse con la cal libre, pero su poder aglomerante, que ayuda a la cohesión de las partículas y permite que se unan para formar un todo compacto, es muy bajo. [60]

#### **4.1.1.6 Plastificante-retardante**

Se utilizó el aditivo líquido plastificante: PLASTIMENT TM20 de SIKA, de color café oscuro, retardante del fraguado y reductor de agua, esto, con el fin de mejorar la manejabilidad de las mezclas. Las especificaciones técnicas de este aditivo, se presentan en la Tabla 2 del anexo D. Las primeras probetas que se fabricaron para las pruebas preliminares, fueron de Referencia ó con un contenido de 0% de adiciones. Se elaboraron sin agregarles este aditivo plastificante-retardante y

presentaron una consistencia muy seca. Se caracterizaron por su poca manejabilidad. El plastificante-retardante se utilizó posteriormente en la fabricación de las probetas destinadas para las pruebas y se utilizó la misma proporción para todas las mezclas de concreto.

El aditivo plastificante-retardante, según lo especifica la ficha técnica, dada por el fabricante, no varió el asentamiento normal del concreto. Se utilizó de este producto la máxima dosis que se recomienda que corresponde a 0,5% del peso del cemento y ésta porción se agregó a la última parte del agua de amasado de la mezcla, tal como sugiere el fabricante.

#### **4.1.2 Diseño de mezcla**

Con ayuda de la guía para la fabricación de probetas de concreto, facilitada por el Laboratorio de Caracterización de materiales para la Construcción, de la Escuela de Ingeniería Civil (basada en el método ACI: American Concrete Institute), se hizo el diseño de mezcla para un cilindro de concreto con un volumen de un metro cúbico y una relación agua-cemento (A/C) de 0.45 (Ver Tabla 3 en el anexo A).

Según la dosificación para un metro cúbico de mezcla de concreto, los agregados en la mezcla componen el 73,06%, el cemento Pórtland tipo I el 18,51% y el agua compone el 8,34% de la mezcla. En la Tabla 8 que se muestra a continuación, se establece la dosificación para fabricar una probeta cilíndrica de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura (dimensiones de las probetas fabricadas para esta investigación).

**Tabla 8. Cantidad necesaria de cada componente para la fabricación de una probeta cilíndrica de concreto (Referencia).**

<b>Componentes</b>	<b>Peso Unitario* (Kg)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Agua</b>	0,3142	8,34
<b>Cemento Pórtland tipo I</b>	0,698	18,52
<b>Agregado fino</b>	1,129	29,97
<b>Agregado grueso</b>	1,623	43,08
<b>Plastificante</b>	0,00349	0,093

Fuente. Las autoras.

Para la fabricación de las probetas con un reemplazo parcial del cemento (probetas adicionadas) se tuvo en cuenta la cantidad de cemento para la fabricación de un espécimen de referencia, siendo este peso el 100% del cemento. A partir de este dato, se calculó la dosificación de cada una de las adiciones, sacando el respectivo porcentaje de adición, al peso que correspondía al 100% del cemento. (Ver anexo A tablas 4 y 5)

#### **4.1.3 Elaboración de las Probetas**

Inicialmente se fabricaron 24 probetas para cada mezcla, con una relación agua-cemento (A/C) de 0,45. En el anexo A, se muestra de manera detallada el diseño para cada una de las mezclas y en la Tabla 6 del anexo A, se hace una distribución de las probetas fabricadas por mezcla. Se debe destacar que la relación agua-cemento (A/C) se conserva aunque la mezcla contenga adiciones, debido a que éstas hacen parte del material cementante y reemplazan una porción del cemento.

En las pruebas de resistencia a la compresión fue necesario la fabricación de otras probetas para repetir este ensayo (se fabricaron en total 25 probetas para P6, y 36

---

\* Peso necesario para la fabricación de una probeta cilíndrica de referencia.

probetas para P7) con el fin de obtener una mayor confiabilidad en los resultados de resistencia a la compresión, de las probetas evaluadas para estas mezclas. Es importante destacar que en la etapa preliminar a la elaboración de las siete mezclas objeto de éste estudio, se realizó un entrenamiento y capacitación en el proceso de fabricación del concreto. Se realizaron 16 probetas de entrenamiento y se determinó que la consistencia de la mezcla de Referencia, era seca y difícil de manejar. Posteriormente, se fabricaron cuatro probetas más agregando el aditivo plastificante-retardante del fraguado, lo que permitió darle mayor fluidez a la mezcla de concreto. En total se fabricaron 20 probetas de entrenamiento.

En la Figura 14, se puede apreciar el proceso de fabricación del concreto realizado para el desarrollo de este trabajo: la mezcla e incorporación de los materiales, preparación de los moldes, compactación de las probetas y eliminación de las burbujas.



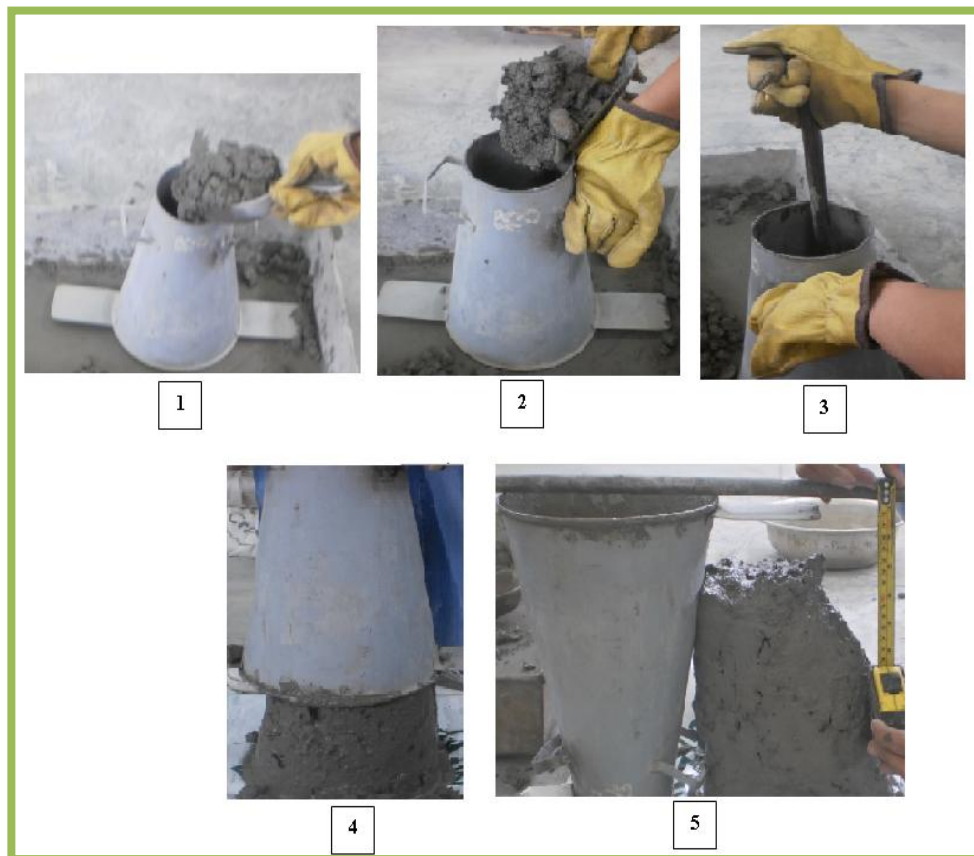
**Figura 14. Proceso de fabricación de probetas cilíndricas de concreto.**

Fuente. Las autoras.

## 4.2 MEDICIÓN DE ASENTAMIENTO

El asentamiento se midió para cada una de las 7 mezclas, las cuales fueron elaboradas tres veces con el fin de obtener un promedio. La medición del asentamiento se hizo utilizando el cono de Abrams. El proceso realizado se muestra en la Figura 15.

Para efectuar cada prueba de asentamiento, se fabricaron mezclas con un peso unitario para 18 probetas y de esta manera garantizar que la mezcla fuera suficiente en cantidad, para realizar la prueba del cono de Abrams y elaborar las probetas necesarias para las pruebas posteriores (VPU y RC).



**Figura 15. Proceso para la determinación del asentamiento.**

Fuente. Las autoras.

La Tabla 9, muestra los resultados obtenidos de los diferentes asentamientos para las mezclas P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7.

**Tabla 9. Resultados del asentamiento, medido con el cono de Abrams.**

Nombre	Mezcla	ASENTAMIENTO (cm)			Promedio (cm)
		1	2	3	
<b>P1</b>	<b>Referencia</b>	2,3	2,7	3,1	2,70
<b>P2</b>	<b>10% humo sílice.</b>	1,7	2,1	2,1	1,97
<b>P3</b>	<b>10% escoria</b>	2,5	2,8	3,2	2,83
<b>P4</b>	<b>10%hs-10%esc.</b>	3,2	3,5	3,7	3,47
<b>P5</b>	<b>10%hs-20%esc.</b>	3,7	3,5	4,1	3,77
<b>P6</b>	<b>10%hs-30%esc.</b>	4,2	4,4	4,6	4,40
<b>P7</b>	<b>10%hs-40%esc.</b>	4,5	4,3	5,1	4,63

Fuente. Las autoras.

Los resultados mostraron que el mayor asentamiento fue para las mezclas P7. Esto posiblemente, debido a que esta mezcla tiene el más alto porcentaje de escoria siderúrgica, adición que normalmente aumenta la exudación y permite obtener mezclas más fluidas de concreto. [22]

El menor asentamiento se muestra en las mezclas P2, esto se debió a que presentaban una consistencia más seca, comparadas con las demás mezclas. Aunque no se midieron en este trabajo de investigación, la velocidad de las reacciones en las mezclas de concreto, la adición de humo de sílice en el concreto, normalmente ocasiona en este último, un gran calor de hidratación en comparación con otras adiciones como la escoria siderúrgica, lo que podría explicar su consistencia seca. Posiblemente, en estas mezclas se presentaron reacciones altamente exotérmicas. [61]

Las mezclas P3 presentaron un valor de asentamiento mayor que el asentamiento registrado para P1 y que el registrado para P2, pero es menor que el asentamiento de las mezclas P4, P5, P6 y P7, las cuales contienen mezcla de adiciones de humo de sílice y escoria. La consistencia de esta mezcla, también fue seca. Las

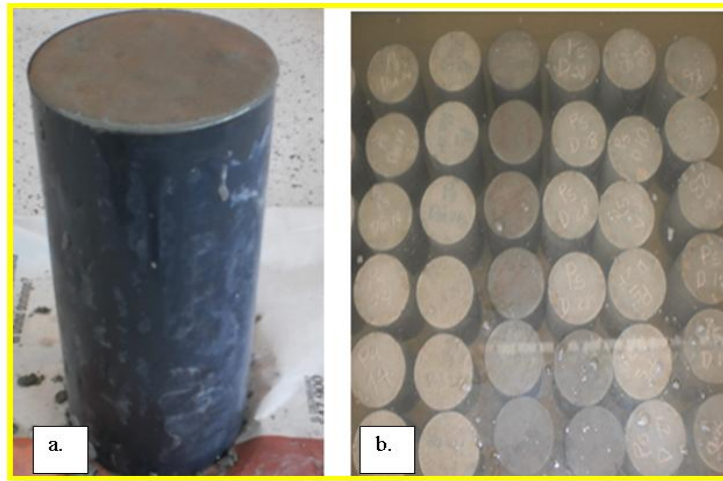
mezclas fabricadas con una mezcla de humo de sílice y escoria siderúrgica, tales como P4, P5, P6 Y P7, presentaron un asentamiento mayor comparadas con la mezcla de Referencia y este asentamiento aumentó a medida que se incorporó mayor escoria en la mezcla de concreto. Es decir, el asentamiento de P7 fue mayor que P6; el asentamiento para P6 fue mayor que para P5 y el asentamiento registrado para P5 fue mayor que para P4. La consistencia de las mezclas de concreto adicionadas con una combinación de humo de sílice y escoria siderúrgica, fue semiseca.

El diseño de esta mezcla, se hizo teniendo en cuenta un asentamiento de 5-10 cm para la mezcla de Referencia ó P1 y la prueba del cono de Abrams muestra un asentamiento menor. Esta diferencia se debe al tipo de agregado grueso utilizado, al módulo de finura del agregado fino (menor a 2,6 tiende a desarrollar mezclas difíciles de trabajar) y a que estos materiales se utilizaron en estado seco. La adición de humo de sílice y escoria siderúrgica al concreto, modificaron el valor del asentamiento con respecto al concreto normal ó de Referencia.

### **4.3 FRAGUADO Y CURADO**

El fraguado normal de una probeta cilíndrica de concreto que no contiene ningún aditivo dura 24 horas. El fraguado de las probetas fabricadas para esta investigación se tardó tres horas y treinta minutos más que una probeta normal. Esto se realizó según lo establecido en la norma ASTM C 494 [14], para los concretos que contienen aditivos plastificantes y retardantes del fraguado. El tiempo total de fraguado fue de 27 horas y treinta minutos. El curado se realizó en condiciones estándar de Temperatura y humedad (23°C-25°C y 100% de humedad).

Estos dos procesos se pueden apreciar en la Figura 16.



a) Fraguado inicial b) curado bajo condiciones estándar (100% humedad y temperatura ambiente).

**Figura 16. Proceso de fraguado y proceso de curado.**

Fuente. Las autoras.

#### **4.4 ENSAYOS EXPERIMENTALES**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de cambios de peso, contenido de agua, inspección visual, evaluación de la porosidad, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia de compresión.

##### **4.4.1 Cambios de peso**

La mayoría de las mezclas presentaron el mayor cambio de peso entre los días 3 y 7 de curado, a excepción de las probetas P2, que mostraron la mayor variación en el peso entre el día 3 y antes de introducirlas a la piscina. En la tabla 1 del anexo E, se observan los cambios de peso registrados en los días de evaluación 3, 7, 10, 14, 21 y 28.

Las probetas P1 registraron un ligero aumento del peso, desde el día 7 hasta el día 28. Este aumento está entre 0,001-0,003 Kg, aproximadamente. En las

probetas P2, el mayor valor de variación del peso se registró en el día 3 (diferencia del peso entre el día 3 y el peso inicial antes de introducir a piscina), con un aumento de 0,076 Kg aproximadamente.

Esto se debió, Posiblemente, a que el humo de sílice tiene un mayor calor de hidratación y por esta razón, las reacciones del concreto ocurrieron con mayor rapidez. [59]

La adición de humo de sílice en las mezclas P2, disminuyó en gran medida la porosidad abierta a la superficie (determinado con inspección visual). La saturación ocurrió en menos tiempo que las demás probetas, tal como se evidenció en los cambios de peso registrados. El peso entre los días 3 y 28 para estas probetas (P2) aumentó entre 0,02 Kg y 0,06 Kg, registrando su mayor valor en el día 3 de evaluación.

También se demostró que la diferencia entre el peso inicial antes de introducir a piscina y la mezcla fresca, para las probetas de humo de sílice, fue menor que en las demás probetas.

La literatura consultada, acerca del humo de sílice que tiene propiedades y características similares al utilizado en este trabajo (de conformidad con las exigencias de la norma ASTM C1240 [20]), afirma que este material tiene un gran calor de hidratación y que normalmente reacciona con el agua de amasado debido a sus propiedades cohesivas.

Para las probetas con mezclas de humo de sílice y escoria siderúrgica (P4, P5, P6 y P7), el peso registrado durante los días de evaluación varió entre 0,001 Kg y 0,028 Kg, aumentando su peso hasta mantenerse prácticamente constante en el día 28. Esto demostró que durante el día 21 y 28 finalizó el proceso de saturación debido al curado en húmedo.

- **Contenido de agua**

El contenido de agua se expresó en porcentaje y se calculó por la diferencia de peso entre el valor final de cada probeta cilíndrica de concreto (día 28) y el peso inicial después del proceso de desencofrado. El peso se obtuvo en estado de superficie saturada seca (S.S.S). Los resultados se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10. Contenido de agua en % para las mezclas fabricadas.**

MEZCLAS						
P1: Referencia (%)	P2: 10% Humo de sílice (%)	P3: 10% escoria (%)	P4: 10% humo de sílice-10% escoria. (%)	P5: 10% humo de sílice-20% escoria. (%)	P6: 10% humo de sílice-30% escoria. (%)	P7: 10% humo de sílice- 40% escoria. (%)
1,201	1,075	1,164	1,040	0,921	0,910	1,182

Fuente. Las autoras.

Para el cálculo del contenido de agua se tuvo en cuenta la ecuación 3:

$$\% \text{ CA: } \frac{P_f - P_i}{P_i} * 100 \quad (3)$$

Donde

*P<sub>f</sub>*: Peso final probeta día 28 de curado.

*P<sub>i</sub>*: Peso inicial probeta antes de introducir a piscina

Se observa en la Tabla 10, que el valor más bajo de contenido de agua se presentó en las probetas P4, P5 y P6, con un porcentaje de 0,921 y 0,91,

respectivamente. Esto ocurrió debido a la proporción de adiciones que fueron agregadas, especialmente de escoria, que permitió rellenar los poros (observado además por inspección visual y determinado con la variación del peso de las probetas hasta el día 28 de curado) y posiblemente esto, ayudó a disminuir la permeabilidad de las probetas.

Sin embargo, las probetas P7, registraron el mayor contenido de agua, con un valor de 1,182%, esto, porque en esta mezcla se reemplazó al cemento con un 50% de adiciones minerales, de las cuales el 40% corresponde a escoria siderúrgica, lo que disminuye el poder aglomerante y cohesivo que tiene el cemento, al ser reemplazado. Por tal motivo, reemplazar en un 50% el material cementante afecta significativamente la capacidad de aglomeración y cohesión con los agregados, que normalmente proporciona el cemento y en consecuencia podría afectar también la permeabilidad de estos concretos.

En consecuencia con los resultados obtenidos de contenido de agua, se puede afirmar que las probetas a las cuales se les adicionó humo de sílice y/o escoria siderúrgica, disminuyeron notablemente el porcentaje de contenido de agua.

El menor porcentaje de contenido de agua, se registró para P6, le sigue, seguido de P3, P2 y P7, respectivamente. El mayor porcentaje de contenido de agua, se determinó para P1.

La adición de escoria siderúrgica, en los concretos fabricados, contribuye notablemente a la disminución del porcentaje de contenido de agua. Por tal razón, la escoria siderúrgica es posiblemente, efectiva para disminuir la permeabilidad del concreto y también para disminuir las discontinuidades abiertas a la superficie. Sin embargo, el proceso de saturación ocurre de manera más lenta, el cual se observó en el registro de los cambios de peso.

#### 4.4.2 Inspección visual

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron en el ensayo de inspección visual. Varios aspectos hicieron parte de ésta evaluación: inspección del estado superficial: porosidad, delaminación superficial y discontinuidades abiertas a la superficie y cálculos dimensionales.

- **Evaluación de la Porosidad mediante Inspección Visual**

En esta etapa se evaluaron las probetas mediante inspección visual con el fin de establecer si éstas cumplían algunas condiciones superficiales para ser sometidas a la prueba de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.

En general, las probetas presentaron buena homogeneidad y buena compactación. En la Figura 17, se puede apreciar la porosidad abierta en la superficie de una probeta P1 fabricada, la cual presenta escasos poros grandes y algunos poros pequeños y dispersos.

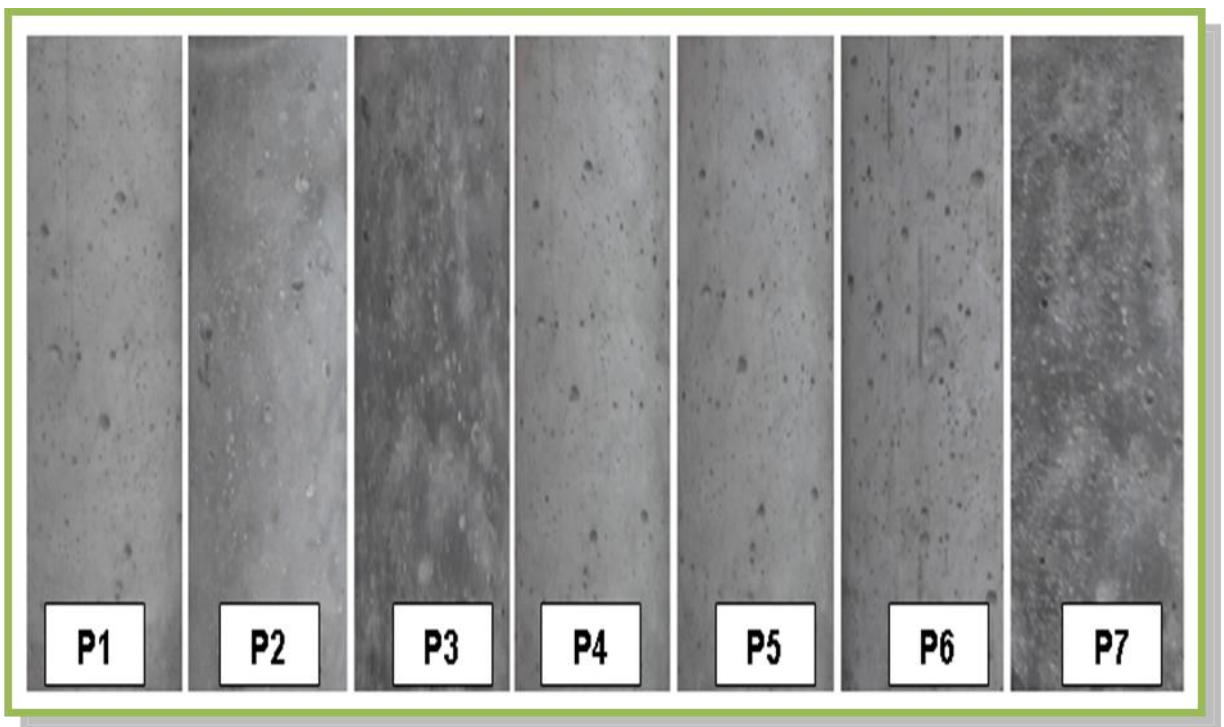


**Figura 17. Porosidad abierta a la superficie de una probeta P1.**

Fuente. Las autoras.

Las probetas P2, presentaron poros abiertos a la superficie mucho más grandes que en las probetas de Referencia, de menos profundidad y muy escasos, la porosidad pequeña en estas probetas, fue muy poca y estaba bien distribuida. Estas probetas presentaron además, buena compactación, homogeneidad y no hubo evidencia de segregación, grietas ni fisuración.

Es decir, en P2, la porosidad abierta a la superficie disminuye, pero presenta poros grandes, muy escasos y de poca profundidad (Ver Figura 18.). En estas probetas no fue usual encontrar porosidad pequeña en toda la superficie de la probeta.



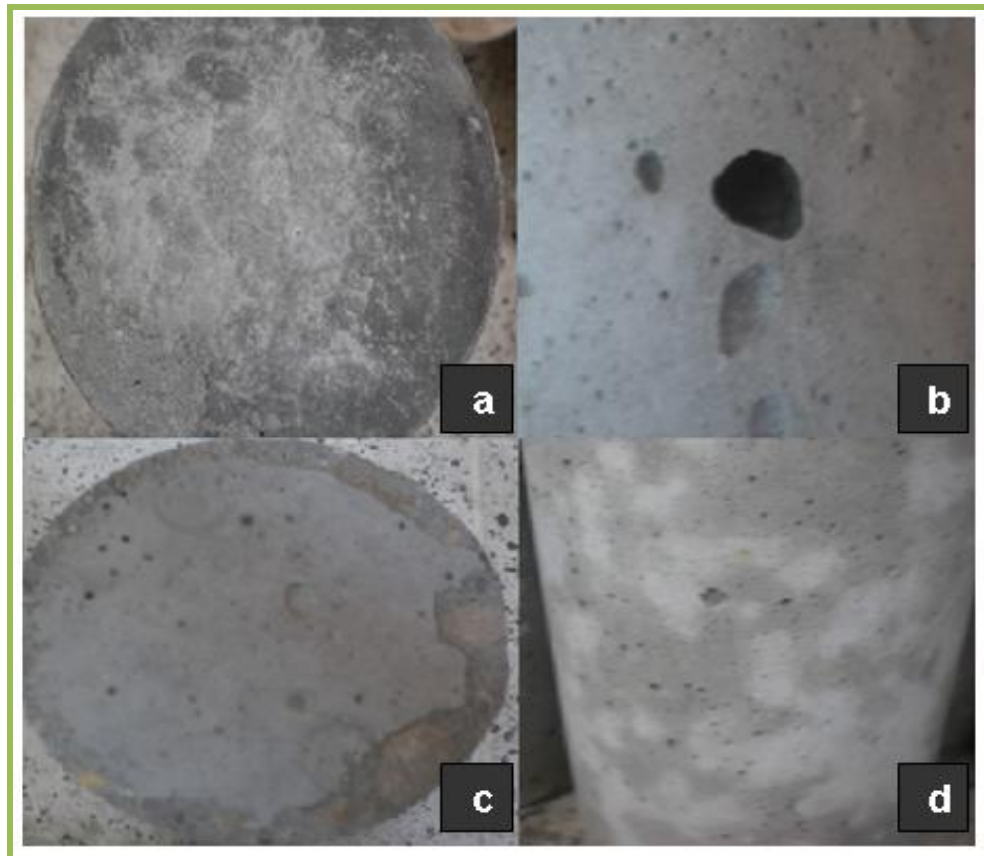
**Figura 18. Inspección visual de la porosidad de las probetas de concreto.**

Fuente. Las autoras.

Las probetas P3 mostraron menos porosidad grande y más poros pequeños y dispersos. En algunas probetas fabricadas con la mezcla P3, se observó variaciones del color que se manifestaron con algunas manchas blancas en la

superficie de las caras transversales del concreto (fuga de lechada). Estas manchas fueron ocasionadas posiblemente por un exceso de agua, debido a una mayor exudación, a causa de la adición de escoria.

Algunos de los defectos encontrados, se pueden observar en la Figura 19.



a) Fuga de lechada (manchas blancas), b) Discontinuidades abiertas a la superficie  
c) Delaminación superficial d) Variación del color.

**Figura 19. Defectos encontrados en las probetas de concreto.**

**Fuente. Las autoras.**

Las probetas P4, P5, P6 y P7 revelaron una porosidad mucho más pequeña, comparadas con las probetas de las mezclas P1 y P2. Las probetas P7 presentaron la porosidad más pequeña y manchas blancas (fuga de lechada)

mucho más evidentes que las probetas P3, debido al mayor porcentaje de adición de escoria y a la mayor exudación. En general todas las probetas presentaron buena homogeneidad, no presentaron fisuración, ni segregación. Solo dos probetas fabricadas presentaron grietas debido a la contracción y a una mala compactación, la cual fueron rechazadas y reemplazadas.

Las probetas que presentaron discontinuidades abiertas a la superficie grandes (Poros grandes, mayores de 3 mm de largo y 3 mm de profundidad), en las caras transversales, fueron rechazadas debido a que se comprobó que este tipo de defectos, afectaban la lectura de la prueba de ultrasonido, al presentar valores distintos de tiempo de vuelo, solo en los puntos donde se encontraban estos defectos. Se examinó la porosidad de las probetas mediante inspección visual, para cada día de evaluación.

Se tomaron registros fotográficos y se midieron algunos poros grandes en las probetas que los presentaban como se aprecia en la Figura 20.



**Figura 20. Observación de los poros en las probetas de concreto.**

**Fuente. Las autoras.**

Las probetas que presentaron con mayor frecuencia estos poros grandes, fueron las probetas fabricadas con la mezcla P2; sin embargo, no se presentaron en las caras transversales, por lo tanto no afectaron la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. Las probetas fabricadas con la mezcla P7, mostraron la porosidad más pequeña y menos dispersa.

En las probetas fabricadas con mezcla de humo de sílice y escoria, disminuyó el tamaño de los poros a medida que se aumentó el porcentaje de adición de escoria; sin embargo, la porosidad pequeña se hizo más frecuente y menos dispersa. En la Tabla 2 en el anexo E, se observa el número de probetas para cada una de las mezclas, en las que se encontró en mayor parte porosidad pequeña.

Para las probetas de P1, se encontró que: 4 probetas presentaron solo porosidad pequeña; es decir, el 16,67% de las probetas evaluadas, presentaba en la mayor parte de la superficie porosidad pequeña. En las probetas P2 solo 2 presentaron estos poros (8,33%). En las probetas P3, 13 probetas presentaron porosidad pequeña (54,17%). Para las probetas P4, 15 presentaron poros pequeños (62,5%). Finalmente, para las probetas fabricadas con las mezclas: P5, P6 y P7, se observó que 18, 19 y 21 respectivamente (75%, 79,17% y 87,5%), de las 24 probetas inspeccionadas, presentaban poros pequeños.

La Figura 1 en el anexo E, muestra el número de probetas por mezcla, que fueron rechazadas para realizarles la prueba de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, debido al tipo de defectos que presentaron. De las probetas de Referencia, se rechazaron 6 de 24 fabricadas.

El mayor número de probetas rechazadas correspondió a P7, debido a que presentaron una superficie irregular en las caras transversales y en ocasiones el proceso de lijado no fue suficiente para nivelarla, dando como resultado pequeñas

hendiduras que impedían un buen acoplamiento entre el concreto y el transductor y esto afectaba drásticamente la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, conduciendo a lecturas erróneas del tiempo de vuelo.

La delaminación superficial, fue otro defecto frecuente en las probetas inspeccionadas. P5 y P7, corresponden a las mezclas con el mayor número de probetas rechazadas por éste defecto, les sigue las probetas P1 y P4 con 3 y 2 probetas respectivamente. Finalmente, se rechazó una sola probeta de la mezcla P5. Se descartaron en total 14 probetas por el defecto de delaminación superficial ó “descascamiento”.

Las discontinuidades abiertas a la superficie afectaron la lectura del tiempo de vuelo, porque dejan un vacío entre el transductor y la superficie del concreto. Se observaron otros defectos tales como hendiduras, grietas y segregación (solo en una): Se rechazaron 6 probetas de la mezcla P7, por presentar hendiduras, 2 probetas se rechazaron por presentar grietas (Referencia y P5, respectivamente), solo 1 probeta presentó segregación que corresponde a la mezcla P7, posiblemente debido a una mala compactación.

▪ **Evaluación de la Porosidad mediante el porosímetro de campo Ruska.**

Se midió la porosidad abierta por medio del Porosímetro de campo Ruska para probetas fabricadas con las mezclas P1, P2, P3, P4 y P7, cuando éstas ya estaban saturadas. Esta medición se basa en la ley de Boyle y en el principio de Arquímedes, que permite determinar la porosidad efectiva, es decir; el porcentaje de espacio poroso intercomunicado con respecto al volumen del concreto. El ensayo consistió en medir el volumen de sólidos o granos del núcleo de la probeta y en la medición del volumen total de la misma [62]. Para la determinación de la porosidad efectiva con este método, se tiene en cuenta la ecuación 4.

$$P (\%) = \frac{(V_t - V_g)}{V_t} * 100 \quad (4)$$

Donde

$P (\%)$ = porcentaje de porosidad.

$V_t$ = Volumen total.

$V_g$ = Volumen de los granos del espécimen.

El Porosímetro de campo Ruska es un equipo perteneciente a la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander-sede Guatiguará. Este instrumento es portátil y permitió medir la porosidad efectiva de núcleos de cinco muestras de concreto. El procedimiento realizado para la determinación de la porosidad efectiva, se describe detalladamente en el anexo C.

**Tabla 11. Resultados de la prueba de Porosidad efectiva, realizada a cinco muestras diferentes, cuando estaban saturadas de agua.**

MEZCLA	$V_t$ Centésimas	$V_g$ Centésimas	POROSIDAD EFECTIVA (%)
P1:Referencia	121	111	8.264
P2: 10% humo de sílice	109	106	2.752
P3: 10% escoria	111.5	106	4.933
P4:10% humo de sílice-10% escoria	101	95	5.941
P7: 10% humo de sílice-40% escoria	102.5	102.4	0.097

Fuente. Las autoras.

Se demostró que el uso de adiciones minerales, tales como el humo de sílice y escoria, realizadas en este trabajo, disminuyen la porosidad efectiva. Se observa un mejor resultado para el concreto adicionado con 10% de humo de sílice en

comparación con la muestra que contiene 10% de escoria, sin embargo, las dos adiciones son de gran importancia, en la disminución de la porosidad efectiva. El mejor resultado se obtuvo para el espécimen P7, debido a que contiene mezcla de las dos adiciones, con un contenido mucho mayor de escoria siderúrgica. Esto muestra que la escoria contribuye significativamente en la disminución de la porosidad. Los cálculos se muestran detalladamente en el anexo C.

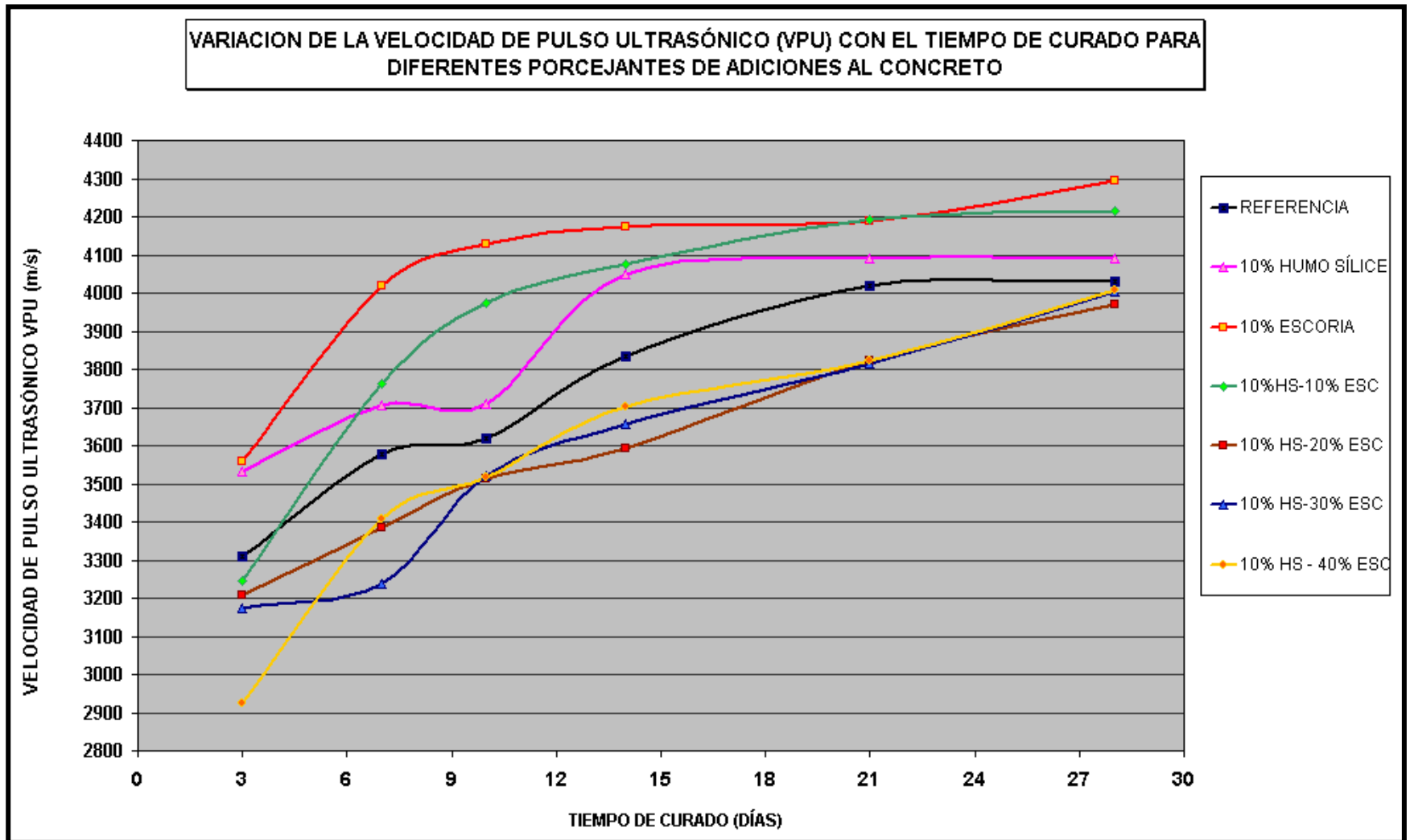
#### **4.4.3 Evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico V.P.U.**

En la Tabla 12 y en la Figura 21, se presentan los resultados de la velocidad de pulso ultrasónico, para cada mezcla, para los días de curado evaluados. Se observó que la adición del 10% de humo de sílice en el concreto (P2), aumentó significativamente la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la mezcla de Referencia (P1) para todos los días de curado evaluados. Este aumento se debe a que el porcentaje de humo de sílice agregado, permite una mayor cohesión de las partículas y disminuye los vacíos presentes en el concreto rellenando los espacios vacíos y ayudando a una mayor compactación.

**Tabla 12. Resultados de la prueba de ultrasonido para cada una de las mezclas en los días de curado evaluados.**

<b>VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO V.P.U. (m/s)</b>							
<b>TIEMPO DE CURADO (DÍAS)</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>
	<b>Referencia</b>	<b>10% humo sílice</b>	<b>10% escoria</b>	<b>10%hs-10%esc</b>	<b>10%hs-20%esc</b>	<b>10%hs-30%esc</b>	<b>10%hs-40%esc</b>
<b>3</b>	3310,497	3531,277	3557,965	3243,813	3207,734	3172,515	2925,928
<b>7</b>	3577,236	3707,272	4018,607	3761,105	3383,710	3238,419	3408,324
<b>10</b>	3618,586	3708,745	4129,908	3972,919	3511,747	3519,526	3518,392
<b>14</b>	3834,189	4048,073	4171,998	4075,167	3593,839	3657,135	3701,340
<b>21</b>	4019,374	4091,517	4189,969	4192,448	3821,185	3814,268	3823,335
<b>28</b>	4028,946	4091,747	4295,639	4214,470	3968,884	4003,955	4005,693

Fuente. Las autoras.



**Figura 21. Velocidad de pulso ultrasónico vs. Tiempo de curado.**

Fuente. Las autoras

La mezcla P3 es la que presentó en la mayoría de los días de evaluación, los valores más altos de velocidad de pulso ultrasónico comparados con las velocidades de las demás mezclas fabricadas. P3 registró valores por encima de las mezclas de Referencia, P2, P4, P5, P6 y P7, para todos los días de evaluación, a excepción del día 21.

En el día 21, la velocidad de pulso ultrasónico P3 comparada con la mezcla P4, es menor. La mezcla P4 presentó un leve aumento en el valor de velocidad de pulso ultrasónico con respecto a P3, con una diferencia de 2,479 m/s (0,059%).

La mezcla P4 mostró un aumento en la velocidad de pulso ultrasónico comparada con las mezclas P1 ó Referencia y P2 a partir del día de evaluación 7, debido a que con la adición de escoria se obtiene una mayor disminución de la porosidad, en comparación con la adición de humo de sílice (P2). El efecto se evidenció a partir del día 7 de curado en húmedo, debido a que es el tiempo mínimo para que los concretos adicionados con escoria siderúrgica, presenten una mejoría en sus propiedades [63].

Los concretos fabricados con la mezcla P4 mostraron un comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico, con tendencia a mantenerse constante en los días 21 y 28 (Ver Figura 21). En estos concretos (P4), se evidenció un crecimiento considerable entre los días de curado 3 y 7, esto debido a que esta mezcla contenía adición de humo de sílice en una porción equivalente de escoria siderúrgica (10% humo de sílice-10% escoria) y de esta manera, la disminución de la porosidad es mucho mayor, gracias a la contribución de las dos adiciones. Se presenta un incremento considerable en la velocidad de pulso ultrasónico a edades tempranas, debido probablemente, a que las reacciones de hidratación de los concretos adicionados con humo de sílice, ocurren rápidamente y además la escoria siderúrgica, comúnmente, hace que los concretos sean más sensibles a las condiciones de curado en húmedo. [63]

Las probetas P5, P6 y P7 registraron valores de velocidad de pulso ultrasónico menores a los obtenidos para las probetas P1, debido a que una mayor adición de escoria con respecto a la adición de humo de sílice, disminuye la posibilidad de reemplazar al cemento, con un material que contribuya de manera significativa a la cohesión de las partículas, como es el caso de la adición 1 ó de humo de sílice.

Al aumentar el porcentaje de escoria siderúrgica, se está reduciendo el cemento, el cual es el material aglomerante por excelencia en los concretos ordinarios. Es claro que un 10% del cemento es reemplazado por humo de sílice, que también tiene propiedades cohesivas similares al cemento, pero para el caso de las probetas P5, P6 y P7, el porcentaje de escoria adicionado, es mucho mayor que el de humo de sílice (20%, 30% y 40% respectivamente), lo cual hace que se sustituya una parte importante del cemento, por un material que probablemente no desarrolló propiedades, cohesivas y aglomerantes, ó requiere de mucho más tiempo de curado para ver sus efectos.

En las mezclas P5, P6 y P7 se reemplazó 30%, 40% y 50% el peso del cemento, en donde el 10% de esta mezcla de adiciones corresponde al humo de sílice, que de manera similar al cemento, ayudó a que las partículas se unieran entre sí para formar un todo compacto

La variación o incremento del valor de la velocidad de pulso ultrasónico en el caso de las probetas P2 con respecto a las probetas de Referencia (P1), disminuyó a medida que aumenta el tiempo de curado. Para el día 28, se registró un incremento muy pequeño en comparación con el registrado en el día de curado 3. Esto ocurre porque los concretos adicionados con humo de sílice presentan variaciones importantes en los primeros días de curado (edades tempranas) y para tiempos de curado entre 21 y 28 días, las reacciones de hidratación prácticamente se han completado, la estructura del concreto ya se ha formado

previamente. Por esta razón se presentaron valores muy cercanos de velocidad de pulso ultrasónico para P2 entre los días de evaluación 21 y 28.

En las probetas P5, P6 y P7 se observó una disminución de la velocidad de pulso ultrasónico en comparación con las probetas P1. Esa disminución se hizo mucho más evidente con las probetas P7, debido a que se sustituyó una parte importante de cemento que ayuda a la compactación y unión de las partículas, por escoria siderúrgica. Sin embargo, para el día 28 la disminución es muy pequeña y el valor de velocidad de pulso ultrasónico de P7, se acerca al valor de la velocidad de P1 (Referencia) en ese mismo día. Así mismo la velocidad de pulso ultrasónico para las probetas P5 y P6 en el día de curado 28, tiende a acercarse al valor de la velocidad de pulso ultrasónico encontrada para P1, en ese mismo día de curado. Esto puede explicarse, si se tiene en cuenta que la influencia de la adición de escoria en el concreto, puede presentar mejorías significativa en la velocidad de pulso ultrasónico para edades de curado mucho mayores a 28 días y solo en caso de que la escoria presente propiedades cohesivas.

Basándose en los resultados de velocidad de pulso ultrasónico y teniendo en cuenta el criterio de clasificación propuesto por Malhotra, los concretos fabricados en este trabajo de investigación corresponden a concretos de buena calidad. [67]

#### **4.4.3.1 Influencia del Tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico**

La velocidad de pulso ultrasónico para todas las mezclas fabricadas aumentó a medida que se avanzó en el tiempo de curado, lo cual está de acuerdo con lo consultado en la bibliografía [32]. (Ver Figura 21)

Para las siete mezclas de concreto fabricadas. Para las probetas de concreto de Referencia y de humo de sílice, las edades cortas de curado (3-14 días) influyen de manera significativa en la velocidad de pulso ultrasónico, mostrando

variaciones importantes durante este periodo. Para las mezclas que contienen escoria, son fundamentales los tiempos de curado que van desde el día 3 a 7 y 21 a 28, presentando los mayores incrementos en estos periodos de curado.

Los errores más altos en las medidas de velocidad de pulso ultrasónico, se encontraron en el día de curado 3, especialmente para P1 con un promedio de 2,588% de error entre las lecturas. En general, para todas las medidas de velocidad de pulso ultrasónico, los porcentajes de error no superaron el 3%, lo cual indica que los valores de tiempo de vuelo registrados, son altamente confiables.

#### **4.4.4 Evaluación de la resistencia a la compresión**

Según los resultados mostrados en la Tabla 13 y en la Figura 22, los valores más altos de resistencia a la compresión se registraron para las probetas P2 después del día 3 de curado, gracias a que el humo de sílice contribuye, no solo a disminuir la porosidad, generando un concreto más compacto, sino que además posee propiedades cohesivas que ayudan a la compactación y durabilidad del concreto, permitiendo obtener resistencias mayores a las que tiene normalmente un concreto sin esta adición. [61]

Las probetas P4 también presentaron resistencias a la compresión superiores a las que mostraron las probetas de Referencia, pero no superan las resistencias obtenidas para P2. El incremento de la resistencia con respecto al tiempo de curado, para la mezcla P4 es muy rápida, especialmente entre los días de curado de 3 a 21. Después del día 21 la resistencia tiende a mantenerse constante.

Las probetas P3, registraron resistencias menores que las probetas P1. El incremento de la resistencia con respecto al tiempo de curado para las probetas P3 fue más evidente en edades tempranas (3-14 días de curado).

Las mezclas P5, P6 y P7 fueron las que mostraron las menores resistencias debido a su mayor contenido de escoria con respecto a las mezclas P1, P2, P3 y P4. A mayor contenido de escoria se presentaron menores resistencias para un periodo de curado de 28 días. Sin embargo, los posibles efectos en la resistencia para probetas con altos contenidos de escoria se podrían observar más a largo plazo y no en edades tempranas de curado (edades mayores a 28 días).

Se observó una disminución en la resistencia a la compresión para las probetas a medida que se aumentó el porcentaje de escoria (Figura 10). La escoria no contribuyó a mejorar la resistencia a la compresión de las probetas de concreto, comparados con P1 ó probetas de Referencia, para el periodo de curado evaluado en este trabajo de investigación (28 días).

En el día 3 todas las probetas adicionales presentaron una disminución de la resistencia a la compresión respecto a la resistencia obtenida para las probetas de Referencia en ese día de curado, esto se debió a que las probetas que contenían una o mezcla de las dos adiciones, requirieron por lo menos de 7 días de curado, para que desarrollaran una mínima resistencia a la compresión. [64]

Con base en los resultados de resistencia a la compresión, obtenidos en este trabajo, se determinó que los concretos fabricados con las mezclas P1, P3, P4, P5, P6 y P7, presentaron una resistencia normal. Las probetas de concreto fabricadas con la mezcla P2, corresponde a un concreto de alta resistencia, debido a que en el día 28 de curado, la resistencia a la compresión es mayor a 42 MPa. [65]

**Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión para las mezclas en los días de curado de curado evaluados.**

<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)</b>							
<b>TIEMPO DE CURADO (DÍAS)</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>
	<b>Referencia</b>	<b>10% humo sílice</b>	<b>10% escoria</b>	<b>10%hs-10%esc</b>	<b>10%hs-20%esc</b>	<b>10%hs-30%esc</b>	<b>10%hs-40%esc</b>
<b>3</b>	20,116	18,608	11,455	14,469	14,224	6,672	6,395
<b>7</b>	22,004	28,674	19,883	26,426	12,964	8,427	8,557
<b>10</b>	21,853	31,504	24,767	32,145	14,942	15,946	12,044
<b>14</b>	30,419	40,304	30,486	35,963	19,792	17,014	12,175
<b>21</b>	33,248	43,424	29,855	39,161	25,347	26,417	16,275
<b>28</b>	34,698	44,743	31,419	39,067	26,542	25,478	20,544

Fuente. Las autoras.

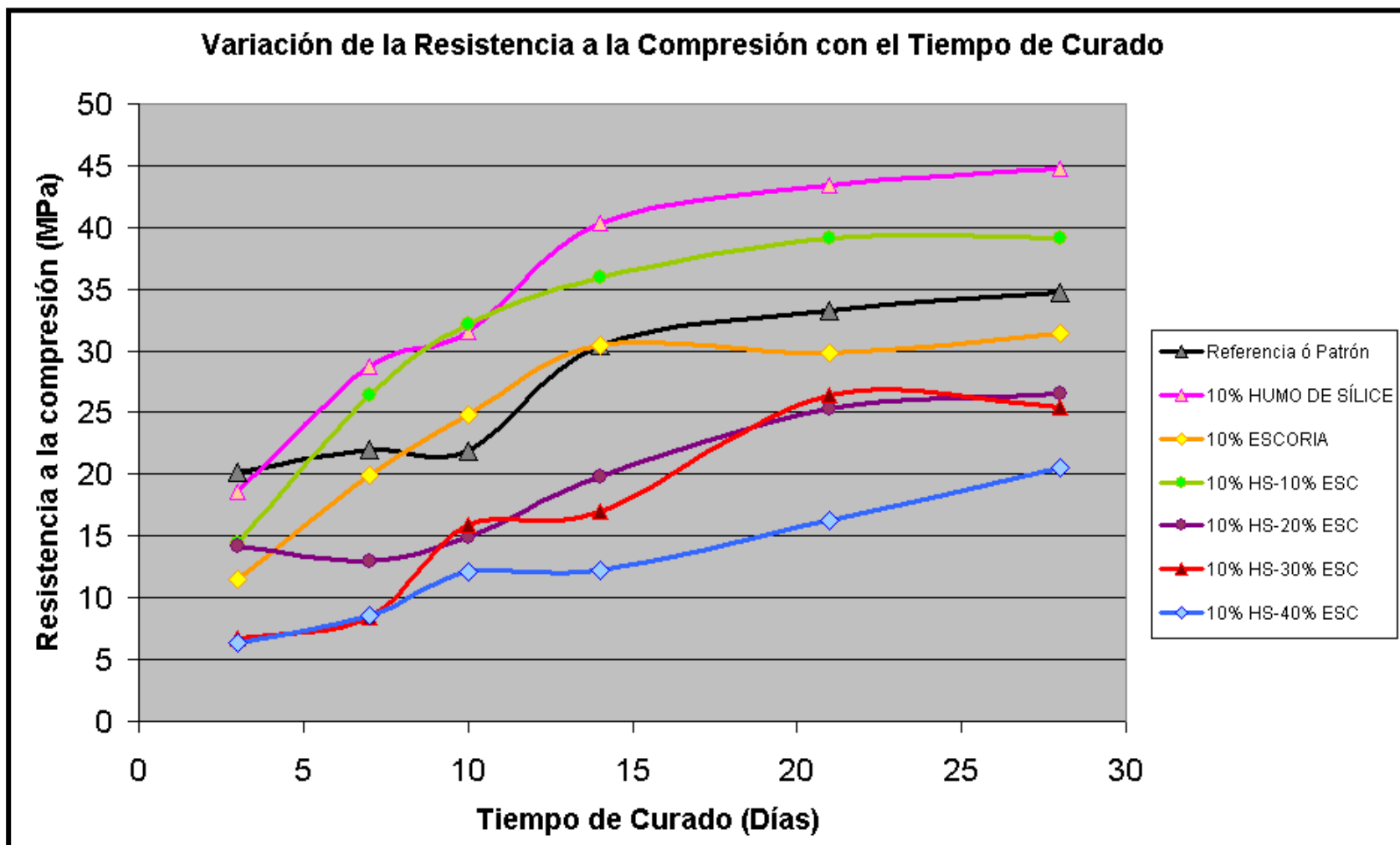


Figura 22. Resistencia a la compresión Vs. Tiempo de Curado.

Fuente. Las autoras.

#### **4.4.4.1 Influencia del Tiempo de curado en la resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión para todas las mezclas de concreto evaluadas creció con el aumento del tiempo de curado. Las mayores resistencias para todas las mezclas se alcanzaron en un periodo de curado de 28 días. El crecimiento de la resistencia a la compresión fue diferente para cada mezcla y éste depende del contenido de adiciones: El concreto con adición de humo de sílice, desarrolló resistencias a edades de curado entre los días 7 a 21.

La adición de escoria no contribuyó al aumento de la resistencia, durante el periodo de curado evaluado y solo ayudó a la disminución de la porosidad, comportándose casi como un agregado. Las resistencias alcanzadas de las probetas P5, P6, y P7 en un tiempo de 28 días de curado, son menores que la mezcla P1 ó Referencia. En la Figura 22, se observó que las mezclas adicionadas con humo de sílice y escoria, desarrollaron mayores crecimientos en la resistencia en los días 10 a 21 de curado, lo cual corresponde a la influencia que ejerció el humo de sílice en éstos concretos.

Se calculó el porcentaje de error de las medidas de resistencia, ensayando tres probetas de la misma mezcla en el día de curado 28. El mayor valor de porcentaje de error, se presentó para los concretos de la mezcla P7. El valor obtenido fue de 8,02% y es superior al que indica la norma ASTM C 39 [56], lo cual estuvo acompañado de alta variabilidad en los valores de resistencia a la compresión obtenidos para estas probetas, debido posiblemente al alto porcentaje de cemento que ha sido reemplazado, lo cual no permite que se obtenga un concreto tan compacto. Por tal motivo los concretos fabricados con la mezcla P7 mostraron una resistencia a la compresión menor que la resistencia encontrada para P1.

#### 4.4.4.2 Forma de fractura de las probetas

En la mayoría de las probetas se presentó una fractura cónica; sin embargo, también se presentaron otros tipos de fallas como la cónica dividida, transversal e irregular. La fractura cónica y dividida se presentó en un total de cuatro probetas (una de P6 y tres de P7) debido a que la cara de aplicación de carga presentaba una leve convexidad y había presencia de rugosidades ó residuos del material en las almohadillas. La fractura irregular se observó en dos probetas (una de Referencia y una de P3) debido a una distancia del eje central de la carga aproximadamente de 4 mm. En 2 Probetas (una de P2 y una de P3) se presentó la falla transversal y ocurrió porque la cara de aplicación de carga se encontraba al límite de tolerancia (Ver Figura 23). Las probetas que presentaron fallas diferentes a la cónica, fueron reemplazadas por otras probetas de la misma mezcla y periodo de curado, con el fin de obtener un valor más confiable de resistencia a la compresión.



a) Cónica y dividida b) irregular c) transversal

**Figura 23. Forma de fractura de las probetas en el ensayo de resistencia a la Compresión.**

Fuente. Las autoras.

#### 4.4.5 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión

Con base en los datos encontrados en la presente investigación se estableció una relación entre la velocidad de pulso ultrasónico ( $V_c$ ) y la resistencia a la compresión en un concreto ( $f'_c$ ) de tipo exponencial como se indica en la ecuación 5: [66]

$$f'_c = Ae^{bV_c} \quad (5)$$

Donde

$f'_c$ = Resistencia a la compresión. (MPa)

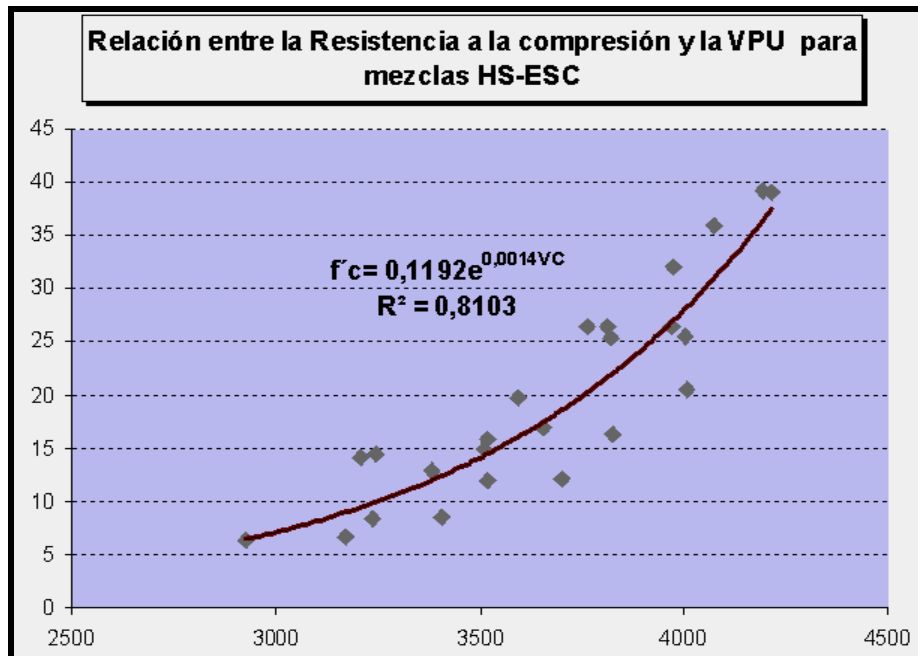
$A, b$ =Constantes.

$V_c$ =Velocidad de pulso ultrasónico. (m/s)

Los modelos de correlación entre las variables estudiadas en este trabajo, se establecieron para un periodo de curado máximo de 28 días, en condiciones estándar de temperatura y humedad (temperatura ambiente: 23-25° C y 100% humedad).

En la Figura 24, se observa la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, para las probetas que fueron fabricadas con mezcla de humo de sílice y escoria siderúrgica (P4, P5, P6 y P7). Esta correlación permite estimar de un manera aproximada, un modelo ajustado, para un concreto adicionado con 10% humo de sílice y 10%-40% de escoria siderúrgica.

El coeficiente de determinación:  $R^2$ , tiene un valor de 0,8103, esto significa que 81,03 % de la variación en los valores de resistencia a la compresión se explican por la relación exponencial dada por la ecuación 6, registrada en la Tabla 14.

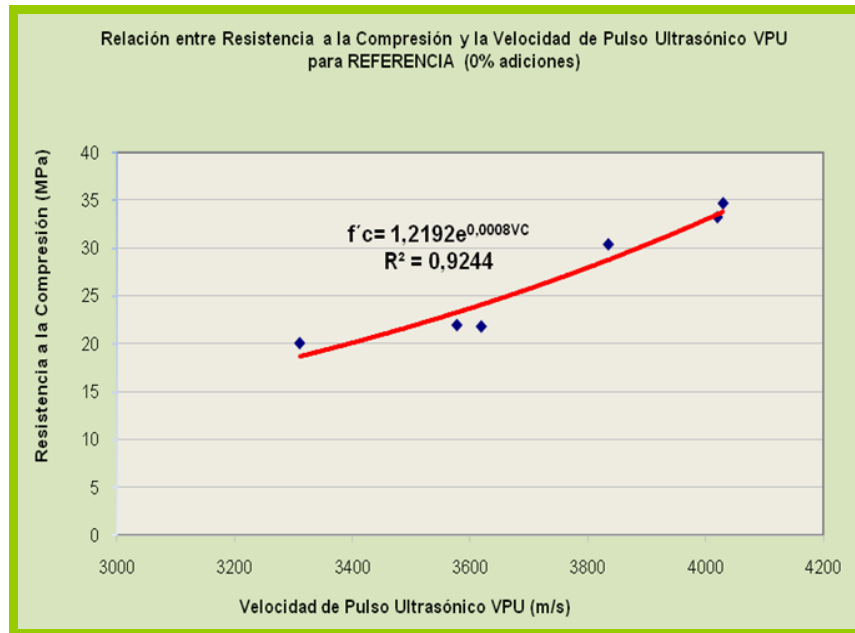


**Figura 24. Correlación entre la V.P.U. y la R.C. para las mezclas de Humo de sílice y Escoria.**

**Fuente. Las autoras.**

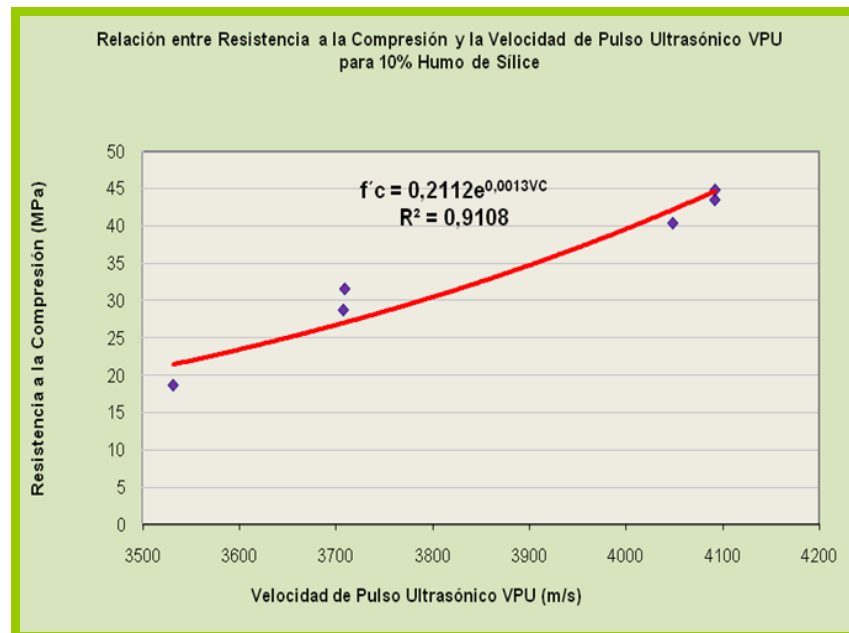
En las Figuras 25 a 31 se presentan los modelos de correlación de manera independiente, de los concretos fabricados en esta investigación, encontrándose para todos los casos comportamiento de tipo exponencial.

Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y las ecuaciones de los modelos ajustados para los concretos estudiados, bajo las condiciones establecidas, se presentan detalladamente en la Tabla 14.



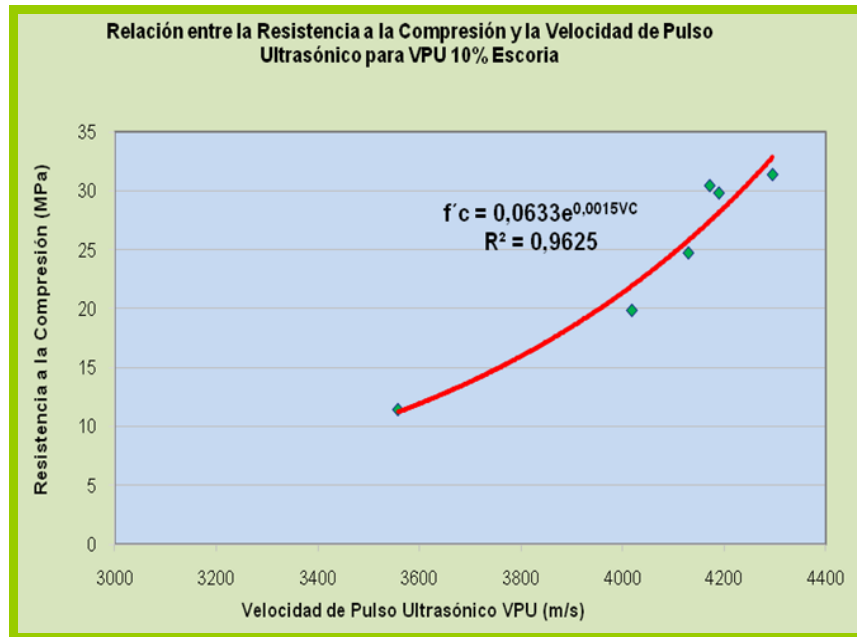
**Figura 25. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P1 (Referencia).**

Fuente. Las autoras.



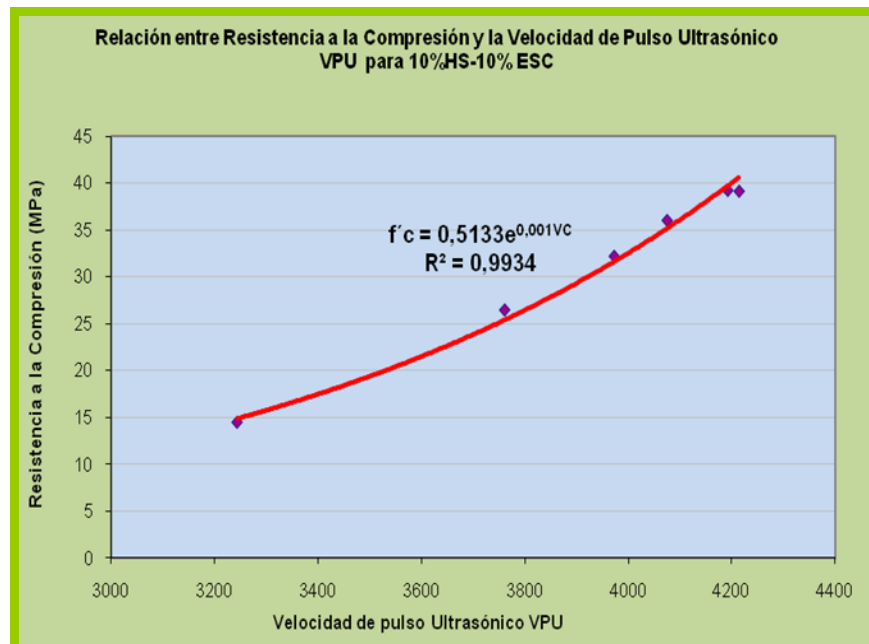
**Figura 26. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P2 (10% humo de sílice).**

Fuente. Las autoras.



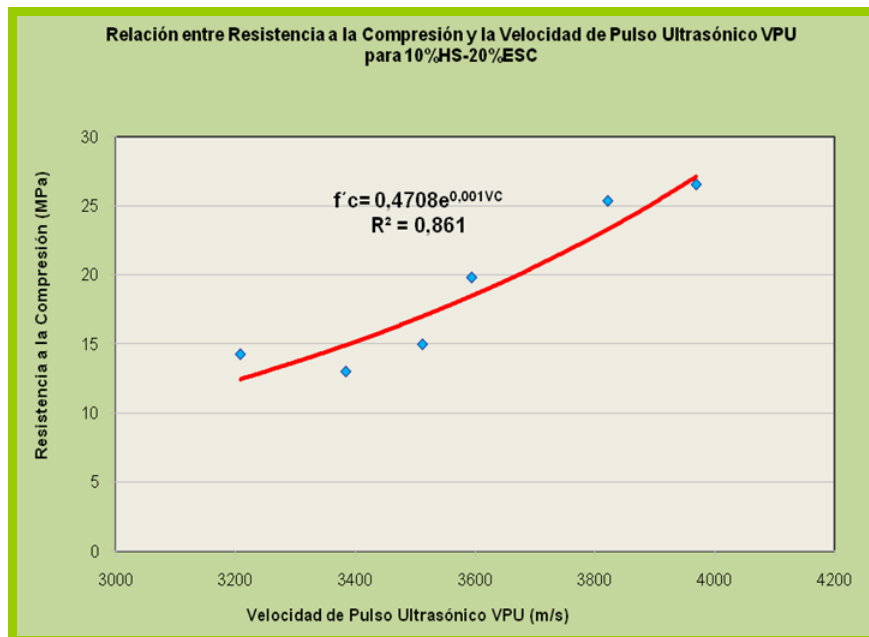
**Figura 27. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P3 (10% escoria).**

Fuente. Las autoras.



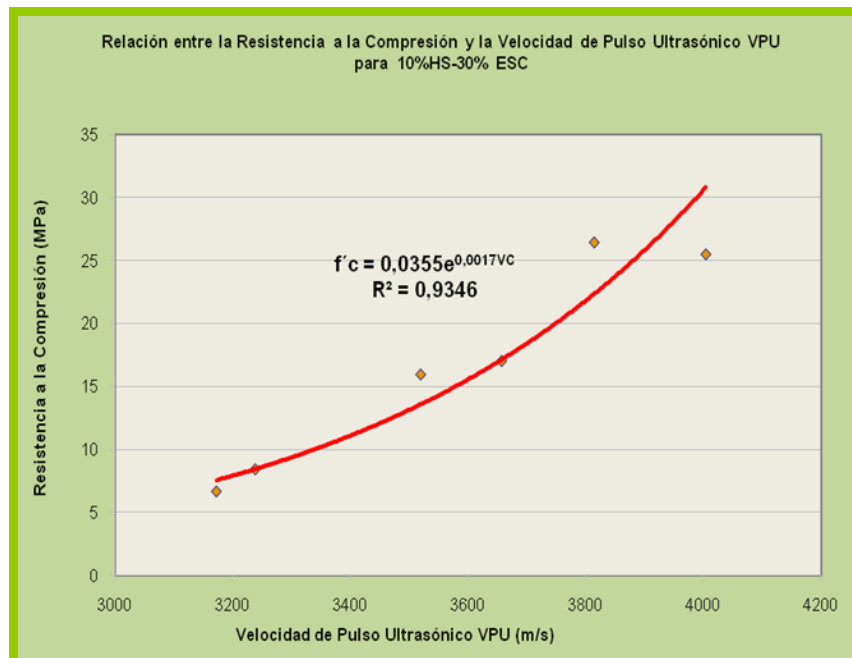
**Figura 28. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P4 (10% humo de sílice-10% escoria).**

Fuente. Las autoras.



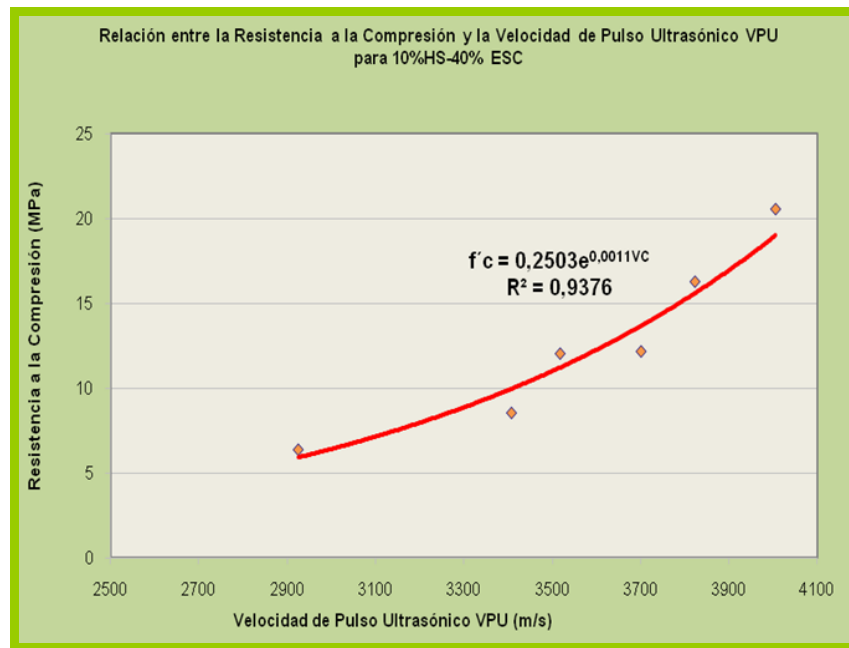
**Figura 29. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P5 (10% humo de sílice-20% escoria).**

Fuente. Las autoras.



**Figura 30. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P6 (10% humo de sílice-30% escoria).**

Fuente. Las autoras.



**Figura 31. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión para P7 (10% humo de sílice-40% escoria).**

Fuente. Las autoras.

**Tabla 14. Modelos determinados para las mezclas de concreto fabricadas.**

MEZCLA	Nº Ecuación	MODELO	Coefficiente de determinación (%)
Mezclas de hs-esc (General)	6	$f'c = 0,1192e^{0,0014Vc}$	81,03
P1: Referencia	7	$f'c = 1,2192e^{0,0008Vc}$	92,44
P2: 10% humo de sílice	8	$f'c = 0,2112e^{0,0013Vc}$	91,08
P3: 10% escoria	9	$f'c = 0,0633e^{0,0015Vc}$	96,25
P4: 10% hs-10% esc.	10	$f'c = 0,5133e^{0,001Vc}$	99,34
P5: 10% hs-20% esc.	11	$f'c = 0,4708e^{0,001Vc}$	86,1
P6: 10% hs-10% esc.	12	$f'c = 0,035e^{0,0017Vc}$	93,46
P5: 10% hs-10% esc.	13	$f'c = 0,2503e^{0,0011Vc}$	93,76

Fuente. Las autoras.

#### 4.4.6 Análisis estadístico

Las gráficas que se presentan en éste análisis, fueron realizadas con ayuda del software estadístico **Statgraphics Centurion XV versión 15.2.06**, en el cual se hizo una regresión exponencial con los valores obtenidos para cada mezcla fabricada, con un nivel de confianza de 99%. Los modelos de la correlación entre las variables y los límites de predicción (líneas negras en las gráficas) obtenidos a partir de éste paquete estadístico son presentadas a continuación. (Ver Figura 32)

En la Tabla 1 presentada en el anexo I se exponen los intervalos de confianza, que son los límites internos en las gráficas. Los resultados demuestran que la localización de la línea que ha sido estimada para la muestra de datos dada, es bastante confiable.

Los límites de predicción son registrados también en la Tabla 1 del anexo I. En ella se muestra una predicción, para cada mezcla, donde puede caer una nueva observación, que variará alrededor de la línea verdadera. Se encontró que los valores de los límites de predicción son buenos, para todas las mezclas de concreto fabricadas. En la Figura 32, se observan los modelos de correlación entre las variables estudiadas, además de los intervalos de confianza para estos modelos.

Las ecuaciones de los modelos de correlación entre VPU y RC que se obtuvieron con el software estadístico, además de los parámetros de dichos modelos, se presentan en la Tabla 15. En la Tabla 2 del anexo I, se presenta el resumen estadístico determinado con ayuda del software estadístico.

**Tabla 15. Modelos determinados con el Software estadístico para las mezclas fabricadas.**

Mezcla	Nº ecuación	Modelo	Intercepto	Pendiente	Coefficiente de correlación	R Cuadrada	Error estándar	Error absoluto
P1	14	$f'c = \exp(0,198176 + 0,000824246 * Vc)$	0,198176	$0,000824_2$	0,9615	92,44	0,074119	$0,052997_6$
P2	15	$f'c = \exp(-1,55489 + 0,00130843 * Vc)$	-1,55489	$0,001308_4$	0,9543	91,08	0,111574	$0,071562_8$
P3	16	$f'c = \exp(-2,75962 + 0,00130843 * Vc)$	-2,75962	$0,001455_2$	0,9811	96,25	$0,084164_8$	$0,061366_5$
P4	17	$f'c = \exp(-0,666899 + 0,001037224 * Vc)$	-0,666899	$0,001037_2$	0,9967	99,34	$0,034546_1$	$0,026298_5$
P5	18	$f'c = \exp(-0,753331 + 0,00102099 * Vc)$	-0,753331	$0,001020_9$	0,9279	86,10	0,128292	$0,095721_7$
P6	19	$f'c = \exp(-3,33846 + 0,00168998 * Vc)$	-3,33846	$0,001689_9$	0,9667	93,46	0,16213	0,108731
P7	20	$f'c = \exp(-1,38518 + 0,00108094 * Vc)$	-1,38518	$0,001080_9$	0,9683	93,76	0,117895	0,089508

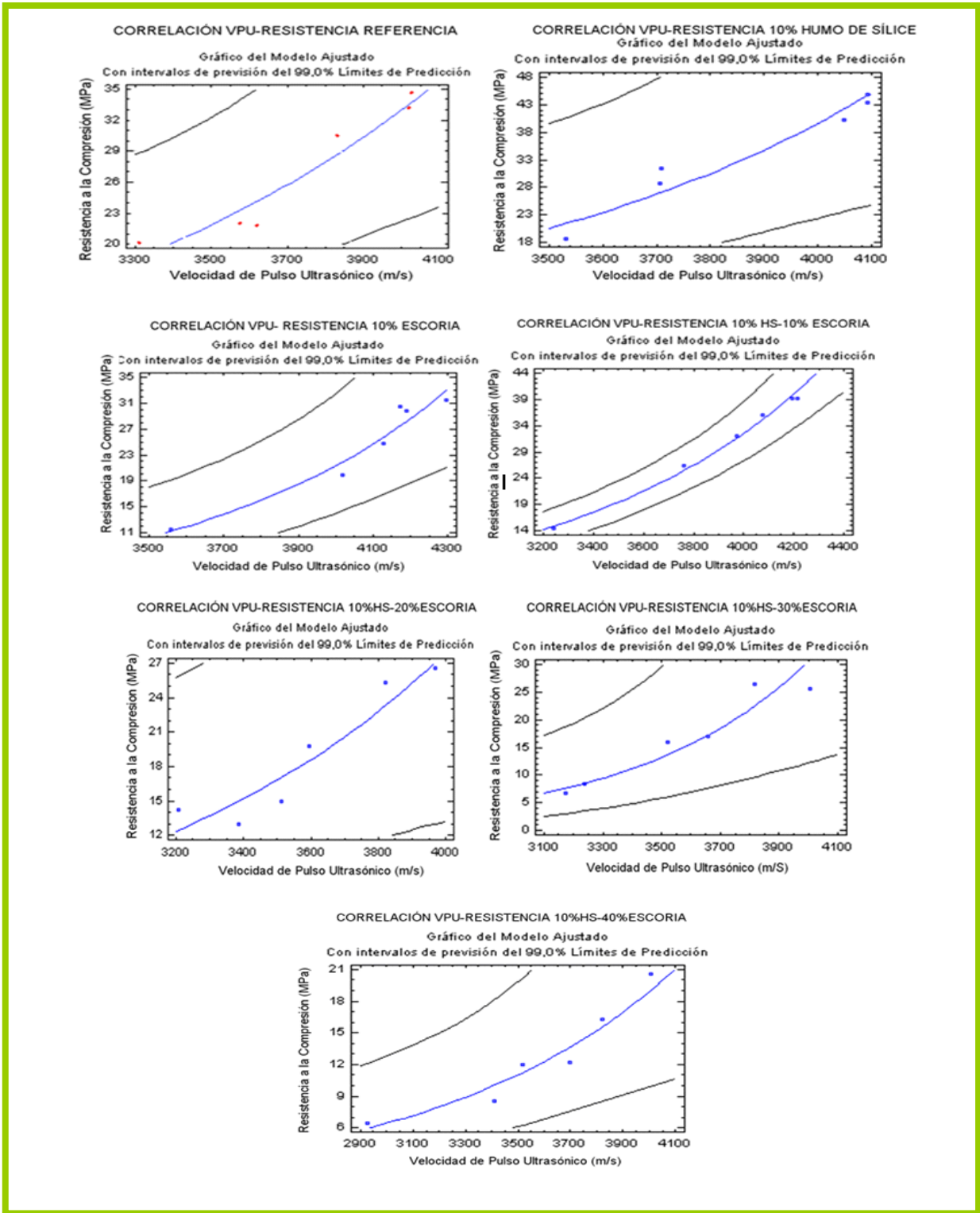
Fuente. Las autoras.

El ancho de la banda o del intervalo depende del tamaño de la muestra y del coeficiente de correlación. Si se evaluaran más días de curado, el tamaño de la muestra “n” sería mayor y consecuentemente éstos límites de confianza se harían más delgados.

A medida que el intervalo de confianza se hace más amplio se tendrá mayor posibilidad de acertar; sin embargo, un intervalo más delgado como el encontrado para P3 y P4, muestra una estimación más precisa y las posibilidades de error son mucho mayores. Los límites de confianza para estos modelos, son bastante amplios lo que garantiza que las posibilidades de acierto son buenas. Los intervalos de confianza (líneas negras) para P4 (Ver Figura 31-d), son más estrechos comparados con los demás modelos determinados, lo que indica que las posibilidades de errar, son mayores.

Las resistencias a la compresión calculadas con los modelos establecidos con ayuda del software estadístico son bastante confiables a pesar de las diferencias con los modelos determinados inicialmente. En la Tabla 1 mostrada en el anexo I, se establecen algunos resultados para resistencias, tomando valores aleatorios de V.P.U. para los modelos de correlación encontrados.

La mayor variación para los valores de resistencia determinados con los dos modelos, se encontró para la mezcla P4, con una diferencia de 7,4438 MPa ( $V_c=4300$  m/s). Estas resistencias se calcularon mediante el reemplazo de valores de velocidad de pulso ultrasónico ( $V_c$ ). En la mezcla P3, también se encontró una diferencia significativa de 6,9974 MPa para un valor de  $V_c=4400$  m/s. (Ver Tabla 1 en el anexo I).



a) P1, b) P2, c) P3, d) P4, e) P5, f) P6 y g) P7

**Figura 32. Gráficas de los límites de Confianza y límites de predicción.**

**Fuente. Las autoras.**

## 5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados encontrados para los concretos con una relación agua-cemento (A/C) de 0,45 y adicionados con humo de sílice y escoria siderúrgica, se puede concluir que:

- Las probetas de concreto adicionadas con mezcla de humo de sílice y escoria siderúrgica, esta última en mayor proporción que el humo de sílice (P5, P6 y P7), mostraron valores de velocidad de pulso ultrasónico menores a los obtenidos para el concreto de Referencia (P1), debido a la disminución de material aglutinante que permite la cohesión de las partículas y la buena compactación, que normalmente le proporciona el cemento al concreto ordinario.
- La adición de 10% de humo de sílice (P2) en el concreto aumentó la velocidad de pulso ultrasónico un 1,559% e incrementó la resistencia a la compresión en comparación con las probetas de Referencia (P1) en un 28,931% para el día 28 de curado. Las resistencias más altas se obtuvieron para los concretos con esta mezcla y este material corresponde a un concreto de alta resistencia. La adición de 10% de escoria (P3) en el concreto aumentó la velocidad de pulso ultrasónico en 6,619% y disminuyó la resistencia a la compresión, en comparación con las probetas de referencia (P1) un 9,451%, para el día 28 de curado. Se concluye entonces que la escoria siderúrgica tiene un mejor comportamiento que el humo de sílice como relleno, pero es el humo de sílice el que contribuye al aumento de la resistencia a la compresión de los concretos evaluados.
- Los valores de velocidad de pulso ultrasónico para los concretos evaluados en esta investigación aumentaron con el tiempo de curado. El incremento en la velocidad de pulso ultrasónico para edades de curado entre los días 3 a 14, es grande para todos los concretos estudiados.

- Las reducciones de resistencia a la compresión de las probetas de concreto adicionadas con mezcla de humo de sílice y escoria, correspondientes a P5, P6 y P7, con respecto a los valores de resistencia de las probetas de Referencia en el día 28 de curado, son de 23,507%, 26,572%, 40,791% respectivamente. Esto muestra que las proporciones de adición de escoria siderúrgica estudiadas, mayores del 10%, afectaron drásticamente la resistencia a la compresión del material, debido a que se sustituyó el cemento por una escoria que tuvo simplemente una función de relleno y se comportó de manera similar que un agregado.
- El aumento de la resistencia a la compresión debido al avance del tiempo de curado fue alto para todas las probetas de concreto fabricadas; sin embargo para las probetas de concreto P1 a P5, las resistencias a la compresión registradas en los días 21 y 28 de curado, no mostraron una variación significativa.
- Los modelos de correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, de los concretos fabricados con mezcla de adiciones minerales de humo de sílice y escoria siderúrgica, son de forma exponencial y presentan coeficientes de determinación bastante confiables.
- Los intervalos de confianza determinados para las mezclas P3 y P4 son los más estrechos, debido a una estimación más precisa y a un mayor ajuste de los modelos de los resultados obtenidos para velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión. Esto hace que se aumente la posibilidad de error ante una nueva evaluación. Las demás mezclas presentaron intervalos de confianza más amplios lo cual garantiza que las posibilidades de acierto son buenas.

## 6. RECOMENDACIONES

- Es recomendable para la fabricación de las probetas utilizar un tamaño máximo de agregado grueso menor que  $\frac{3}{4}$ " y de forma esférica; de esta manera se podrían obtener mayores valores de velocidad de pulso ultrasónico y de resistencia a la compresión, generar concretos más fluidos en estado fresco, más compactos en estado endurecido y de mejor calidad.
- Es conveniente antes de agregar la escoria siderúrgica a la mezcla, tamizarla y utilizarla muy fina, con el fin de obtener un mejor comportamiento de los concretos en las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, evitando que se introduzcan en las probetas aglomeraciones de escoria y residuos metálicos que consecuentemente podrían afectar los resultados de las pruebas.
- Un análisis granulométrico de la escoria podría ser útil para elegir un tamaño con el cual se desea trabajar y así garantizar que todas las probetas sean adicionadas con una porción de escoria de similares características y del mismo tamaño de partícula. Además, se recomienda hacer una separación de las partículas de escoria y las partículas de metal, debido a que éstas últimas, afectan la lectura del ultrasonido.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SOLÍS, Rómel G., MORENO, Erick Iván y CASTILLO, William R. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Revista técnica de Ingeniería. Volumen 8, N° 002. Universidad Académica de Yucatán". México. 2004. p 41-50.
- [2] SÁNCHEZ DE GUZMAN, Diego. Colección básica del concreto. Volumen 4. Concretos y morteros, manejo y colocación en obra. Instituto del concreto. Asociación colombiana de productores de concreto, asocreto. Bhandar Editores LTDA. 2006 p 67.
- [3] GONZÁLEZ-ISABEL. Hormigón de alta resistencia. Instituto técnico de materiales y construcciones. Grafman S.A. Madrid. 1993. p. 75.
- [4] \_\_\_\_\_. ASTM C150/C150M – 09 (2010). Standard Specification for Portland cement. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [5] SÁNCHEZ DE GUZMAN, Op. Cit., p. 64.
- [6] MORAGUES, Amparo. Procesos de Hidratación del cemento Pórtland microestructura del hormigón. E.T.S.I. Caminos, canales y puertos. Disponible en: <http://prt2.uprm.edu/Microestructura.pdf>. Visitada en mayo de 2011.
- [7] Microestructura del cemento. Disponible en: [www.uprm.edu/.../Microestructura%20del%20cemento.pdf](http://www.uprm.edu/.../Microestructura%20del%20cemento.pdf) - Puerto Rico. (Abril de 2011)
- [8] Instituto del concreto. Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades. Volumen 1. Asociación colombiana de productores de concreto, asocreto. 2000 p 41.
- [9] Hidratación del cemento Pórtland. Lección 7. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>. (Marzo de 2011).
- [10] SÁNCHEZ DE GUZMAN, Op. Cit., p.14.

- [11] ROCAS & DESIG. Hormigón para la Construcción con Hormigón proyectado de paisajes rocosos. Disponible en: <http://www.rocas-design.com/rocasystem/index.aspx?id=948>. (Marzo de 2011).
- [12] Instituto del concreto, Op. Cit., Cap. 5.
- [13] \_\_\_\_\_. ASTM C 33/C33M – 08 (2010). Standard Specification for Concrete Aggregates. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [14] \_\_\_\_\_. ASTM C494/C494M. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [15] GONZÁLEZ-ISABEL. Op. Cit., pp. 59-70.
- [16] BRAVO, Ernesto F. e CORNEJO, Antonio E. Cemento Portland. Disponible en: <http://civilgeeks.com/blog/page/62/>. (Marzo de 2011).
- [17] ACI 234R. Guide for the Use of silica fume in concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [18] GONZÁLEZ-ISABEL. Op. Cit., p. 73.
- [19] SFA-Silica fume association. Silica Fume User's Manual. Disponible en: <http://www.silicafume.org/pdf/silicafume-users-manual.pdf>. (Febrero de 2010).
- [20] \_\_\_\_\_. ASTM C1240 – 05 (2010). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [21] NAIK, Tarun R., MALHOTRA, Mohan y POPOVICS, John S. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. Disponible en: <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781420040050.ch8>. (Abril de 2011).
- [22] GONZÁLES DE LA CORETA, Manuel. Cemento Pórtland de escoria. ITINTEC. Disponible en: [http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/construccion/normalizacion/MGC3\\_8\\_portland\\_escoria.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/construccion/normalizacion/MGC3_8_portland_escoria.pdf). (Marzo de 2011).
- [23] SALAZAR JARAMILLO, Alejandro. Estudio de la durabilidad de concretos adicionados con escoria siderúrgica, con diferentes formas de curado.

CORPORACIÓN CONSTRUIR DIRECTOR I & D. disponible en: [http://www.ecoingenieria.org/docs/Estudio\\_Durabilidad\\_Concretos\\_Adicionados.pdf](http://www.ecoingenieria.org/docs/Estudio_Durabilidad_Concretos_Adicionados.pdf) f. (Abril de 2011).

[24] Instituto del concreto. Op. Cit., pp. 123-124.

[25] NILSON, Arthur M. Diseño de estructuras del concreto. Duodécima edición. MCGRAW-Hill. Santa fe de Bogotá. 2000. Cap IV.

[26] SÁNCHEZ DE GUZMAN, Instituto del concreto. Op. Cit., pp. 126-133.

[27] \_\_\_\_\_. ASTM C597 – 09 (2010). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.

[28] MALHOTRA V. M. Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources. Ottawa, Canada. September. 2002.

[29] SOLÍS, Op. Cit., p. 42.

[30] ATUESTA ESPARZA, Javier y ARIZA DÍAZ, Diana. 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. Trabajo de grado. [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.P 44.

[31] TURKMEN, Ibrahim. Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag. Ataturk University. Department of Civil Engineering. 2003.

[32] CALDARONE, Michael A. High-Strength concrete a practical guide. USA. 2009. Disponible: <http://www.gmirza.com/High%20Strength%20Concrete%20-%20A%20Practical%20Guide.pdf>. Visitada en marzo de 2011.

[33] ACI 214. Recommended practise for evaluation of strength test results of concrete. American concrete Institute. Farmington Hill MI. 1997.

[34] SÁNCHEZ DE GUZMAN, Op. Cit., p. 138.

[35] \_\_\_\_\_. NTC 30. Cemento Pórtland. Clasificación y nomenclatura.

[36] \_\_\_\_\_. NTC 121. Ingeniería Civil y arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas.

- [37] \_\_\_\_\_. NTC 321. Ingeniería Civil y arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas.
- [38] \_\_\_\_\_. NTC 221. Ingeniería Civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [39] \_\_\_\_\_. NTC 176. Ingeniería Civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [40] \_\_\_\_\_. ASTM C 127-07. Standard Test Method for Density, Relative Density (specific gravity), and absorption of Coarse Aggregate. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [41] \_\_\_\_\_. NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [42] \_\_\_\_\_. ASTM C 29/ C29 M-09. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregates. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [43] \_\_\_\_\_. NTC 77. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), análisis granulométrico. NTC-Norma Técnica colombiana.
- [44] \_\_\_\_\_. NTC 237. Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [45] \_\_\_\_\_. ASTM C 128-07-a (2010). Standard Test Method for Density Relative (Specific Gravity), and Absorption of fine Aggregate. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [46] \_\_\_\_\_. NTC 78 (1995). Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [47] \_\_\_\_\_. ASTM C 136-06 (2010). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.

- [48] \_\_\_\_\_. NTC 127. Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.
- [49] \_\_\_\_\_. NTC 3459. Concretos. Agua para la elaboración de concreto.
- [50] TOXEMET. EUCON MSA. Humo de Sílice para obtener concretos de alta resistencia. Disponible en: [http://www.toxement.com.co/pdf\\_2010/Eucon%20MSA.pdf](http://www.toxement.com.co/pdf_2010/Eucon%20MSA.pdf). 2009. visitada en febrero de 2011.
- [51] Ficha de datos de seguridad. Plastiment TM 20. Manual SIKA Colombia. Disponible en: [www.sika.com.co/print/co-ht\\_Plastiment\\_TM\\_20.pdf](http://www.sika.com.co/print/co-ht_Plastiment_TM_20.pdf). Visitada en febrero de 2011.
- [52] \_\_\_\_\_. ASTM C 1017/C1017M (2010). Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [53] \_\_\_\_\_. NTC 1377. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio.
- [54] \_\_\_\_\_. NTC 396. Ingeniería Civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [55] \_\_\_\_\_. NTC 1299. Concretos. Aditivos químicos para concretos. NTC-Norma Técnica Colombiana.
- [56] \_\_\_\_\_. ASTM C 39/C39M (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. United States. ASTM international-American Society for Testing and Materials.
- [57] \_\_\_\_\_. ASTM C 40/ C40M-11. Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [58] \_\_\_\_\_. ASTM C 989-10 (2010). Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars. United States. ASTM International-American Society for Testing and Materials.
- [59] Gonzáles de la Cotera, Manuel. La normalización del cemento Portland de escoria. Cemento Norte Pacasmayo. Disponible en:

[http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/construccion/normalizacion/MGC3\\_8\\_portland\\_escoria.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/construccion/normalizacion/MGC3_8_portland_escoria.pdf). (Febrero de 2011)

[60] GONZÁLES DE LA CORETA, Manuel. Adiciones minerales del cemento Pórtland. VI Congreso de Ingeniería Química. Asociación de productores de cemento. Disponible en: [www.asocem.org.pe/.../f.../Congreso%20de%20Ingenieria%20Quimica.pdf](http://www.asocem.org.pe/.../f.../Congreso%20de%20Ingenieria%20Quimica.pdf). (Febrero de 2011)

[61] SANCHEZ de ROJAS, M. FRÍAS y J. RIVERA. Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Vol 50. Nº 250. 2000. Disponible En: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/35695/1/435.pdf>. (Enero de 2011)

[62] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre resistencia a la compresión, porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2008. P 37.

[63] LÓPEZ OROZCO, Juan Orlando. Porosidad del concreto. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Civil. Enero de 2004. P 2-4.

[64] TURKMEN, Ibrahim. Relationship between destructive and non-destructive method of concretes containing natural zeolite and blast furnace slag. Ataturk University. Department of Civil Engineering. 2010.

[65] SÁNCHEZ DE GUZMAN, Op. Cit., p. 27.

[66] K. Tharmaratnam, B.S. Tan, Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar, Cem. Concr. Res. 20 (1990) p 335-345.

[67] DEMIRBOGA, Ramazan, TURKMEN, Ibrahim y KARAKOC, Mehmen. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. Ataturk University. Department of Civil engineering. 2004.

[68] Tecnoconcreto. S.A. Guía para el diseño de mezclas.

## ANEXOS

### ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA

Para una Relación Agua-Cemento de 0,45, se escogió un asentamiento de 5-10 Cm. por ser el más utilizado en concretos compactados a mano y un tamaño máximo del agregado grueso de  $\frac{3}{4}$ " (19,050 mm). En la tabla 1 del presente anexo, se muestra los kilogramos necesarios, por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregado indicados. Posteriormente, se calculó haciendo la siguiente interpolación (Ecuación 1 anexo A):

$$y = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} (y_2 - y_1) + y_1 \quad (1)$$

**Tabla 1. Agua en Kilogramos por metro cúbico de concreto para el tamaño máximo de agregado.**

Concreto sin aire incluido		
Asentamiento (cm)	13 mm	20 mm
3 a 5	200	185
5 a 10	215	200
15 a 18	230	210
Contenido de aire (%)	2,3	2

Fuente. Tecnoconcreto. [58]

Interpolando:

$$X = 19 \quad X_1 = 13 \quad y_1 = 215 \quad X_2 = 20 \quad y_2 = 200$$
$$y = 202,13 \text{ Kg. De agua} \quad \text{aproximamos a } 200 \text{ Kg de agua}$$

Una vez se conoció la cantidad de agua y de acuerdo con la relación agua-cemento escogida, se aplicó la ecuación para calcular la cantidad de cemento en Kilogramos por metro cúbico de concreto.

$$c = \frac{a}{a/c} \quad (2)$$

Cemento= 200 / 0,45= 444,4 kg. De cemento

Volumen de cemento= 444,44 Kg./3.0 kg/m<sup>3</sup> = 148,15 litros

Para calcular el contenido de agregado grueso, se aplicó la ecuación:

$$b = (b/b_0) \times b_0 \quad (3)$$

El valor de  $b/b_0$  se encuentra en la Tabla 2 que se muestra en este anexo y depende del tamaño máximo del agregado en mm y el módulo de finura.

$b$  = volumen de agregado grueso por volumen unitario del concreto

$b_0$  = volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto

$b/b_0$ = relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

**Tabla 2. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.**

Tamaño máximo de agregado (mm)	Módulo de finura de la arena: 2,40
10	0.50
13	0,59
20	0,66
25	0,71
40	0,75
50	0,78
75	0,81
150	0,87

Fuente. Tecnoconcreto. [68]

Para obtener el valor de esta fracción se interpoló de la siguiente manera:

$$X = 19 \quad X_1 = 13 \quad y_1 = 0,50 \quad X_2 = 20 \quad y_2 = 0,66$$

$Y = 0,65$  para un módulo de finura de 2,4 y un tamaño máximo de 19,050 mm.

$$b = 0,65 \times 1589,98 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{ag} = \text{Volumen de agregado grueso} = 1033,491 / 2,672 = 386,785 \text{ litros}$$

Finalmente se calculó el contenido de agregado fino

$$V_{af} = 1000 - (V_a + V_c + V_{ag}) \quad (4)$$

$V_{af}$  = volumen de agregado fino

$V_a$  = volumen de agregado grueso

$V_c$  = volumen de cemento

$V_{ag}$  = volumen de agregado grueso

$W_{af} = V_{af} / (\text{densidad aparente})$

$$V_{AF} = 1000 - (200 + 148 + 387) = 265 \text{ litros}$$

Para obtener el contenido en Kilogramos de agregado fino se multiplica su volumen por su peso específico.

$$\text{Kg. De agregado fino} = 265 \times 2,747 = 727,955 \text{ Kg. de agregado fino}$$

**Tabla 3. Diseño de mezcla para un cilindro con un metro cúbico de concreto con una relación A/C de 0,45.**

Componentes	Peso (Kg)	Volumen (L)	%
Agua	202,13	200	8,34
Cemento Pórtland tipo I	444	146,53	18,51
Agregado fino	718,75	261,65	29,97
Agregado grueso	1033,49	386,79	43,09

Fuente. Las autoras.

Volumen de cada probeta =  $0,001571 \text{ m}^3$  (10x20 cm)

- Cemento= 697,52 gramos
- Agua= 314,2 mililitros
- Agregados grueso= 1623,61 gramos
- Agregado fino= 1143,69 gramos

Se agregó a la mezcla una pequeña cantidad de aditivo plastificante, que corresponde al 0,5% del peso del cemento.

- Plastificante = 3,4876 gramos ó 3,98 mililitros (Su peso específico es de 1.14 Kg/l)

La Tabla 4 de este anexo se registra las cantidades en Kilogramos que fueron necesarias para fabricar una probeta con un volumen de  $0,001571 \text{ m}^3$ . En la Tabla 5 de este anexo se muestra las cantidades de adiciones en Kilogramos necesarias para fabricar una probeta de concreto de cada mezcla.

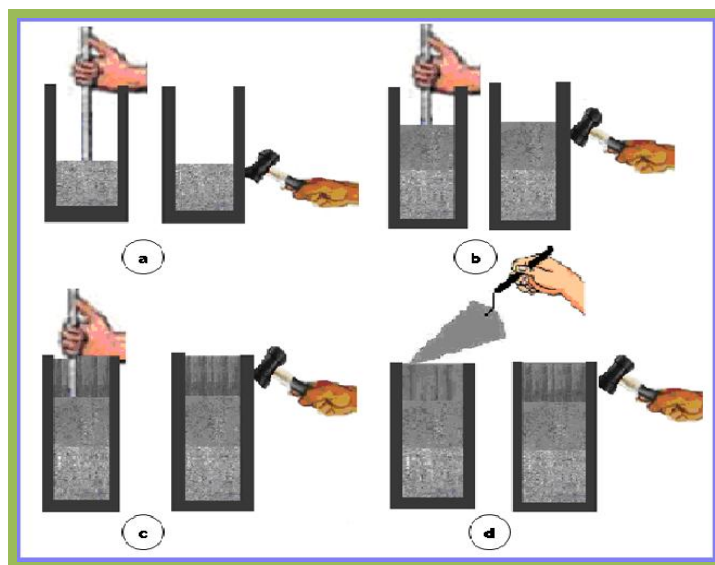


Figura 1. Proceso de elaboración de las probetas cilíndricas de concreto.

Fuente. Las autoras.

Tabla 4. Cantidades necesarias de cada componente para la fabricación de una probeta cilíndrica de concreto.

Mezcla	Componente	Agua (L)	CP. Tipo I (Kg)	AF. (Kg)	AG. (Kg)	Humo de sílice (Kg)	Escoria (Kg)	Plastificante (Kg)
	Adiciones							
P1	Referencia (0% adiciones)	0,3142	0,698	1,129	1,623	0	0	0,00349
P2	10% Humo de sílice	0,3142	0,6282	1,129	1,623	0,0698	0	0,00349
P3	10% Escoria	0,3142	0,6282	1,129	1,623	0	0,0698	0,00349
P4	10% HS-10% Escoria	0,3142	0,5584	1,129	1,623	0,0698	0,0698	0,00349
P5	10% HS-20% Escoria	0,3142	0,4886	1,129	1,623	0,0698	0,1396	0,00349
P6	10% HS-30% Escoria	0,3142	0,4188	1,129	1,623	0,0698	0,2094	0,00349
P7	10% HS-40% Escoria	0,3142	0,349	1,129	1,623	0,0698	0,2792	0,00349

Fuente. Las autoras.

**Tabla 5. Cantidades necesarias de adiciones para la fabricación de las probetas cilíndricas de concreto.**

Nombre	Mezcla	Peso Unitario Humo de Sílice (Kg)	Peso Unitario Escoria (Kg)	Peso Total de adiciones (Kg)	% Total de reemplazo del cemento
P1	Referencia	0	0	0	0
P2	10% Humo de sílice	0,0698	0	11,7264	10
P3	10% Escoria	0	0,0698	11,7264	10
P4	10% HS-10%Escoria	0,0698	0,0698	23,4528	20
P5	10% HS-20% Escoria	0,0698	0,1396	35,1792	30
P6	10% HS-30% Escoria	0,0698	0,2094	46,9056	40
P7	10% HS-40% Escoria	0,0698	0,2792	58,632	50

Fuente. Las autoras.

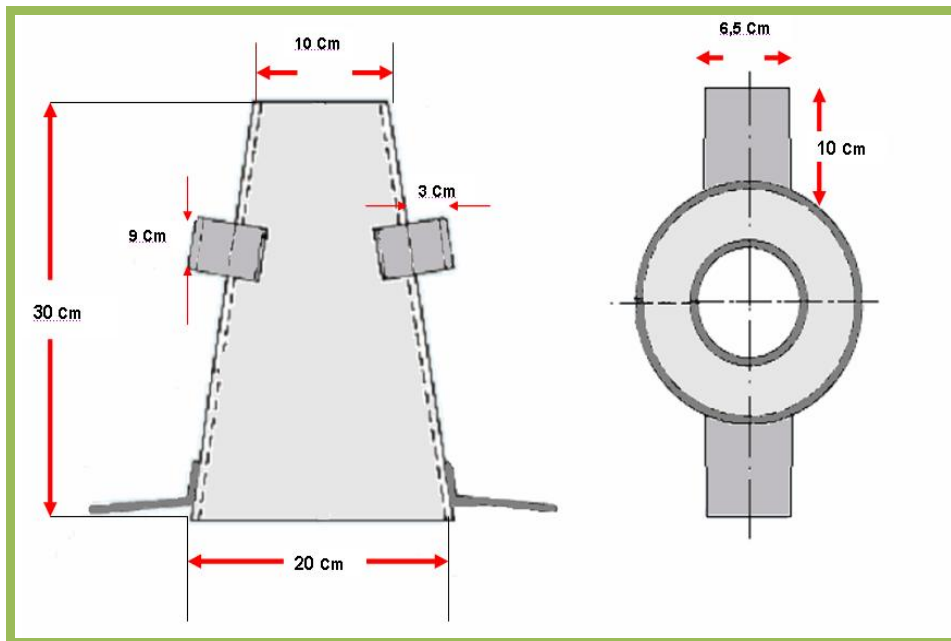
**Tabla 6. Distribución de las probetas fabricadas para cada mezcla.**

Mezcla	Número de probetas fabricadas para V.P.U.	Número de probetas fabricadas para R.C.*
P1: Referencia	24	25
P2: 10% Humo de sílice	24	25
P3: 10% Escoria	24	26
P4: 10% HS-10%Escoria	24	24
P5: 10% HS-20% Escoria	24	24
P6: 10% HS-30% Escoria	24	25
P7: 10% HS-40% Escoria	24	36
<b>TOTAL</b>	<b>168</b>	<b>185</b>

\* Se fabricaron más de 24 en algunas mezclas para repetir ensayos de Resistencia a la Compresión.

Fuente. Las autoras.

## ANEXO B. PROCESO DE MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO



**Figura 1. Dimensiones del Cono de Abrams.**

Fuente. Las autoras.

- **Procedimiento para medir el asentamiento de las mezclas de concreto.**
  1. Antes de preparar la mezcla se limpió el cono de Abrams y se humedeció un poco con agua. Se situó en una superficie plana y limpia de cualquier aspereza. Se sujetó firmemente las pestañas del cono y se llenó 1/3 del volumen del cono de Abrams.
  2. Se compactó el concreto desde la parte exterior hacia el centro con una varilla metálica de 60 cm de largo y 16 mm de diámetro de punta redondeada, golpeando uniformemente 25 veces.
  3. El proceso se repitió llenando el cono 2/3 de su volumen y compactando con la varilla metálica. posteriormente, se llenó el cono totalmente y se

compactó con la varilla metálica. Finalmente con un palustre metálico se removió el exceso de mezcla en la superficie y se niveló.

4. Se retiró cuidadosamente el cono y se colocó al revés, cerca de la mezcla de concreto.
5. Se puso la varilla sobre el cono de Abrams. Se midió el asentamiento con una cinta métrica. Se hicieron varias mediciones y se calculó la distancia promedio entre la varilla y la parte superior de la mezcla.

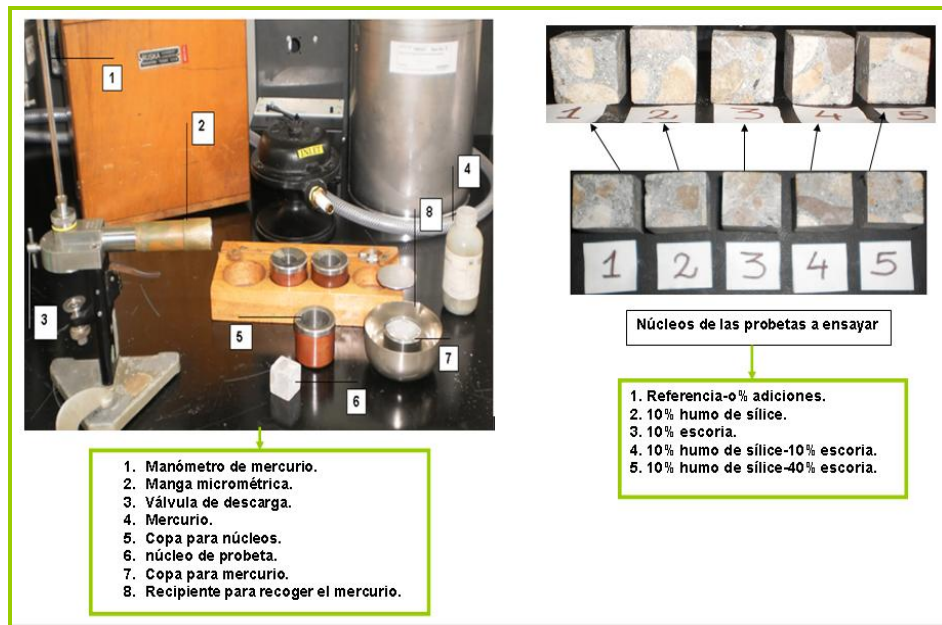
## **ANEXO C. POROSIDAD EFECTIVA.**

- **Procedimiento para medir la porosidad efectiva con el porosímetro de campo Ruska.**

Para la realización de esta prueba, se extrajo el núcleo de cada una de las cinco probetas, en forma de cubo y de dimensiones de 1 pulgada. El porosímetro cuenta con tres copas de núcleos de diferentes tamaños, de las cuales se utilizó la copa que se ajustaba a las medidas del espécimen (Ver Figura 1 del presente anexo). Esta copa se ajustó al porosímetro teniendo la válvula de descargue abierta. Posteriormente, se llevó la manga micrométrica a su posición inicial. Para la copa elegida, esta posición viene calibrada y fue 400. Una vez se realizó lo descrito anteriormente, se cerró la válvula de descargue y se llevó la manga micrométrica hasta cero, lentamente. El nivel alcanzado de mercurio, fue la referencia para las mediciones.

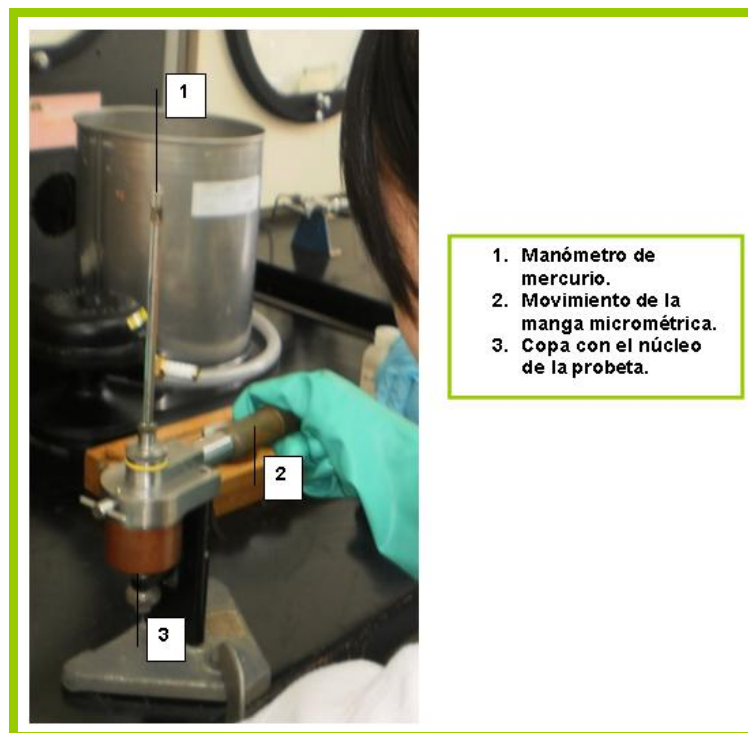
Para desmontar la copa, se llevó a su posición inicial la manga micrométrica y se abrió la válvula de descargue muy cuidadosamente. Seguidamente, se introdujo el núcleo correspondiente a la probeta de Referencia (P1), se montó la copa y se cerró la válvula de descargue. Se desplazó nuevamente la manga micrométrica hasta alcanzar el nivel de mercurio marcado como referencia, inicialmente. Se tomó la medida en centésimas.

El volumen total del espécimen se determinó, introduciendo el picnómetro en una vasija, se llenó con mercurio hasta el borde y finalmente se introdujo la muestra en el picnómetro. Con la tapa, se procedió a cerrarlo completamente y el volumen desplazado de mercurio, se llevó a la copa utilizada anteriormente, para obtener el volumen total del espécimen, repitiendo el procedimiento mencionado inicialmente. Este procedimiento se repitió para las cuatro muestras restantes, que también fueron evaluadas con ayuda de éste equipo (Ver Figura 2 del presente anexo).



**Figura 8. Porosímetro, accesorios y especímenes a ensayar.**

Fuente. Las autoras.



**Figura 9. Procedimiento para la medición de la porosidad efectiva.**

Fuente. Las autoras.

▪ **Cálculos de porosidad efectiva.**

Teniendo en cuenta la Ecuación 4 mostrada en el Capítulo 4 y los resultados consignados en la Tabla 11 (resultados de la prueba de porosidad efectiva en el Capítulo 4), se hicieron los siguientes cálculos:

**2.1 P1: REFERENCIA**

$$(\%) P = (121-111)/121*100$$

$$(\%) P = 8.264$$

**2.2 P2: 10% HUMO DE SÍLICE**

$$(\%) P = (109-106)/109*100$$

$$(\%) P = 2.752$$

**2.3 P3: 10% ESCORIA SIDERÚRGICA**

$$(\%) P = (111.5-106)/111.5*100$$

$$(\%) P = 4.933$$

**2.4 P4: 10% HUMO DE SÍLICE-10% ESCORIA SIDERÚRGICA**

$$(\%) P = (101-95)/101*100$$

$$(\%) P = 5.941$$

**2.5 P7: 10% HUMO DE SÍLICE-40% ESCORIA SIDERÚRGICA**

$$(\%) P = (102.5-102.4)/102.5*100$$

$$(\%) P = 0.097$$

## ANEXO D. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

- **Cemento**

**Tabla 1. Especificaciones del cemento Portland.**

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
Óxido de magnesio (MgO)	6%
Trióxido de Azufre SO <sub>3</sub> , Máximo	3,50%
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Fraguado inicial mínimo en minutos	90
Fraguado final máximo en minutos	320
Expansión en agua (máximo) %	0,02
Resistencia a 3 días (mínimo) en MPa	13,8
Resistencia a 7 días (mínimo) en MPa	20,7
Resistencia a 28 días (mínimo) en MPa	29,0

Fuente. Las autoras. (Basado en la ficha técnica dada por el fabricante)

- **Aditivo**

**Tabla 2. Especificaciones técnicas del aditivo plastificante-retardante.**

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>	Densidad a 20° C: 1.14 ± 0.04 Kg/l No incorpora aire en el concreto
<b>CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS</b>	Hidróxido de sodio < 1% p-cloro-m-cresol < 0.6% 5-cloro-2-metil-2H-isotiazol-3-ona 2-metil-2H-isotiazol-3-ona < 0.1% formaldehído < 0.05% PH~10 Es miscible en agua
<b>DOSIFICACIÓN</b>	0.3-0.5% del peso del cemento.

Fuente. Especificaciones técnicas del plastificante  
Disponible en: [http://www.sika.com.co/co-ht\\_Plastiment\\_TM\\_20.pdf](http://www.sika.com.co/co-ht_Plastiment_TM_20.pdf)

**Tabla 3. Resultados de la caracterización del agregado grueso y del agregado fino utilizado.**

<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO</b>		<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO</b>	
<b>GRAVEDADES ESPECÍFICAS (Kg/cm3)</b>		<b>GRAVEDADES ESPECÍFICAS (Kg/cm3)</b>	
Gravedad específica real	2,672	Gravedad específica real	2,747
Gravedad específica aparente	2,574	Gravedad específica aparente	2,587
Gravedad específica aparente S.S.S.	2,611	Gravedad específica aparente S.S.S.	2,645
<b>PESO UNITARIO</b>		<b>PESO UNITARIO</b>	
Peso unitario del agregado S.S.S. compactado	1589,98 Kg/m3	Peso unitario del agregado S.S.S. compactado	1582,8 Kg/m3
Peso Unitario del agregado S.S.S. suelto	1466,66 Kg/m3	Peso Unitario del agregado S.S.S. suelto	1373,02 Kg/m3
% de absorción	1,419	% de absorción	2,249
% de vacíos	39,10	% de vacíos	40,16

**Fuente. Las autoras.**

- Agregados

Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado grueso y agregado fino utilizado.

AGREGADO GRUESO					AGREGADO FINO				
TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0	0	100	4	52,8	5,3006	5,3006	94,6993
¾"	2,846	2,846	28,5800	71,4199	8	48,1	4,8288	10,1295	89,8704
½"	4,881	7,727	77,5959	22,4040	16	104,3	10,4708	20,6003	79,3996
3/8"	1,462	9,189	92,2775	7,7224	30	228,4	22,9294	43,5297	56,4702
4"	0,742	9,931	99,72886	0,2711	50	238,9	23,9835	67,5133	32,4866
FONDO	0,02	9,958	100	0	100	260,6	26,1620	93,6753	6,3246
Tamaño máximo: ¾" Tamaño máximo nominal: ½"					FONDO	63,0	6,3246	100	0
					TOTAL	996,1	100	Peso muestra	1000 Gramos
					Módulo de finura: 2,4				

Fuente. Las autoras.

▪ Agua


No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION														 <small>ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P.</small>					
F CC 507-006		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																			
Rev.:0																					
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA				AÑO:		2011													
PARAMETROS	Parámetros Físicoquímicos														Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL	
	No. Muestras Físicoquímicas	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		
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	
<b>PROMEDIO</b>	<b>87</b>	<b>0,95</b>	<b>0,75</b>	<b>3,8</b>	<b>7,23</b>	<b>0</b>	<b>0,05</b>	<b>48,9</b>	<b>67,5</b>	<b>3,6</b>	<b>26,8</b>	<b>N.D</b>	<b>1,3</b>	<b>N.D</b>	<b>174</b>	<b>0,0</b>	<b>100</b>	<b>0,0</b>	<b>100</b>	<b>0,00</b>	
<b>RES. 2115/07</b>	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	
<b>Convenciones:</b>	mg/L: miligramos por litro    UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad														No Cobalto    IRCA: Indice de Riesgo de Calidad del Agua						
<b>Nota:</b>	ND: No Detectable														El IRCA promedio, obtenido con los parámetros ensayados, y "apta para el consumo" según Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo"						
		<b>0,95</b>																		<b>7,23</b>	<b>PH Promedio</b>
Elaboró:	Leonor Chacón				Revisó y Aprobó:																
	<b>Cloro residual</b>				<b>CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ</b> Jefe de Control Calidad Aguas																

Figura 1. Resultados de las pruebas de calidad físicoquímica y microbiológica del agua.

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Disponible: [www.amb.com.co](http://www.amb.com.co).

- Humo de sílice

Tabla 5. Especificaciones técnicas del humo de sílice (adición 1).

INFORMACIÓN TÉCNICA EUCON MSA TX40T143	
PESO ESPECÍFICO	2.2-2.3
TAMAÑO PROMEDIO DE PARTÍCULA	0.2-0.5 micras
COLOR	Gris claro
SUPERFICIE ESPECÍFICA	15 m <sup>2</sup> /g-30m <sup>2</sup> /g
CONTENIDO DE SIO2	85%-93%

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

- escoria

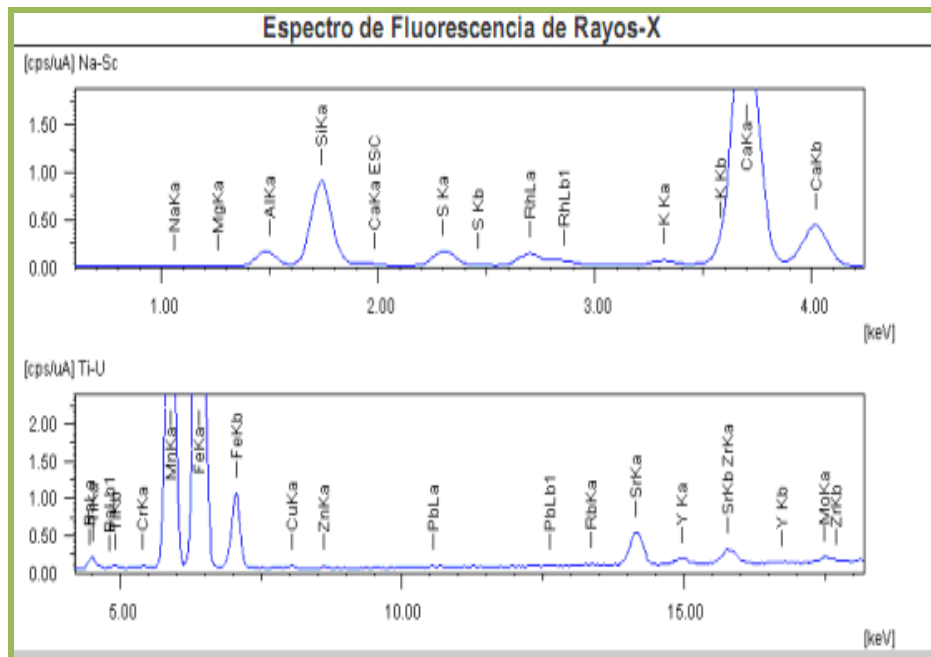


Figura 2. Resultado de la técnica de espectro de Fluorescencia de Rayos-x.

Fuente. Centro de desarrollo productivo de Joyería-CDPJ.

**Tabla 6. Composición química de la escoria utilizada como (adición 2).**

COMPOSICIÓN					
Nombre	Óxido	%	Analito	%	Desviación estándar
Calcio	CaO	39.19	Ca	28.00	0.06
Silicio	SiO <sub>2</sub>	32.06	Si	14.98	0.11
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.99	Al	5.81	0.09
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.49	Fe	4.54	0.02
Manganeso	MnO	6.31	Mn	4.89	0.02
Azufre	SO <sub>3</sub>	2.19	S	0.88	0.02
Magnesio	MgO	1.20	Mg	0.73	0.07
Potasio	K <sub>2</sub> O	0.560	K	0.467	0.012
titanio	TiO <sub>2</sub>	0.340	Ti	0.205	0.014
Sodio	Na <sub>2</sub> O	0.30	Na	0.22	0.17
Bario	BaO	0.18	Ba	0.16	0.03
Estroncio	SrO	0.082	Sr	0.069	0.001
Cromo	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.026	Cr	0.018	0.005
zirconio	ZrO <sub>2</sub>	0.024	Zr	0.018	0.001
Cobre	CuO	0.016	Cu	0.013	0.002
Itrio	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.015	Y	0.012	0.001
zinc	ZnO	0.011	Zn	0.009	0.001
Nombre	Óxido	ppm	Analito	ppm	Desviación estándar
Molibdeno	MoO <sub>3</sub>	84	Mo	56	7
Plomo	PbO	26	Pb	24	10
Rubidio	Rb <sub>2</sub> O	26	Rb	24	6
Balance	-----	----	0.0	----	----

Fuente. Centro de desarrollo productivo de Joyería-CDPJ.

El criterio para establecer la calidad de la escoria como aglomerante, según normas DIN, se muestra en la ecuación 1 del presente anexo (anexo D). Entre más grande sea el índice de basicidad, la escoria será de mejor calidad. [59]

$$F = \frac{\text{CaO} + \text{CaS} + \frac{1}{2} \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$$

(1)

**F = 1.5**      mediocre

**F = 1.9**      aceptable

**F > 1.9**     excelente

La escoria utilizada, no contiene CaS. El índice es menor a 1.5, lo cual es muy bajo. Posiblemente, se trate de una escoria de mala calidad, con un poder cementante bajo.

El índice de hidraulicidad se calculó teniendo en cuenta la ecuación 2 mostrada en el presente anexo. Esta Ecuación fue tomada de la bibliografía consultada, acerca de un estudio realizado a una escoria siderúrgica destinada para adición del concreto. [59]

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3} > 1$$

(2)

El índice de hidraulicidad encontrado, fue mayor a 1; es decir, la escoria posiblemente presenta propiedades hidráulicas.

## ANEXO E. INSPECCIÓN VISUAL

- Contenido de agua

Tabla 1. Pesos de las probetas para en los días de curado 3, 7, 10, 14, 21 y 28.

MEZCLA	Peso de la mezcla fresca	Peso antes de introducir en piscina	Peso día 3	Peso día 7	Peso día 10	Peso día 14	Peso día 21	Peso día 28	Contenido de Agua (%)
<b>Referencia</b>									
Probeta 1	4,113	4,059	4,072	4,105	4,107	4,109	4,112	4,113	1,33
Probeta 2	4,091	4,044	4,045	4,085	4,088	4,09	4,092	4,093	1,212
Probeta 3	4,099	4,057	4,057	4,092	4,095	4,097	4,098	4,1	1,06
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,101</b>	<b>4,053</b>	<b>4,058</b>	<b>4,094</b>	<b>4,097</b>	<b>4,099</b>	<b>4,101</b>	<b>4,102</b>	<b>1,201</b>
<b>10% humo sílice</b>									
Probeta 1	3,998	3,976	3,984	4,015	4,017	4,019	4,02	4,021	1,132
Probeta 2	4,035	4,015	4,020	4,048	4,049	4,052	4,053	4,054	0,971
Probeta 3	4,032	4,012	4,016	4,018	4,032	4,043	4,055	4,057	1,122
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,022</b>	<b>4,001</b>	<b>4,007</b>	<b>4,027</b>	<b>4,033</b>	<b>4,038</b>	<b>4,043</b>	<b>4,044</b>	<b>1,075</b>
<b>10% escoria</b>									
Probeta 1	4,103	4,055	4,058	4,083	4,094	4,095	4,099	4,099	1,085
Probeta 2	4,103	4,054	4,057	4,086	4,095	4,096	4,1	4,101	1,159
Probeta 3	4,063	4,011	4,014	4,039	4,056	4,058	4,061	4,061	1,247
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,09</b>	<b>4,04</b>	<b>4,043</b>	<b>4,069</b>	<b>4,08</b>	<b>4,083</b>	<b>4,087</b>	<b>4,087</b>	<b>1,164</b>

10% humo de sílice-10%escoria									
Probeta 1	4,026	3,982	3,988	4,012	4,018	4,02	4,023	4,023	0,628
Probeta 2	4,031	3,984	3,99	4,008	4,014	4,019	4,022	4,024	1,004
Probeta 3	4,008	3,964	3,97	4,009	4,011	4,015	4,022	4,023	1,488
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,022</b>	<b>3,977</b>	<b>3,983</b>	<b>4,01</b>	<b>4,014</b>	<b>4,018</b>	<b>4,022</b>	<b>4,023</b>	<b>1,04</b>
10% humo de sílice-20%escoria									
Probeta 1	4,049	3,954	3,956	3,984	3,986	3,987	3,988	3,989	0,885
Probeta 2	4,021	3,991	3,994	4,024	4,027	4,028	4,029	4,03	0,977
Probeta 3	3,991	3,996	3,999	4,026	4,029	4,031	4,031	4,032	0,901
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,02</b>	<b>3,98</b>	<b>3,983</b>	<b>4,011</b>	<b>4,014</b>	<b>4,015</b>	<b>4,016</b>	<b>4,017</b>	<b>0,921</b>
10% humo de sílice-30% escoria									
Probeta 1	3,975	3,931	3,933	3,952	3,964	3,963	3,965	3,966	0,89
Probeta 2	3,958	3,919	3,921	3,936	3,951	3,95	3,952	3,953	0,868
Probeta 3	3,949	3,908	3,91	3,931	3,945	3,942	3,946	3,946	0,972
<b>PROMEDIO</b>	<b>3,961</b>	<b>3,919</b>	<b>3,921</b>	<b>3,94</b>	<b>3,953</b>	<b>3,954</b>	<b>3,954</b>	<b>3,955</b>	<b>0,91</b>
10% humo de sílice-40% escoria									
Probeta 1	3,939	3,889	3,891	3,912	3,926	3,927	3,929	3,929	1,029
Probeta 2	3,888	3,834	3,843	3,858	3,879	3,88	3,882	3,882	1,252
Probeta 3	3,936	3,873	3,883	3,885	3,92	3,92	3,922	3,922	1,265
<b>PROMEDIO</b>	<b>3,921</b>	<b>3,865</b>	<b>3,872</b>	<b>3,885</b>	<b>3,908</b>	<b>3,909</b>	<b>3,911</b>	<b>3,911</b>	<b>1,182</b>

Fuente: Las autoras.

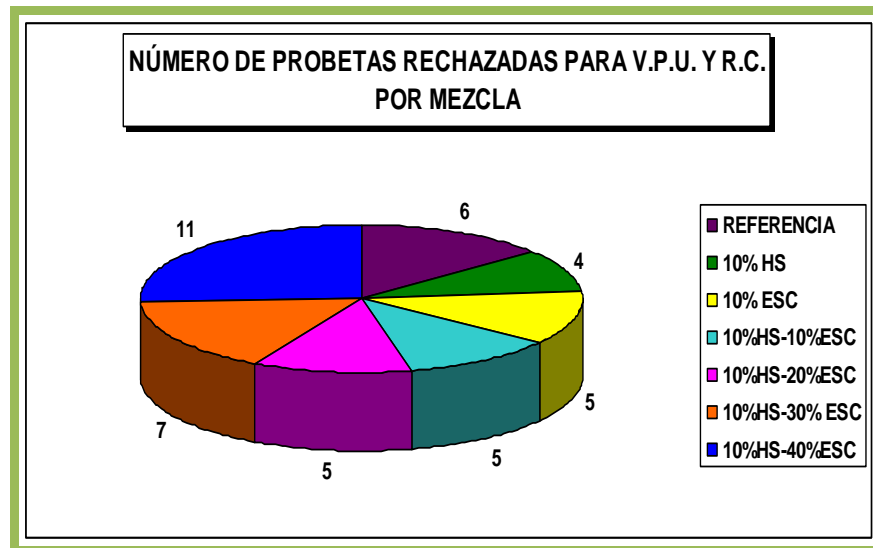
- **Probetas que presentaron porosidad pequeña en toda la superficie**

**Tabla 2. Número de probetas en total con porosidad pequeña.**

Mezcla	Porosidad pequeña en todas las superficies
P1: Referencia	4
P2: 10% humo de sílice	2
P3: 10% escoria	13
P4:10% humo de sílice-10% escoria	15
P5:10% humo de sílice-20% escoria	18
P6:10% humo de sílice-30% escoria	19
P7: 10% humo de sílice-40% escoria	21
<b>Total</b>	<b>94</b>

Fuente. Las autoras.

- **Número total de probetas rechazadas.**



**Figura 1. Probetas rechazadas para las pruebas de Velocidad de Pulso Ultrasonico y Resistencia a la Compresión.**

Fuente. Las autoras.

## ANEXO F. DATOS PARA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.

A continuación se presentan a manera de ejemplo, los resultados de tiempo de vuelo obtenidos en la investigación para dos probetas de concreto de Referencia o P1, en un solo punto de evaluación.

**Tabla 1. Resultados de los tiempos de vuelo (microsegundos) y las longitudes (centímetros) de la trayectoria recorrida para dos probetas.**

	probeta 1		probeta 2			probeta 1		probeta 2	
<b>P1 DÍA 3</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>P1 DÍA 7</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>
<b>Punto 1</b>	60,9	20,483	61,3	20,115	<b>Punto 1</b>	56,3	20,278	57,5	20,297
	60,8	20,495	61,4	20,218		56,1	20,312	57,7	20,373
<b>P1 DÍA 10</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>P1 DÍA 14</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>
<b>Punto 1</b>	57,5	20,578	57,6	20,512	<b>Punto 1</b>	52,9	20,797	53,9	20,373
	57,7	20,556	57,5	20,523		52,6	20,684	53,8	20,386
<b>P1 DÍA 21</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>P1 DÍA 28</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Longitud</b>
<b>Punto 1</b>	50,1	20,519	50,3	20,513	<b>Punto 1</b>	50,2	20,512	52,1	20,511
	50,2	20,427	50,7	20,498		50,3	20,546	52,2	20,523

Fuente. Las autoras.

## ANEXO G. DATOS PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

- Datos de las áreas y de la resistencia a la compresión para cada probeta.

Tabla 1. Resultado de las áreas transversales y Resistencia a la Compresión para una probeta de cada mezcla.

REFERENCIA			
<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1183	82,3013	199,2676
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,12833	82,6232	231,1697
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1150	82,1968	223,8527
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,15113	83,3595	305,9036
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,16183	83,7062	344,0603
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,11750	82,2745	346,4011
<b>10% HUMO SÍLICE</b>			
<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1350	82,8409	188,3127
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1433	83,1073	302,0191
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1241	82,4890	330,9529
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1605	83,6630	408,7828
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1616	83,7008	463,5557
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1588	83,6089	473,6333
<b>10% ESCORIA</b>			

<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1910	84,6548	119,3079
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1810	84,3290	187,3613
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,2060	85,1475	272,4682
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1745	84,1175	313,8464
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1546	83,4739	305,4844
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1942	84,7609	333,8803
<b>10% HS-10% ESCORIA</b>			
<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1505	83,3417	148,7849
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1575	83,5684	276,4200
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1333	82,7844	339,4356
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1403	83,0103	343,3305
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1416	83,0534	374,4576
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1725	84,0552	397,3576
<b>10% HS-20% ESCORIA</b>			
<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1321	82,7468	147,4376
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1360	82,8704	129,1171
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1496	83,3121	150,0382
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1603	83,6575	181,6930
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1614	83,6927	240,1642
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1312	82,7172	282,8913
<b>10% HS-30% ESCORIA</b>			

<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1459	83,1908	69,7192
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1765	84,1853	72,4592
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1485	83,2743	162,1147
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1747	84,1256	165,2289
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1752	84,1419	281,6668
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1695	83,9577	254,8900
<b>10% HS-40% ESCORIA</b>			
<b>DÍA 3</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1511	83,3606	63,5791
<b>DÍA 7</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1780	84,2313	87,8532
<b>DÍA 10</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1470	83,2285	124,9571
<b>DÍA 14</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,2066	85,1666	123,2877
<b>DÍA 21</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1646	83,7981	165,8747
<b>DÍA 28</b>	<b>RADIO (Cm)</b>	<b>AREAS (cm2)</b>	<b>Kgf/cm2</b>
PROBETA 1	5,1810	84,3317	209,8854

Fuente. Las autoras.

- **Resultados de la resistencia a la compresión en Kg-f**

**Tabla 2. Promedio de las cargas aplicadas en Kg-f para el cálculo de la Resistencia a la compresión.**

<b>DIAS</b>	<b>REFERENCIA</b>	<b>P1: 10% HS</b>	<b>P3: 10% ESCORIA</b>	<b>P4: 10%- 10%</b>	<b>P5: 10%- 20%</b>	<b>P6: 10%- 30%</b>	<b>P7: 10%- 40%</b>
3	16900	15700	9900	12300	12067	5667	5467
7	18500	24400	17100	22533	11000	7233	7367
10	18533	26533	21500	27267	12767	13600	10300
14	25767	34267	26100	30500	16833	14567	10500
21	28300	36800	25433	33367	21567	22633	13967
28	29367	38133	27067	33400	22500	21833	17667

Fuente. Las autoras.

**ANEXO H. DATOS PARA ESTABLECER LA CORRELACIÓN DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.**

**Tabla 1. Resultados de VPU y Resistencia a la Compresión para cada mezcla de concreto fabricada.**

<b>Referencia ó Patrón</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	3310,4977	20,1163
7	3577,2362	22,0042
10	3618,5865	21,8534
14	3834,1899	30,4199
21	4019,3746	33,2488
28	4028,9469	34,6989
<b>10% HUMO DE SÍLICE</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	3531,2778	18,6086
7	3707,2721	28,6745
10	3708,7458	31,5043
14	4048,0736	40,3046
21	4091,5172	43,4246
28	4091,7475	44,7437
<b>10% ESCORIA</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	3557,9651	11,4557
7	4018,6079	19,8832
10	4129,9081	24,7672
14	4171,9981	30,4860
21	4189,9692	29,8556
28	4295,6395	31,4193
<b>10% HS-10% ESC</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	3243,8139	14,4691
7	3761,1056	26,4267
10	3972,9198	32,1458
14	4075,1670	35,9639

21	4192,4484	39,1618
28	4214,4709	39,0679
<b>10% HS-20% ESC</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	3207,7345	14,2240
7	3383,7101	12,9649
10	3511,7474	14,9429
14	3593,8392	19,7921
21	3821,1852	25,3475
28	3968,8847	26,5422
<b>10% HS-30% ESC</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	3172,5158	6,6722
7	3238,4190	8,4274
10	3519,5265	15,9460
14	3657,1357	17,0147
21	3814,2685	26,4171
28	4003,9550	25,4788
<b>10% HS-40% ESC</b>		
<b>Tiempo de Curado (Días)</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico V.P.U. (m/s)</b>	<b>Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
3	2925,9285	6,3955
7	3408,3240	8,5578
10	3518,3927	12,0448
14	3701,3405	12,1754
21	3823,3357	16,2754
28	4005,6933	20,5447

Fuente. Las autoras.

**ANEXO I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO CON EL SOFTWARE STATGRAPHICS CENTURION  
XV VERSIÓN 15.2.06.**

**Tabla 1. Resultados del análisis de los límites de predicción y de los límites de confianza para las curvas de correlación VPU-R.C.**

<b>P1: REFERENCIA (0% Adiciones)</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c<sup>€</sup></b>	<b>f'c<sup>¥</sup></b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
3300	18,5077	17,0849	11,9598	28,6406	14,0946	24,3026
3460	21,1168	19,4179	14,1986	31,4058	17,2419	25,8625
3620	24,0936	22,0695	16,5838	35,0042	20,6987	28,0453
3780	27,4901	25,0831	18,9972	39,7797	23,8562	31,6775
3940	31,3654	28,5083	21,3306	46,1210	26,2127	37,5310
4100	35,7870	32,4012	23,5297	54,4296	28,0477	45,6619
<b>P2: 10% HUMO DE SÍLICE</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c</b>	<b>f'c</b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
3500	20,5859	19,9864	10,7257	39,5105	13,7790	30,7554
3620	24,0857	23,3606	13,2141	43,9014	17,6538	32,8608
3740	28,1804	27,3045	15,9868	49,6745	22,1744	35,8132

<sup>€</sup> Resistencia a la Compresión calculada con el modelo de correlación determinado por el software estadístico STATGRAPHICS.

<sup>¥</sup> Resistencia a la Compresión calculadas con las ecuaciones 7-13

3860	32,9713	31,9142	18,9305	57,4262	26,7331	40,6653
3980	38,5767	37,3021	21,9103	67,9209	30,4395	48,8893
4100	45,1351	43,5998	24,8103	82,0869	33,2247	61,3153
<b>P3: 10% ESCORIA</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c</b>	<b>f'c</b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
3500	10,3179	12,0628	5,89909	18,0465	6,89555	15,4387
3660	13,0231	15,3349	7,93590	21,3712	9,56582	17,7298
3820	16,4375	19,4945	10,5044	25,7218	13,1339	20,5721
3980	20,7472	24,7823	13,6055	31,6376	17,5572	24,5168
4140	26,1869	31,5045	17,1747	39,9281	22,1668	30,9359
4300	33,0527	40,0501	21,1291	51,7051	26,4266	41,3402
<b>P4: 10% HUMO DE SILICE - 10% ESCORIA</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c</b>	<b>f'c</b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
3200	14,1862	12,5925	11,3807	17,6834	12,1796	16,5234
3440	18,1961	16,0083	14,9788	22,1045	16,2670	20,3541
3680	23,3395	20,3505	19,5432	27,8732	21,5703	25,2539
3920	29,9367	25,8705	25,2109	35,5484	28,0538	31,9460
4160	38,3987	32,8879	32,1202	45,9044	35,4074	41,6427
4400	49,2525	41,8087	40,4688	59,9428	43,8903	55,2699

<b>P5: 10% HUMO DE SILICE - 20% ESCORIA</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c</b>	<b>f'c</b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
3200	12,3522	12,5925	5,93772	25,6964	8,00938	19,0499
3360	14,5443	14,7775	7,43270	28,4601	10,5718	20,0093
3520	17,1253	17,3415	9,02455	32,4974	13,3644	21,9445
3680	20,1643	20,3505	10,5817	38,4245	15,5701	26,1140
3840	23,7426	23,8815	11,9900	47,0150	16,8433	33,4679
4000	27,9559	28,0252	13,1974	59,2188	17,5923	44,4247
<b>P6: 10% HUMO DE SILICE - 30% ESCORIA</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c</b>	<b>f'c</b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
3100	6,68906	6,9018	2,61554	17,1068	3,78412	11,8240
3300	9,37896	9,6966	4,00058	21,9880	6,21947	14,1435
3500	13,1506	13,6232	5,85439	29,5398	9,62027	17,9763
3700	18,4388	19,1399	8,13974	41,7693	13,2058	25,7457
3900	25,8537	26,8906	10,7684	62,0718	16,3516	40,8776
4100	36,2504	37,7799	13,6758	96,0892	19,3655	67,8574
<b>P7: 10% HUMO DE SILICE - 40% ESCORIA</b>						
<b>Vc</b>	<b>f'c</b>	<b>f'c</b>	<b>Límite de predicción inferior 99%</b>	<b>Límite de predicción superior 99%</b>	<b>Límite de confianza inferior 99%</b>	<b>Límite de confianza superior 99%</b>
2900	5,74206	6,0794	2,78626	11,8748	3,55786	9,29948

3140	7,45574	7,9161	3,90638	14,2301	5,24900	10,5902
3380	9,66404	10,3078	5,31405	17,5748	7,51828	12,4222
3620	12,5264	13,4221	6,96180	22,5388	10,0074	15,6794
3860	16,2365	17,4773	8,76621	30,0729	12,1249	21,7425
4100	21,0456	22,7577	10,6632	41,5370	13,9751	31,6934

Fuente. Las autoras.

**Tabla 2. Resultados del análisis estadístico con el software Statgraphics Centurion XV versión 15.2.06 para los valores VPU y R.C.**

RESÚMEN ESTADÍSTICO							
n=6	V.P.U						
	Referencia	10% hs	10% escoria	10% hs-10% esc	10% hs-20% esc	10% hs-30% esc	10% hs-40% esc
<b>Mínimo</b>	3310,50	3531,28	3557,97	3243,81	3208,73	3172,52	2925,93
<b>Máximo</b>	4028,95	4091,75	4295,64	4214,47	3968,88	4003,96	4005,69
<b>Rango</b>	718,45	560,47	737,67	970,66	761,15	831,44	1079,76
n=6	R.C.						
	Referencia	10% hs	10% escoria	10% hs-10% esc	10% hs-20% esc	10% hs-30% esc	10% hs-40% esc
<b>Mínimo</b>	20,1164	18,6087	11,4557	14,4692	12,9650	6,6722	6,3955
<b>Máximo</b>	34,6989	44,7438	31,4194	39,1619	26,5422	26,4172	20,5448
<b>Rango</b>	14,5826	26,1351	19,9637	24,6927	13,5773	19,7449	14,1492

Fuente. Las autoras.