

**RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, LA POROSIDAD Y LA
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN EL CONCRETO VARIANDO LA
RELACIÓN AGUA/CEMENTO.**

**LAURA ANGÉLICA CORZO PATIÑO
JOHANNA XIMENA GARCIA DUARTE**

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

2009

**RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, LA POROSIDAD Y LA
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN EL CONCRETO VARIANDO LA
RELACIÓN AGUA/CEMENTO.**

**LAURA ANGÉLICA CORZO PATIÑO
JOHANNA XIMENA GARCIA DUARTE**

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

Directora:

M.Sc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

Codirector:

Ing. JULIAN ORLANDO HERRERA ORTIZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2009

A Dios, quien ha sido mi apoyo y fortaleza en todo momento. A mi hijo Juan Camilo por ser el motor de mi vida, mi mayor motivación, porque gracias a él tengo fuerzas para luchar en el largo camino de la vida y sobre todo por darme tanta alegría.

A mis padres Hugo García y Hercilia Duarte por ser los mejores padres del mundo, por creer en mí, porque ustedes son la base de lo que hoy en día soy; a mis hermanos Hugo, Oscar y Viviana; a mis sobrinos Alejo, Sofía y Lucas; a mis cuñadas Marcela y Mónica; a ellos por apoyarme, por hacerme ver las cosas como son, por la felicidad que me brindan cada día de mi vida, por hacer parte de esta familia tan bonita.

A mi esposo John Serrano por estar conmigo en las buenas y en las malas, por la motivación que me da cada día para salir adelante juntos.

A mi compañera de proyecto Laura Corzo, por brindarme su amistad y por el apoyo que he recibido de su parte en la realización de este trabajo.

A todos mis amigos, en especial, a Diego Hernández, Fermín Martínez, Jenny Forero, Laura Durán, Ana María Espinoza, Leicy Camacho, Martha Cadena, Camila Hernández, Diana Espinosa, Laura Pérez, Carlos Ayala; porque me han acompañado en los momentos más difíciles de mi vida y sé que lo van a seguir haciendo, no olviden que pueden seguir contando conmigo y que los quiero mucho.

Johanna García

Primero y ante todo, dedicó a papito Dios y a la Virgencita, por ser mi camino y mi guía.

A mis padres, Víctor Corzo y Soledad Patiño, por darme la vida, por su ejemplo, dedicación, Amor y amistad; por sus consejos, esfuerzos y valores inculcados, por su apoyo total e incondicional que me ha permitido alcanzar propósitos, sueños y metas, entre ellas la de lograr el título de Ingeniera Metalúrgica. Además agradezco a ellos porque han hecho en mí, una mujer sencilla, amable, respetuosa, colaboradora, responsable, leal, luchadora, correcta y emprendedora.

A mi hermano, Darío por su nobleza, inocencia, amor y apoyo.

A mi novio Alejandro Durán, por su ternura, amor, tolerancia y apoyo incondicional.

A mis tías, Elena y Duvi, mi prima Angélicuínchi por permitirme entrar en sus vidas para compartir de su hogar.

A mi compañerita Joha, por su amistad, alegría, apoyo, dedicación y esfuerzo para sacar adelante nuestro proyecto.

A mi Ley, a Maye, a Jompis y a Tavo por brindarme su verdadera amistad, por su lealtad, apoyo y cariño. Por último dedico esto a personas que de una u otra manera estuvieron junto a mí en el desarrollo de esta etapa universitaria; A mis compañeros de estudio y amigos Eduar Pérez, Laura Durán, Cesar Sarmiento, Jenny Forero, Pachó, Néstor Sanabria, Blanca porras.

Laura Angélica Corzo Patiño

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por permitirnos ser parte de su familia universitaria, llena de diversidad cultural que representan a nuestro país.

Agradecemos enormemente al ingeniero Javier Serrano y a los integrantes de su empresa IMT, por la colaboración incondicional y desinteresada solucionándonos el préstamo y manejo del equipo de Ultrasonido de baja frecuencia primordial para el desarrollo de este proyecto, además de proporcionarnos información sobre este campo.

A nuestro codirector, Julián Herrera y directora de proyecto, M. Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz, por compartirnos sus conocimientos para el desarrollo de esta investigación y para nuestro futuro.

También agradecemos a la Escuela de Ingeniería Civil, por su auxilio en los materiales empleados en la elaboración de las probetas de concreto y a su vez por los equipos. A su técnico, Jairo Hernández por la inmensa colaboración y conocimiento proporcionado en todo este proyecto.

Al Ph.D Ricardo Cruz, por su orientación y conocimiento sobre el área de la Ingeniería Civil.

Queremos también agradecer a la escuela de Ingeniería de Petróleos por permitirnos adquirir el desarrollo de la prueba de porosidad en la sede de Guatiguará. A su técnico, Félix Arenas por su confianza, colaboración y conocimiento en el desarrollo de esta prueba.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica por ser guía y ayuda en el desarrollo de nuestra carrera; al igual agradecemos al los técnicos de nuestra escuela, Ambrosio Carrillo, Mario Navarrete, Daniel Garavito, Javier Quintana por su disposición y colaboración durante toda esta etapa.

Al grupo de nuevos materiales GIMAT, por permitirnos entrar a formar parte en la contribución a las investigaciones. A sus integrantes por su apoyo y ayuda, además por hacer de él un espacio diferente, armonioso, con calidad humana.

A nuestros profesores Custodio Vásquez, Darío Yesid Peña, Arnaldo Alonso, Afranio Cardona, Orlando Gómez, Elcy Córdoba, Luis Aguirre, Iván Uribe, Julio Elías Pedraza, Walter Pardavé, Jaime Gonzáles, Aníbal Serna, a todos ellos por proporcionarnos amistad y conocimiento valioso para nuestro desarrollo profesional.

Por último, agradecemos a nuestras familias por su paciencia y apoyo económico necesario para la elaboración de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
2. MARCO TEORICO	5
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO.....	5
2.1.1 Componentes del concreto.....	6
2.1.1.1 Agregados.....	7
2.1.1.2 Cemento.....	8
2.1.1.3 Agua de la mezcla.....	10
2.1.2 Procesos de fabricación del concreto.....	11
2.1.2.1 Caracterización de la materia prima.....	11
2.1.2.2 Diseño de mezcla.....	12
a) Selección de la relación agua/cemento.....	12
b) Selección de la consistencia.....	13
c) Cantidad de agua necesaria para la mezcla.....	13
d) Cantidad de cemento para la mezcla.....	13
e) Estimación del contenido de agregado grueso.....	14
f) Estimación del contenido de agregado fino.....	15
g) Cantidad de componentes para el número de muestras.....	16

2.1.2.3	Fraguado.	16
2.1.2.4	Curado.	17
2.1.3	Propiedades físicas del concreto.....	18
2.1.3.1	Resistencia a la compresión.....	18
2.1.3.2	Módulo de Elasticidad.	19
2.1.3.3	Porosidad.	20
	Tipos de porosidad.	20
	Medición de la porosidad.....	21
•	Porosímetro de campo Ruska.....	22
	Influencia de la porosidad en la resistencia a la compresión.....	23
	Influencia de la relación agua/cemento en la porosidad.....	24
2.2	ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO.....	25
2.2.1	Técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en el concreto.	25
2.2.1.1	Factores que afectan la velocidad de pulso.	29
•	Relación Agua/Cemento	29
•	Contenido de agua.....	29
•	Cantidad y tipo de agregados	29
•	Edad del Concreto	29
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	30
3.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS.	31
3.2.1	Materiales.	31
3.2.2	Equipos.	33
3.3	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.	36

3.3.1	Diseño de Mezcla.....	37
3.3.2	Elaboración de las probetas.....	38
3.3.3	Curado de las probetas.....	41
3.4	ENSAYO DE POROSIDAD.....	42
3.5	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	44
3.6	ENSAYO DE ULTRASONIDO.....	46
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	48
4.2	DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS.....	50
4.3	ENSAYO DE POROSIDAD.....	52
4.4	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	54
4.5	ENSAYO DE ULTRASONIDO. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).....	55
4.6	RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD PARA LAS DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO.....	57
4.7	RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA POROSIDAD EN LOS DÍAS DE CURADO PARA LAS RESPECTIVAS RELACIONES a/c.....	58
4.8	RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO DE LAS DIFERENTES RELACIONES A/C.....	60
	CONCLUSIONES.....	62
	RECOMENDACIONES.....	64
	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	ANEXOS.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría de los agregados.....	8
Tabla 2. Clasificación del Cemento.....	10
Tabla 3. Asentamientos recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad.....	14
Tabla 4. Agua en kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados.....	14
Tabla 5. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	15
Tabla 6. Resultados de los análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.....	32
Tabla 7. Propiedades del Agregado.....	48
Tabla 8. Gravedades Específicas.....	48
Tabla 9. Análisis granulométrico del agregado fino.....	49
Tabla 10. Análisis granulométrico del agregado grueso.....	50
Tabla 11. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.45.....	50
Tabla 12. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.50.....	51
Tabla 13. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.55.....	51
Tabla 14. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.60.....	51
Tabla 15. Resultados del ensayo de Porosidad a los respectivos días.....	52
Tabla 16. Resistencia a la compresión de las muestras de concreto ensayadas.....	54
Tabla 17. Resultados obtenidos del ensayo de Ultrasonido (VPU) en los respectivos días.....	55
Tabla 18. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y porosidad en los días y relaciones a/c respectivas.....	57
Tabla 19. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos velocidad de pulso ultrasónico y porosidad en los días y relaciones a/c respectivas.....	58

Tabla 20. Relación de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión y VPU.	60
Tabla 21. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para $a/c = 0.45$	75
Tabla 22. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para $a/c = 0.50$	75
Tabla 23. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para $a/c = 0.55$	76
Tabla 24. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para $a/c = 0.60$	76
Tabla 25. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para $a/c = 0.45$	76
Tabla 26. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para $a/c = 0.50$	77
Tabla 27. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para $a/c = 0.55$	77
Tabla 28. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para $a/c = 0.60$	77
Tabla 29. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para $a/c = 0.45$	78
Tabla 30. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para $a/c = 0.50$	78
Tabla 31. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para $a/c = 0.55$	79
Tabla 32. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para $a/c = 0.60$	79
Tabla 33. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.45$ en el día 7.	81
Tabla 34. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.50$ en el día 7.	81
Tabla 35. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.55$ en el día 7.	82
Tabla 36. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.60$ en el día 7.	82
Tabla 37. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.45$ en el día 14.....	83
Tabla 38. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.50$ en el día 14.....	83
Tabla 39. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.55$ en el día 14.....	84

Tabla 40. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.60$ en el día 14.....	84
Tabla 41. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.45$ en el día 28.....	85
Tabla 42. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.50$ en el día 28.....	85
Tabla 43. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.55$ en el día 28.....	86
Tabla 44. Resultados de resistencia a la compresión para la relación $a/c=0.60$ en el día 28.....	86

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura porosa de la pasta de cemento.....	22
Figura 2. Diagrama esquemático de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.	26
Figura 3. Método de transmisión directa.	28
Figura 4. Método de transmisión semi-directa.	28
Figura 5. Método de transmisión indirecta.	28
Figura 6. Esquema de la Metodología para el desarrollo de la investigación.	30

LISTADO DE GRAFICAS.

Gráfica 1. Resistencia a la compresión de cilindros de 15x30 cm en función de la edad, para una variedad de condiciones de curado.....	18
Gráfica 2. Porosidad Vs Resistencia a la compresión.	24
Gráfica 3. Variación de la porosidad con la relación agua/cemento.....	24
Gráfica 4. Comportamiento de la porosidad en función de la relación agua/cemento en los respectivos días.....	53
Gráfica 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento en los respectivos días.	55
Gráfica 6. Comportamiento de de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la relación agua/cemento en los días respectivos.	56
Gráfica 7. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la porosidad en los respectivos días.....	58
Gráfica 8. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la porosidad en los respectivos días.....	59
Gráfica 9. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso ultrasónico en los respectivos días.....	61

LISTADO DE FOTOGRAFIAS.

Fotografía 1. Equipo de Ultrasonido, V Meter MK II	34
Fotografía 2. Maquina Universal TREBEL para Ensayo de Compresión.	35
Fotografía 3. Porosímetro de Campo Ruska	36
Fotografía 4. Preparación de los moldes.....	40
Fotografía 5. Preparación de la Mezcla.....	40
Fotografía 6. Fraguado de las probetas	41
Fotografía 7. Curado de las probetas.	41
Fotografía 8. Accesorios del porosímetro de campo Ruska	44
Fotografía 9. Medición del volumen total.....	44
Fotografía 10. Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	45
Fotografía 11. Ensayo de Ultrasonido.	47

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Cálculos.	71
Anexo 2. Resultados Promedios Obtenidos en el Ensayo de Ultrasonido.....	75
Anexo 3. Resultados Obtenidos en el Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	80

RESUMEN

TITULO: RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, LA POROSIDAD Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN EL CONCRETO VARIANDO LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO.¹

AUTOR: CORZO PATIÑO LAURA ANGÉLICA, GARCIA DUARTE JOHANNA XIMENA.**

PALABRAS CLAVES: Concreto, Resistencia a la Compresión, Porosidad, Velocidad de Pulso Ultrasónico.

RESUMEN: Este trabajo presenta la influencia de la porosidad sobre la resistencia a la compresión del concreto y la velocidad de pulso ultrasónico, esto es evaluado en probetas de concreto fabricadas con cemento Portland tipo I, con relaciones agua/cemento de 0.45; 0.50; 0.55 y 0.60; ensayados en los días 7, 14 y 28 de curado; el cual fue realizado al medio ambiente bajo techo. Se establecieron las relaciones correspondientes entre las variables estudiadas. El desarrollo de esta investigación se hace con el fin de estudiar el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto, el cual es uno de los materiales más utilizados por el hombre y uno de los más expuestos a daños producidos por el medio ambiente. Un factor influyente en el concreto es la porosidad, afectando su resistencia a la compresión, permitiendo el ingreso de agentes agresivos y en general disminuye el tiempo de vida útil proyectado para la estructura. Estudios anteriores han mostrado que la porosidad depende de la relación agua/cemento (a/c) empleada en la mezcla. Uno de los métodos para evaluar las estructuras sin afectarlas es el ultrasonido, por medio de este se puede estimar la resistencia mecánica tanto in situ como en laboratorio. La técnica ultrasónica de mayor aplicación es la de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) la cual se basa en la medición del tiempo de vuelo del haz sonoro, pudiéndose relacionar con la resistencia a la compresión del concreto. Los resultados de este estudio están dirigidos a evaluar la posibilidad de la aplicación de la técnica de VPU en la evaluación de concreto a edad temprana.

¹ Trabajo de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Directora: Ms.c Luz Amparo Quintero Ortiz.

ABSTRACT

TITLE: RELATION BETWEEN COMPRESSION STRENGTH, POROSITY AND PULSE ULTRASONIC VELOCITY IN CONCRETE VARYING THE WATER / CEMENT RATIO^{*}

AUTHORS: CORZO PATIÑO LAURA ANGELICA, GARCIA DUARTE JOHANNA XIMENA^{}**

KEY WORDS: Concrete, Compression Resistance, Porosity, Pulse Ultrasonic Velocity

ABSTRACT: This work explains the porosity influence on the concrete's compression resistance and the pulse ultrasonic velocity. This influence is evaluated in test tubes made of concrete with Cement Portland type I, with a water/cement ratio of 0.45; 0.50; 0.55 and 0.60. The experiments were carried out at 7, 14 and 28 days of curing at room conditions under roof. Correlations between the studied variables were established. This research was developed with the purpose of analyze the pulse ultrasonic velocity behavior in concrete, which is one of the most used materials by men, and one of the most exposed to damage caused by the environment. Porosity has a big influence on concrete as it affects its compression resistance allowing aggressive agents to be incorporated into the concrete matrix, and causing a decreasing on the structure lifespan. Previous studies have proved that porosity strongly depends on the water/cement ratio (a/c) used for the mix. One of the methodologies to evaluate structures without affecting them is by using ultrasounds, which allows estimating in situ and lab mechanic resistance. The most used ultrasonic technique is the pulse ultrasonic velocity (PUV), which is based on the sound beam fly time measurement and its relationship to the concrete's resistance compression. The purpose of this study is to evaluate the application of the PUV technique for the assessment of concrete at early age.

^{*} Work of Degree

^{**} Faculty of Physicochemical Engineering School of Metallurgical Engineering and Science of Materials.
Directora: Ms.c Luz Amparo Quintero Ortiz.

GLOSARIO

Aditivos: Ingredientes del concreto, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, que se integran a la dosificación inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo para obtener o dar alguna característica especial al concreto hidráulico (impermeabilizantes, acelerantes, retardantes, fluidizantes, inclusores de aire, estabilizadores, endurecedores, etc.)

Aglomerante: Son aquellos materiales que, en un estado pastoso, es decir, son generalmente pétreos blandos que mezclados con agua se hacen plásticos, y con una consistencia variable, poseen la propiedad de moldearse, adherirse fácilmente a otros materiales, unirlos entre sí, endurecerse y alcanzar consistencias mecánicas considerables.

Aglutinante: es un material que ayuda a unir partículas pequeñas y formar partículas más grandes.

Cimentación: Parte de la estructura cuya misión es transmitir las cargas de la edificación al suelo.

Clinker: Es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento. Caliza cocida.

Dique: Muro artificial empleado para contener la fuerza de las aguas o del oleaje.

Dosificación: es el diseño racional de mezclas de concreto. Es un proceso por el cual se obtiene la correcta combinación de cemento, agregados, agua y aditivos, cuando sean necesarios, con el fin de producir un concreto conforme a determinadas especificaciones.

Gel: nombre con el que se le denomina al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento.

Heladicidad o congelamiento: Los materiales porosos absorben toda la humedad y al bajar las temperaturas ésta se hiel dilatándose y rajando los materiales como el hormigón. En este caso, el daño causado, se debe a la presión hidráulica que se genera en los poros debido al movimiento del agua. La presión que se desarrolla cuando las partículas expelen agua durante el congelamiento las rompe.

Hidratación: es la reacción química entre el cemento y el agua para ligar la pasta de cemento.

Modulo de Finura: Diámetro promedio de las partículas que hay en el material.

Mortero: Mezcla de cemento con arena y agua.

Segregación: Separación del concreto en sus componentes: áridos, cemento, agua.

Tamaño Máximo Nominal: es el menor tamaño de la 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.

Tamaño Máximo: es el menor tamiz por el que se pasa toda la muestra.

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

Porosidad cerrada: es aquella donde los poros no se comunican entre ellos mismos ni con el exterior.

Porosidad abierta: es aquella donde los poros se comunican entre sí y con el medio exterior al concreto.

INTRODUCCIÓN

Siglos atrás el concreto ha sido la herramienta principal para las grandes construcciones tales como el COLISEO ROMANO, PARTENON, el primer puente de concreto (no reforzado) construido en Souillac, Francia, entre otros, las cuales aún permanecen en pie después de varios siglos; demostrando así la gran resistencia y durabilidad que tiene este material, además tiene la ventaja de adquirir cualquier forma y tamaño debido a que se trabaja en su forma líquida.

Ha sido de interés el estudio de sus propiedades tanto físicas como mecánicas para ampliar su campo de aplicación y la prevención de sus posibles fallas, ya que es un material de bajo costo.

Uno de los factores que influye en el comportamiento de las propiedades mecánicas es la porosidad, la cual depende esencialmente de la clase, tamaño, forma y disposición de los componentes del concreto. Además interviene en su durabilidad, afectando la resistencia a la compresión, permitiendo el ingreso de agentes agresivos, lo cual disminuye el tiempo de vida útil proyectado para una estructura, por esta razón es importante su estudio.

El desarrollo de la industria de la construcción ha conllevado a buscar métodos más efectivos y económicos de inspección, que permitan un control rápido y confiable, entre estos se encuentra el ultrasonido, el cual evalúa las estructuras sin afectarlas. Por medio de este se puede estimar la resistencia mecánica tanto in situ como en laboratorio. La técnica ultrasónica de mayor aplicación es la de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) la cual se basa en la medición del tiempo de vuelo del haz sonoro, pudiéndose relacionar con la resistencia a la compresión del concreto.

Sabiendo que el concreto es uno de los materiales más utilizados por el hombre y uno de los más expuestos a daños producidos por el medio ambiente, requiere la atención necesaria para evitar pérdidas económicas y humanas. Por lo anterior con el presente trabajo se espera contribuir en el estudio de este material determinando la influencia de la porosidad sobre la resistencia a la compresión del concreto y la velocidad de pulso ultrasónico.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. Las discontinuidades, entre ellas, la porosidad, generalmente son introducidos durante su proceso de fabricación, su presencia facilita el ingreso de agentes agresivos dentro de la estructura creando fallas no visibles en la superficie difíciles de detectar a temprana edad, pues estas se observan cuando hay un daño significativo que afecta su funcionamiento y por lo tanto sus propiedades mecánicas.

Para un mejor rendimiento en las estructuras es necesario realizar el estudio de este material a temprana edad previendo así sus fallas, esto se realizará por medio de ensayos no destructivos con el fin de verificar y comparar estos resultados con los obtenidos en los ensayos destructivos con los cuales generalmente son evaluados, y así poder estimar su comportamiento.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General.

- ✓ Relacionar la resistencia a la compresión, la porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- ✓ Influencia de la relación agua/cemento en la porosidad, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en concreto curado en condiciones ambientales bajo techo.

- ✓ Determinar el efecto de la porosidad sobre la medición de pulso ultrasónico.

- ✓ Valorar la influencia de la porosidad sobre la resistencia a la compresión del concreto.

- ✓ Establecer la relación entre la porosidad, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico.

2. MARCO TEORICO

2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO.

Es el material resultante de la mezcla de cemento con agregados (grava, arena) y agua. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que lo convierten en un producto maleable con buenas propiedades adherentes, que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de consistencia rocosa, es decir, transforma el material plástico en un sólido. Durante este proceso físico-químico las propiedades del concreto evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los componentes y de las condiciones de curado.

La principal característica estructural del concreto es que resiste los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos. Otra característica importante del concreto es poder adoptar formas distintas, a voluntad del proyectista. Al colocarse en obra es una masa plástica que permite rellenar un molde, previamente construido con una forma establecida, que recibe el nombre de encofrado.

La evaluación de las propiedades que posee el concreto en una etapa determinada de su proceso de endurecimiento no es posible deducirlas directamente de las características del mismo, sino que debe recurrirse a ensayos que evalúan en forma directa dichas propiedades, las cuales son:

- a. Densidad
- b. Resistencia
- c. Variaciones de volumen
- d. Propiedades elásticas del concreto endurecido

El concreto es habitualmente empleado en obras de arquitectura e ingeniería, tales como edificios, puentes, diques, puertos, canales, túneles, etc., e incluso en aquellas edificaciones cuya estructura principal se realiza en acero, ya que el concreto endurecido es un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistente al desgaste que requiere de poco o nulo mantenimiento. [7] [9] [10] [17] [30] [42]

Una característica de diseño en el concreto es la durabilidad, la cual se considera como la capacidad para comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas y químicas agresivas a lo largo de la vida útil de la estructura protegiendo también las armaduras y elementos metálicos calados en su interior.

Por tanto, no solo hay que considerar los efectos provocados por las cargas y solicitaciones, sino también las condiciones físicas y químicas a las que se expone. Por ello se considera el tipo de ambiente en que se va a encontrar la estructura y que puede afectar a la corrosión de las armaduras, ambientes químicos agresivos, zonas afectadas por ciclos de hielo-deshielo, etc. [29] [30]

2.1.1 Componentes del concreto. El concreto se elabora con arena (agregado fino) y grava (agregado grueso) que constituyen entre el 65-75 [35] del volumen, y una pasta la cual esta compuesta de cemento hidráulico entre 10-15% [35], agua entre 15-20% [35] y aire atrapado o aire incluido intencionalmente entre 1-2% [35]. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40% [35] del volumen total del concreto.

Los agregados son partículas con resistencia mecánica adecuada y a condiciones de exposición a la intemperie; no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado. ^{[30] [42]}

2.1.1.1 Agregados. Uno de los tipos de agregados que componen el concreto es el agregado grueso, llamado también grava o gravilla cuyas partículas rocosas son de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm ^[7], aunque no existe homogeneidad de criterio para el tamaño máximo, sin embargo éste generalmente está determinado por el proceso de construcción; especialmente influye la separación del refuerzo y las dimensiones del elemento que se pretende construir. La grava requiere buena gradación, resistencia al desgaste, durabilidad, superficies libres de impurezas.

Estos agregados son partículas granulares de material pétreo de tamaño variable. Se originan por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. ^{[7] [9] [10] [30] [42]}

El otro agregado que compone el concreto es el agregado fino o arena, que constituye de hecho la mayor parte del porcentaje en peso del concreto. Dicho porcentaje usualmente supera el 60% del peso en el concreto fraguado y endurecido.

El agregado fino consistirá en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente, la cual puede llegar a tener hasta 10mm ² de tamaño de partícula. La forma de las partículas deberá ser generalmente cúbica o esférica por su alta compactación y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas.

² delosriosq.blogspot.com

En general, el agregado fino o arena deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33³, es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

El agregado fino debe estar bien gradado entre los límites fino y grueso y tener la siguiente granulometría:

Tabla 1. Granulometría de los agregados.

TAMIZ U.S STANDARD	DIMENSION DE LA MALLA (mm)	% EN PESO QUE PASA
Nº 3/8"	9.52	100
Nº 4	4.75	95 - 100
Nº 8	2.36	80 - 100
Nº 16	1.18	50 - 85
Nº 30	0.60	25 - 60
Nº 50	0.30	10 - 30
Nº 100	0.15	2 - 10

Fuente: es.wikipedia.org/wiki/Arena_(hormigón)

Además de los límites granulométricos indicados en la tabla 1, el agregado fino debe tener un módulo de finura entre el rango de 2.3 y 3.1⁴.

2.1.1.2 Cemento. Los cementos son productos que amasados con agua fraguan y endurecen formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergidos en agua. Este elemento tiene la característica de suministrar las propiedades adhesivas y cohesivas a la pasta.

³ American Society of Testing for Materials. ASTM C 33. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Especificación Normalizada de Agregados para Concreto.

⁴ El módulo de finura se determina dividiendo por 100 la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices U.S. Standard Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50 y Nº 100.

El cemento se encuentra en polvo y la finura de su molido es determinante en sus propiedades conglomerantes, influyendo decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas de su fraguado y primer endurecimiento. Sin embargo una finura excesiva provoca una retracción y calor de hidratación elevados. Además dado que las resistencias aumentan con la finura, el cemento debe estar finamente molido pero no en exceso.

Un factor importante que afecta la durabilidad de los concretos es el tipo y clase de cemento, los cuales dependen de la proporción de sus componentes y además se especifican de acuerdo a su uso y ambiente de exposición. El tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del concreto es el Cemento Portland, llamado así por su semejanza con una caliza natural que se explotaba en la Isla de Portland, Inglaterra.

La calidad del Cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150⁵, la cual establece cinco diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción como se indica en la tabla 2.

Otro factor importante que determina la calidad del cemento, es su resistencia a compresión a 28 días. Esta se determina en un mortero normalizado y expresa la resistencia mínima, la cual debe ser siempre superada en la fabricación del cemento. No es lo mismo, ni debe confundirse la resistencia del cemento con la del concreto, pues la del cemento corresponde a componentes normalizados y la del concreto dependerá de todos y cada uno de sus componentes. Pero si el concreto está bien dosificado a mayor resistencia del cemento corresponde mayor resistencia del concreto. ^[9] ^[32]

⁵ American Society for Testing of Materials. ASTM C 150. *Standard Specification for Portland Cement*. Especificación Normalizada para Cemento Portland.

Tabla 2. Clasificación del Cemento.

CEMENTO	APLICACIÓN
Tipo I	Cemento de uso general. Ej. Pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados.
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente a los sulfatos. Ej. Tuberías de drenaje y en climas cálidos los muros de contención, pilas, presas.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Ej. Carreteras y autopistas.
Tipo IV	Presenta calor de hidratación más bajo que el tipo III. Apto para uso masivo.
Tipo V	Alta resistencia a la acción de los sulfatos (aguas freáticas y domesticas).

Fuente: ASTM C 150

2.1.1.3 Agua de la mezcla. Debe ser limpia, exenta de ácidos, bases, aceites y materia orgánica; en general debe ser potable para cumplir su función, puesto que el exceso de impurezas en el agua no solo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también su durabilidad.

El agua apta está normalizada con una serie de parámetros que debe cumplir; en la normativa NMX C 122 ⁶ limita el pH, el contenido en sulfatos, en ión cloro y los hidratos de carbono.

Como el agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento, la cantidad de la misma debe ser la estricta necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el concreto disminuyendo la resistencia del mismo. Sin embargo una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua. ^{[17] [30] [42]}

⁶ Norma Mexicana. NMX C 122. Agua para concreto.

2.1.2 Procesos de fabricación del concreto. Para darle un uso específico al concreto se le debe efectuar una serie de procesos para su fabricación con el fin que este cumpla a cabalidad un uso determinado. Para el desarrollo de esta investigación se llevaran a cabo los siguientes procesos para su fabricación:

1. La caracterización de la materia prima.
2. El diseño de la mezcla.
3. Fraguado.
4. Curado.

2.1.2.1 Caracterización de la materia prima. Esta primera etapa hace referencia a la granulometría de los agregados (grueso y fino) y con ella la determinación del tamaño máximo y tamaño máximo nominal en el agregado grueso, el módulo de finura en el agregado fino y las gravedades específicas y reales para cada uno de ellos.

El tamaño resultante se aplica a la cantidad total de agregado que pasa a través de un arreglo mallas ordenadas de mayor tamaño a menor. Cada uno de los pesos retenidos se expresa como porcentaje (%retenido) del peso total de la muestra. El porcentaje acumulado que pasa, que será simplemente la diferencia entre 100 y el porcentaje retenido acumulado ($\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado}$).

Este proceso es importante llevarlo a cabo, ya que, hace referencia a las diferentes fracciones de agregado grueso y fino (agregados totales) sabiendo que las propiedades de los diferentes tipos de concreto, estabilidad volumétrica y resistencia dependen de la granulometría; por esta razón es recomendable que los agregados ocupen la mayor masa del concreto haciéndolo más trabajable. ^{[9] [30]}

Para la granulometría de los agregados se debe tener en cuenta las normas NTC 77⁷ y NTC 78⁸.

2.1.2.2 Diseño de mezcla. El método para hallar el diseño de mezcla para esta investigación es el ACI (American Concrete Institute); el cual se basa en tablas empíricas experimentales mediante las cuales se determinan los diferentes componentes de la mezcla. A continuación se muestran los pasos a seguir por medio de este método según las especificaciones y variables a conocer: ^[41]

a) Selección de la relación agua/cemento. La relación agua/cemento, también conocida como razón agua/cemento, a/c , es uno de los parámetros más importantes de la tecnología del concreto, pues influye de manera significativa en su durabilidad y resistencia final, también determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida.

Expresa la íntima relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Como es matemáticamente una razón, debe usarse un signo de división (barra: /) y nunca un guión. Se expresa de la siguiente manera:

$$R = \frac{a}{c} \quad (1)$$

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

Dado que el peso del agua utilizada siempre es menor que el peso del cemento, el número resultante es menor que la unidad.

⁷ Norma Técnica Colombiana. NTC 77. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos).

⁸ Norma Técnica Colombiana. NTC 78. Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz Icontec 74.

La diferencia de resistencia para una relación agua/cemento dada puede ser el resultado de cambios en el tamaño del agregado, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez; de los diferentes tipos y fuentes del cemento; del contenido de aire incluido; de la presencia de aditivos; y de la duración del periodo del curado.

Cabe resaltar que el exceso de agua en la mezcla provocará un asentamiento del agregado grueso y el agregado fino se quedará en la capa superior del molde. Además, el agua que no es consumida por la reacción de hidratación al final acabará abandonando el concreto, ya que se endurece, resultando poros microscópicos o agujeros reduciendo la resistencia final del concreto. ^{[9] [30]}

b) Selección de la consistencia. Al seleccionar la consistencia adecuada deberá usarse el asentamiento más reducido posible compatible con la adecuada colocación del concreto en obra, y para ello el método entrega una tabla para distintos tipos de construcciones y su asentamiento óptimo. En la tabla 3 se presentan los asentamientos recomendados según el tipo de estructura y condiciones de colocación.

c) Cantidad de agua necesaria para la mezcla. La cantidad de agua que se requiere en la mezcla es calculada a partir del asentamiento necesario y del tamaño máximo de agregado como es mostrado en la tabla 4.

d) Cantidad de cemento para la mezcla. La cantidad de cemento por unidad de volumen se obtiene a partir de la relación agua/cemento y del contenido de agua; valores previamente determinados, los cuales están relacionados mediante la siguiente ecuación:

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

Tabla 3. Asentamientos recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad.

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

Autores: Tecnoconcreto. Diseño de mezclas.

Tabla 4. Agua en kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados.

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

Autores: Tecnoconcreto. Diseño de mezclas.

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

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

Donde:

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

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

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

La tabla 5 muestra el valor de la relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso (b/b_{10}) de acuerdo al tamaño máximo de agregado y el módulo de finura de la arena.

Tabla 5. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

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

Autores: Tecnoconcreto. Diseño de mezclas.

f) Estimación del contenido de agregado fino. El volumen de agregado fino determina por la diferencia entre el volumen total de la mezcla (1m^3) y la suma de los volúmenes de cemento, agua y agregado grueso.

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

Donde: V_{af} = Volumen de agregado fino
 V_a = Volumen de agua
 V_c = Volumen de cemento
 V_{ag} = Volumen de agregado grueso

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

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

g) Cantidad de componentes para el número de muestras. Se debe tener en cuenta el volumen total necesario para la realización de las muestras, por ello se multiplica la cantidad en gramos de cada componente por el número de probetas, esto con el fin de que al realizar la mezcla no falte, ni se malgaste material.

2.1.2.3 Fraguado. Se le llama *fraguado* a la fase inicial de hidratación donde ocurre el cambio del estado fluido al estado sólido de la pasta, perdiendo la mezcla su plasticidad y volviéndose difícil de manejar, esta fase es solo una parte del endurecimiento del concreto. El proceso de fraguado es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento, por esta razón su comportamiento depende del tipo de cemento utilizado.

El tiempo de fraguado es el lapso en que la mezcla cambia de estado, dependiendo a su vez de factores como la temperatura del ambiente en que se esta trabajando, el contenido, clase y finura del cemento. ^[17]

2.1.2.4 Curado. Se le llama *curado* al proceso de endurecimiento normal de la mezcla, la cual indica un nuevo estado que alcanza un valor muy apreciable de resistencia, es decir este proceso se caracteriza por un desarrollo progresivo de resistencias mecánicas.

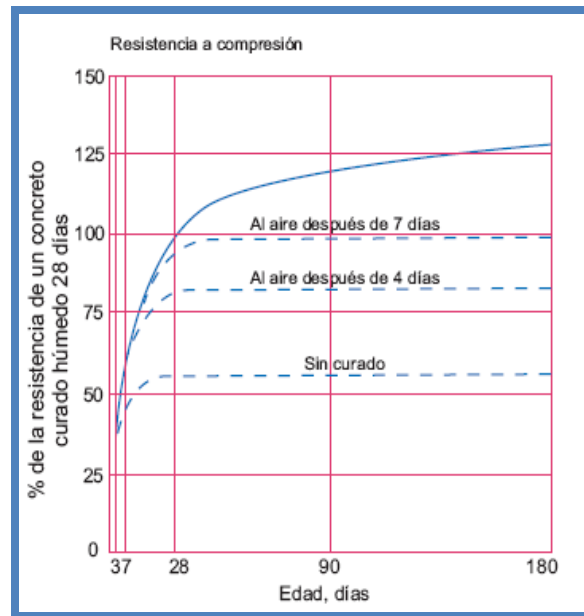
El curado también es llamado fraguado final, ya que estos dos procesos no son más que dos estados separados usualmente, donde en realidad es un único proceso de hidratación continuo, puesto que las reacciones ocurren durante toda la etapa de maduración del concreto (28 días), es decir, estas reacciones continúan hasta alcanzar que todos los constituyentes del cemento provoquen el endurecimiento de la masa.

El curado es uno de los procesos más importantes porque define la calidad del producto final de una obra civil, ya que un buen curado promueve la hidratación del cemento y por ende el máximo desarrollo en su resistencia final. Este proceso se hace necesario para evitar cambios bruscos de temperatura, por esto se debe tener en cuenta que la cantidad de agua de curado depende de la temperatura del ambiente, es decir, la cantidad de agua de curado es proporcional a la temperatura.

Lo anterior no indica que este proceso siempre se deba llevar a cabo, pues también las estructuras expuestas al aire ganan resistencia pero en comparación con las curadas bajo agua es muy poca, como se indica en la grafica 1.

Además, el curado al aire no disminuye la porosidad de la pasta, permitiendo el ingreso de humedad y agentes agresivos en el interior de la estructura de concreto por tanto disminuye la vida útil de diseño. ^[34] ^[40]

Gráfica 1. Resistencia a la compresión de cilindros de 15x30 cm en función de la edad, para una variedad de condiciones de curado.



Fuente: www.sika.com.co

2.1.3 Propiedades físicas del concreto. El concreto es uno de los materiales más utilizados gracias a las propiedades físicas adquiridas durante su proceso de endurecimiento, el cual se lleva a cabo durante los primeros 28 días de su fabricación, por esto es importante su estudio a través de este periodo, pues es allí donde adquiere significativamente cada una de estas; entre ellas: la resistencia a la compresión, el modulo de elasticidad, porosidad, entre otras.

2.1.3.1 Resistencia a la compresión. Esta propiedad se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) y se le designa con el símbolo $f' c$.

Es una propiedad física fundamental que mide la calidad del concreto de una manera sencilla, rápida y eficaz, y es empleada con frecuencia en los cálculos

para el diseño de las estructuras. Siendo esta la propiedad más característica e importante del concreto, puesto que de ella se evalúan las demás propiedades mecánicas.

La resistencia a la compresión establece el límite inferior de carga que puede soportar el concreto, cumpliendo que cada amasada de concreto colocada tenga esa resistencia como mínimo. Para evaluarla se utilizan probetas cilíndricas normalizadas realizadas con las mismas amasadas puestas en obra. Estas probetas son sometidas a ensayos de rotura a compresión. ^{[7] [30]}

La resistencia a compresión varía significativamente con la variación de algunos parámetros, tales como:

- La relación agua-cemento (a/c).
- El tamaño máximo de la grava.
- Las condiciones de humedad durante el curado.
- La edad del concreto.
- La velocidad de carga.

2.1.3.2 Módulo de Elasticidad. El modulo de elasticidad, E, es la pendiente de la parte inicial de la curva esfuerzo en función de la deformación unitaria del concreto y aumenta con la resistencia del concreto a compresión. Normalmente se usa el denominado módulo secante, que se obtiene de la pendiente de la recta que une el origen de la curva de esfuerzos Vs. deformación unitaria del concreto, con un punto correspondiente a un esfuerzo de $0,45 f' c$ indicando que es un valor variable puesto que depende de la resistencia a la compresión.

Esta propiedad del concreto es muy importante para la predicción de las deflexiones producidas por cargas de corta duración en los elementos a flexión. ^[30]

[42]

2.1.3.3 Porosidad. Se define como sistemas de vacíos presentes en la estructura interna del concreto endurecido, los cuales no contienen materia sólida. Esta característica es la que condiciona el comportamiento posterior del concreto para absorber líquidos y su capacidad de flujo a través de él. Esta depende a su vez de la relación agua/cemento, de la calidad del cemento y de los agregados.

Tipos de porosidad.

Hay dos formas como se puede clasificar la porosidad, una de ellas es la manera como se puede encontrar y la otra forma es de acuerdo al lugar donde se encuentra.

La clasificación de la porosidad según como se encuentre, se divide en dos, porosidad cerrada y porosidad abierta. ^[43]

a. La porosidad cerrada. Es aquella donde los poros no se comunican entre ellos mismos ni con el exterior; está principalmente formada por una parte de la porosidad de los agregados y por el aire ocluido en el concreto. Este tipo de porosidad es difícil de medir, ya que requiere de la trituración del material para medir todos los poros intercomunicados o no.

b. La porosidad abierta. Es aquella donde los poros se comunican entre sí y con el medio exterior al concreto; está formada por una parte de porosidad de los agregados y por los microcanales dejados al evaporarse parte del agua de amasado del concreto. Este tipo de porosidad es aquella que debe preocupar a la mayoría de los constructores en concreto, ya que es la que favorece el ingreso de agentes agresivos, la retracción hidráulica, la heladicidad y las resistencias bajas.

La otra forma como se puede clasificar la porosidad de acuerdo al lugar donde se encuentren los poros, hay dos clases: la porosidad en la pasta y la porosidad en los agregados.

a. Porosidad de la pasta. Los poros que se encuentran ubicados en esta parte abarcan un rango de tamaño, permitiendo clasificarlos en cuatro categorías de acuerdo a su origen, ubicación y características, aunque no existe una clara demarcación entre ellos. Estos son: poros por aire atrapado, poros por aire incorporado, poros capilares, poros gel. Estos cuatro tipos de porosidad que se pueden presentar en la pasta corresponden a espacio que están en el concreto fuera de los límites de los agregados.

En la figura 1 se muestran la diferencia en los tamaños de los poros que se pueden presentar en la pasta de cemento.

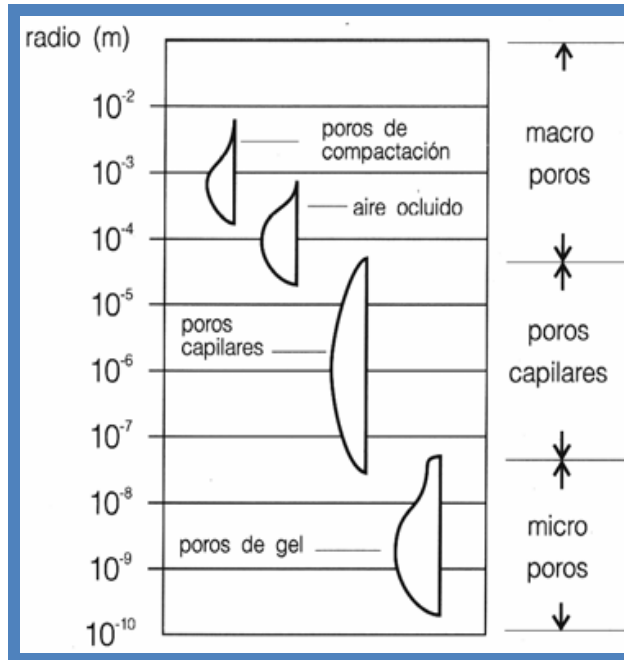
b. Porosidad de los agregados. En este tipo de porosidad suele presentarse en las rocas los llamados macroporos, los cuales son los suficientemente grandes como para que los efectos de la capilaridad sean muy pequeños o despreciables en ellos.

La porosidad de los agregados repercutirá en la adhesión superficial del concreto y en el desarrollo de la hidratación, ya que absorberá más agua de la que se requiere en la mezcla. ^{[11][13][15][38][43]}

Medición de la porosidad.

La porosidad abierta se puede medir de varias maneras, una de ellas es por un instrumento llamado Porosímetro, en este caso, con el Porosímetro de campo Ruska, que gracias al avance tecnológico facilita la medición y sobretodo la precisión de los resultados que se pueden obtener en una muestra de concreto.

Figura 1. Estructura porosa de la pasta de cemento.



Fuente: upcommons.upc.edu

- **Porosímetro de campo Ruska.**

El principio de este método está basado por la ley de Boyle, la cual sirve para determinar la porosidad efectiva, que es el porcentaje de espacio poroso intercomunicado con respecto al volumen del concreto.

Otro tipo de porosidad es la absoluta, la cual es el porcentaje de espacio total con respecto al volumen de la roca sin tener en cuenta si los poros están interconectados entre si o no.

La determinación de la porosidad consiste en la medida del volumen de sólidos o granos del núcleo de la probeta, seguida por la medición del volumen total del mismo. ^[31]

La porosidad se halla con la ley de Boyle y las siguientes ecuaciones.

$$P(\%) = \frac{V_p}{V_t} * 100 \quad (5)$$

$$P(\%) = \frac{(V_t - V_g)}{V_t} * 100 \quad (6)$$

$$P(\%) = \left(1 - \frac{V_g}{V_t}\right) * 100 \quad (7)$$

Donde:

P : porosidad

V_t : volumen total

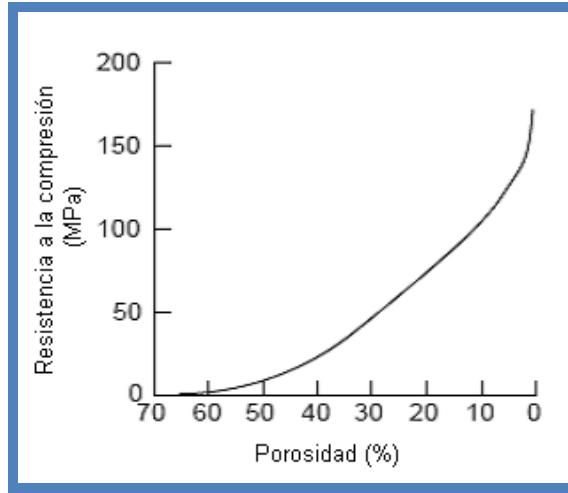
V_g : volumen de los granos del espécimen.

Influencia de la porosidad en la resistencia a la compresión.

La porosidad, la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión están interrelacionadas ya que de las dos primeras dependerá que tan resistentes son las estructuras de concreto, ya que al aumentar la relación agua/cemento aumenta la porosidad y a su vez disminuye la resistencia a la compresión.

En la grafica 2 se muestra el comportamiento entre la porosidad y la resistencia a la compresión. ^{[30] [38] [45]}

Gráfica 2. Porosidad Vs Resistencia a la compresión.

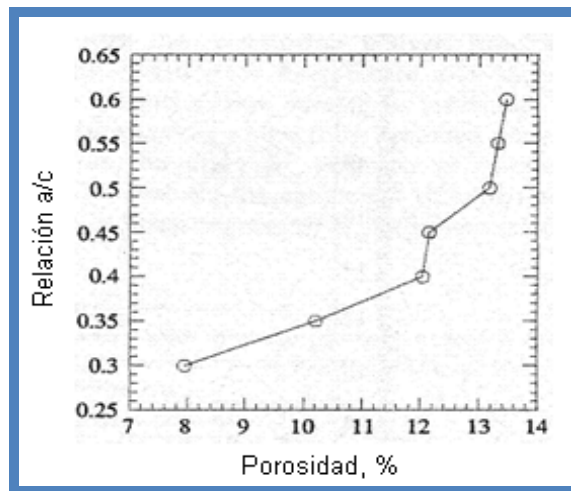


Fuente: [1]

Influencia de la relación agua/cemento en la porosidad.

La relación agua/cemento tiene una influencia significativa en esta característica, ya que a una relación agua/cemento alta, el concreto se vuelve más trabajable pero hay más poros en la masa por ende disminuye la resistencia. En la gráfica 3 se muestra esta influencia. [30] [45]

Gráfica 3. Variación de la porosidad con la relación agua/cemento.



Fuente: [2]

2.2 ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN EL CONCRETO

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido, el cual ha sido implementado como soporte previo a la aplicación de ensayos destructivos en el concreto.

Entre las pruebas no destructivas se encuentran el ultrasonido, el cual mide el tiempo de vuelo de una onda que viaja a través de un material; el esclerómetro que es un instrumento de medición empleado, para la determinación de la resistencia a compresión en concretos. Su funcionamiento consiste en una pesa tensada con un muelle, dicha pesa tensada es lanzada contra el concreto y se mide su rebote.

2.2.1 Técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en el concreto. Para el estudio del comportamiento de estructuras de concreto, la técnica más utilizada es la de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), ya que por medio de esta se pueden localizar las zonas de mayor daño en el concreto y en las cuales se deben tomar medidas de prevención.

La técnica cubre la determinación de la velocidad de propagación de los pulsos de una onda longitudinal a través del material. Las ondas longitudinales normalmente usadas tienen frecuencias entre 20 a 150 KHz, las cuales son bajas comparándolas con las de un acero, por la heterogeneidad del concreto, según lo indica la norma ASTM C 597 ⁹.

Los pulsos de la onda longitudinal son generados por un transductor electroacústico, el cual es mantenido en contacto con una superficie de la muestra bajo prueba. Después de atravesar el concreto, los pulsos se reciben y se convierten en energía eléctrica por un segundo transductor (receptor) situado a una distancia

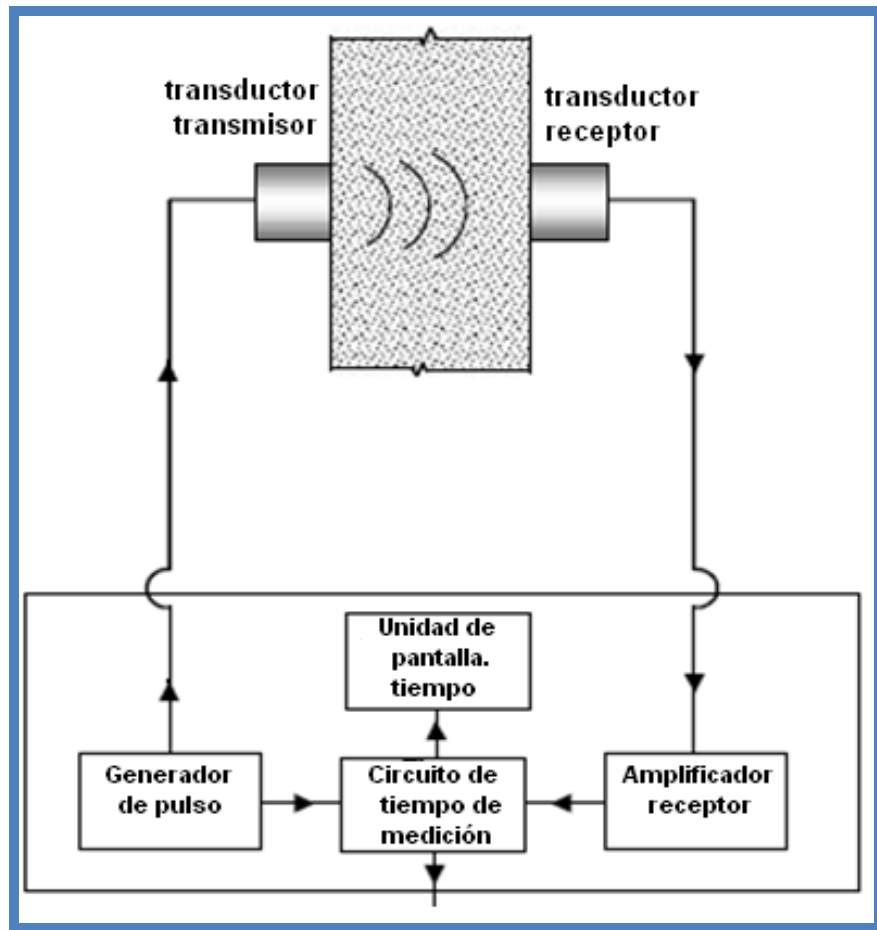
⁹ American Society of Testing for Materials. ASTM C 597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Método de prueba estándar para medir la velocidad de pulso en concreto.

L del transductor que transmite (transmisor). El tiempo de transito t se mide electrónicamente. Ver figura 2.

La velocidad de pulso V se calcula dividiendo Longitud que recorre la onda sobre el tiempo que gasta en recorrerla.

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

Figura 2.Diagrama esquemático de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.



Fuente: ASTM C 597

La velocidad de pulso V , de una onda longitudinal en un concreto macizo está relacionada con las propiedades elásticas del material y su densidad, como se indica en la siguiente fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (9)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad

μ = Módulo de Poisson

ρ = Densidad

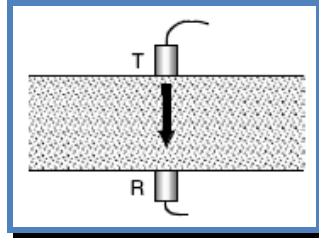
Por otra parte, es esencial en todas las pruebas de ultrasonido utilizar alguna forma de acoplar las caras o los transductores y el material bajo prueba ya que la fiabilidad de los datos tomados depende de un buen acoplante acústico, el no hacerlo resultará en una pérdida de señal debido a la falta de acoplamiento acústico. Hay varios tipos de acoplantes que pueden ser utilizados en superficies lisas como lo son la grasa, la glicerina, el jabón líquido, entre otros. ^{[1] [12] [16] [18] [30]}

Existen tres posibles configuraciones de los transductores en los que pueden organizarse: ^{[16] [18] [30]}

a) Directa: El método de transmisión directa, es la más conveniente y la más satisfactoria ya que la máxima energía del pulso es transmitida y recibida. Como se muestra en la figura 3.

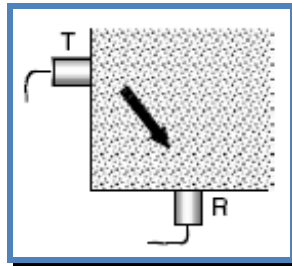
b) Semi- directa: Se puede utilizar de manera satisfactoria, pero requiere de cuidado en que los transductores no están muy alejados, de lo contrario la transmisión de pulsos puede disminuir y las señales del pulso puede no ser detectadas. Como se muestra en la figura 4.

Figura 3.Método de transmisión directa.



Fuente: [16]

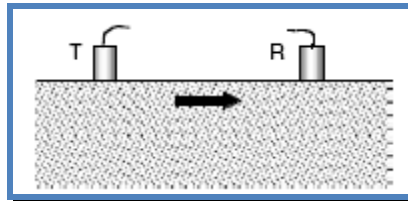
Figura 4.Método de transmisión semi-directa.



Fuente: [16]

c) **Indirecta:** Es menos satisfactorio, porque la amplitud de la señal recibida es significativamente inferior a la recibida por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores. Como se muestra en la figura 5.

Figura 5.Método de transmisión indirecta.



Fuente: [16]

2.2.1.1 Factores que afectan la velocidad de pulso. La aplicación efectiva de este método en el estudio del concreto esta condicionada por el conocimiento de una serie de factores que afectan la velocidad de pulso.

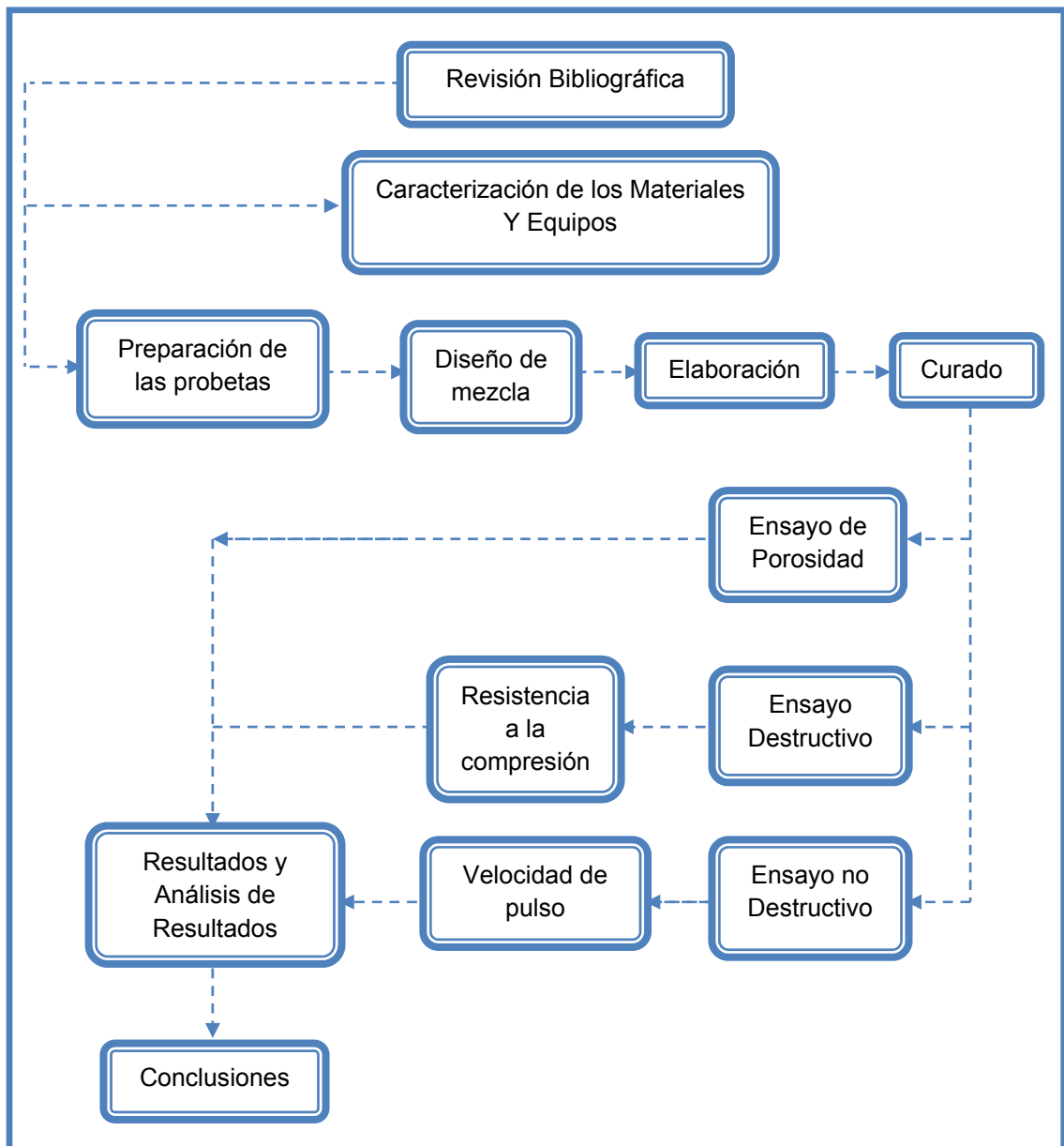
Los factores derivados directamente de las propiedades del concreto son:

- **Relación Agua/Cemento:** A medida que se aumenta esta relación la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión disminuyen, suponiendo que no hay ningún otro cambio en la composición del concreto. ^{[16] [18] [30]}
- **Contenido de agua:** El valor de la velocidad de pulso puede aumentar o disminuir significativamente según su contenido de agua, es decir se incrementa en condiciones de saturación, sin embargo las variaciones en la resistencia a compresión no es significativa. ^{[16] [18] [30] [39]}
- **Cantidad y tipo de agregados:** Normalmente las rocas usadas como agregados en el concreto tienen mayores velocidades de onda que en la pasta de cemento, a fin de aumentar la cantidad total de una determinada matriz de pasta de cemento, también aumenta la medida de la velocidad de las ondas del compuesto. El tipo de agregado no tiene un efecto significativo sobre el VPU. ^{[16] [18] [30]}
- **Edad del Concreto:** A medida que transcurre el tiempo sigue la hidratación del cemento, disminuyendo la porosidad y propagándose las ondas más rápido en el medio sólido; es decir el efecto de la edad del concreto en el VPU es similar a los efectos de resistencia del concreto. ^{[16] [30] [36]}

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la figura 6 se muestra un diagrama de flujo con las etapas que se llevaron a cabo para la realización de la presente investigación.

Figura 6.Esquema de la Metodología para el desarrollo de la investigación.



3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Inicialmente se realizó una recopilación y revisión de la información relacionada con el tema de investigación a través de documentos como artículos, trabajos de grado, libros. Además, se consultaron normas ASTM e ICONTEC, de las cuales se extrajo información valiosa para el avance de la presente investigación, en lo relacionado al desarrollo experimental de la misma.

Con la información recopilada se determinaron algunos parámetros para la realización de la investigación, tales como los valores de relaciones de a/c, las condiciones para la elaboración de las probetas, la técnica no destructiva y las pruebas que permitían evaluar la resistencia a la compresión, la porosidad, entre otras, y así convertir esta información en el punto de partida del presente trabajo.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS.

3.2.1 Materiales. Para la preparación de las probetas de concreto, se utilizaron los siguientes materiales: Cemento Portland Tipo I, Agregados, Agua potable.

A continuación se presentan algunas características básicas de cada uno de ellos:


- **Cemento Portland Tipo I.** Fue suministrados por la Escuela de Ingeniería Civil, su nombre comercial es cemento Diamante. Este material cumple con los requisitos obligatorios de las normas NTC 121¹⁰, NTC 321¹¹. [8]

¹⁰ Norma Técnica Colombiana. NTC 121. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas.

¹¹ Norma Técnica Colombiana. NTC 321. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones químicas.

- **Agua potable.** Suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y los resultados de los análisis de la calidad del agua son facilitados por la misma entidad y son presentados a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de los análisis del control de calidad del agua realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

No Aplica F CC 507-006 Rev.:0		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA			AÑO:		2009													
PARAMETROS MES	Parámetros Fisicoquímicos												Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL		
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente UPC	pH	Oloro y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales		Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
Enero	90	1,05	0,81	4,0	7,35	0	0,06	51,2	64,0	2,5	20,1	ND	1,9	ND	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	81	1,07	1,1	2,8	7,28	0	0,07	47,4	51,0	2,5	20,6	ND	2,0	ND	162	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,1	2,85	7,04	0	0,08	40,8	68,1	2,7	32	ND	2,0	ND	186	0	100	0	100	0,02
Abril	87	1,03	1,3	2,6	7,16	0	0,09	47,5	65,1	2,5	24,3	ND	1,9	ND	174	0	100	0	100	0,32
Mayo	93	1,06	1,1	2,1	6,99	0	0,09	42,2	62,4	2,7	22,6	ND	2,2	ND	186	0	100	0	100	0,10
Junio	90	0,98	1,0	3,8	7,06	0	0,08	42,5	57,6	2,4	20,2	ND	1,8	ND	180	0	100	0	100	0,02
PROMEDIO	89	1,02	1,1	3,0	7,15	0	0,08	45,3	63,0	2,5	23,3	ND	2,0	ND	178	0,0	100	0,0	100	0,08
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/día	0	100	0	100	0 - 5
Convenclones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable																			
Nota:	El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5 AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.																			

Elaboró: URIEL SALOMON BARRAGAN

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ
Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente: www.amb.com.co

- **Agregados.** Para la preparación de la mezcla se utilizó arena como agregado fino, cuya procedencia fue de pescadero y como agregado grueso se utilizó grava de igual procedencia que la arena.

Para la caracterización de los agregados se realizaron pruebas granulométricas a fin de determinar el módulo de finura y el tamaño máximo de agregado grueso mostrándose estos resultados en las tablas 8 y 9 del capítulo 4. Además se

determinaron gravedades específicas, pesos específicos y la absorción para cada tipo de agregado basándose en las normas NTC 92¹², NTC 176¹³ y NTC 237¹⁴.

La caracterización estos materiales se realizó en el Centro de caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander.

Para la granulometría de los mismos se tuvo en cuenta las normas NTC 77¹⁵, NTC 78¹⁶, para su caracterización se utilizó la escala de tamices del 4, 8, 16, 30, 50 y 100 en el orden respectivo para el agregado fino, pesando lo que quedó en cada uno de ellos, a su vez se determinó su modulo finura; para el agregado grueso se tomo el juego de tamices $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ y 4 en el orden respectivo, hallando a su vez el tamaño máximo y tamaño máximo nominal del agregado grueso; además se determinaron las gravedades específicas para cada tipo de agregado.

Adicionalmente se utilizaron tubos PVC como moldes, tapas de acero utilizadas como base de los tubos, correas de ajuste, varilla compactadora con punta esférica, ACPM aplicado en el interior de los moldes para facilitar el desencofrado y azufre líquido para llevar a cabo el proceso de refrentado, es decir, para que las superficies de las probetas queden planas y paralelas, para realizar el ensayo de resistencia a la compresión.

3.2.2 Equipos. Los equipos utilizados para la realización de las pruebas son los siguientes: Equipo de ultrasonido de baja frecuencia James Instruments V-METER Mk II, Máquina Universal de ensayos marca TREBEL y el Porosímetro de campo

¹² Norma Técnica Colombiana. NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado.

¹³ Norma Técnica Colombiana. NTC 176. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso.

¹⁴ Norma Técnica Colombiana. NTC 237. Método para determinar el peso específico y la absorción de agregados finos.

¹⁵ Norma Técnica Colombiana. NTC 77. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos).

¹⁶ Norma Técnica Colombiana. NTC 78. Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado.

marca Ruska. A continuación se presentan algunas características básicas de estos equipos.

- **Equipo de Ultrasonido James Instruments V-METER Mk II.** El equipo utilizado en el ensayo es mostrado en la Fotografía 1, el cual fue facilitado por la empresa IMT Colombia. Este cuenta con un dispositivo que registra el tiempo de vuelo de la onda desde 0,1 hasta 6400 μ s, tiene una potencia de entrada de 250 μ v entre frecuencias de 36 y 500 KHz; a su vez cuenta con dos transductores, un emisor y un receptor; con frecuencia de trabajo de 54 kHz. El equipo puede medir hasta longitudes de 100 pies de concreto. La calibración de este equipo se llevó a cabo cada día antes de realizar las mediciones.

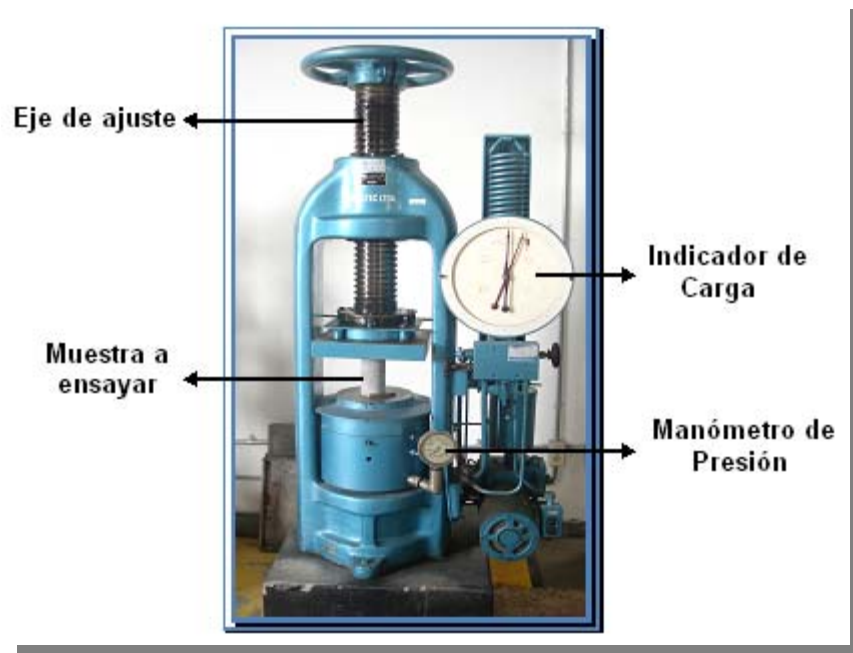
Fotografía 1.Equipo de Ultrasonido, V Meter MK II



- **Máquina Universal marca TREBEL para Ensayo de Compresión.** El equipo empleado pertenece a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, el cual se encuentra ubicado en el Centro de Caracterización de Materiales de esta misma escuela (ver fotografía 2). La

máquina universal de ensayos está diseñada para pruebas de tensión, compresión, pandeo, flexión y doblado. Las medidas son tomadas hidráulicamente por un motor. Además cuenta con un manómetro de presión, el cual está equipado con un dispositivo de contacto que se puede ajustar para mantener la carga constante, así como para frenar los cambios de carga. Así mismo soporta cargas hasta 40.000 Kgf.

Fotografía 2.Maquina Universal TREBEL para Ensayo de Compresión.



- **Porosímetro de campo Ruska.** Se emplea para la prueba el equipo perteneciente a la escuela de Ingeniería de Petróleos de la UIS, ubicado en la sede de Gautiguará, ver fotografía 3. Es un instrumento pequeño y portátil, utilizado para medir la porosidad efectiva de núcleos de muestras de concreto. Es un porosímetro de alta presión que cuenta con un bloque colector al que se le adjunta un cilindro de medición y un montaje de pistón para medir el desplazamiento de volumen; además cuenta con un manómetro de mercurio que indica la presión del sistema del porosímetro. Este equipo a su vez, cuenta con un

juego de tres copas de núcleos de diferentes tamaños y un picnómetro con tapa y plato y un tarro lleno de mercurio.[31]

Fotografía 3.Porosímetro de Campo Ruska



Adicionalmente se utilizó una balanza electrónica para pesar los materiales componentes del concreto y un calibrador digital para realizar las mediciones del diámetro y la longitud de las probetas de concreto.

3.3 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Se trabajaron cuatro relaciones agua/cemento 0.45, 0.50, 0.55, y 0.60; elaborándose cuatro probetas de cada relación para realizar los ensayos de resistencia a la compresión, porosidad y velocidad de pulso ultrasónico para los días 7, 14 y 28. Cabe resaltar que las cuatro probetas de cada relación agua/cemento fueron destinadas para el ensayo no destructivo, a partir de estas posteriormente se destinaron dos para el ensayo de resistencia a la compresión y una para la valoración de la porosidad. Se fabricaron en total 48 probetas

cilíndricas cuyas dimensiones fueron de 7 ± 0.05 cm de diámetro x 14 ± 0.05 cm de largo.

Para la fabricación de estas muestras se realizó inicialmente el diseño de mezcla, se elaboraron las probetas y finalmente se sometieron al proceso de curado a condiciones ambientales bajo techo. Los detalles de estos procesos se presentan a continuación.

3.3.1 Diseño de Mezcla. Para realizar el diseño de las mezclas se partió en la escogencia de un asentamiento, en este caso se eligió de 5 a 10 cm, el cual es para mezclas en términos de consistencia media, como se muestra en la tabla 4 (capítulo 2).

Con el valor del asentamiento y conociendo el tamaño máximo de agregado, el cual fue calculado en la caracterización de la materia prima por granulometría dando un valor de $\frac{3}{4}$ " (19.050mm) se halló la cantidad de agua necesaria en Kg; interpolando los valores que aparecen en la tabla 5 (capítulo 2); los cuales están para tamaños máximos de agregados de 13mm y 20 mm correspondientes a un asentamiento de 8 a 10, dando como resultado la cantidad de agua necesaria en kilogramos para un tamaño máximo nominal de 19.050mm de 202.143Kg.

Conociendo la relación a/c y la cantidad de agua, se determinó la cantidad de cemento necesario en la mezcla en kilogramos utilizando la fórmula 2 (capítulo 2); para hallar su volumen se dividió la cantidad en kilogramos de este entre su peso específico, el cual para el Cemento Portland tipo I marca Diamante es de 3 Kg/m^3 .

Como paso siguiente, se determinó la cantidad de agregado grueso (Kg) necesaria para la mezcla, basada en la fórmula 3 (capítulo 2), donde la relación del volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto (b/b_0) se obtuvo de la tabla 6. El valor correspondiente a un tamaño

máximo de agregado de 19.050mm y con un módulo de finura de 2.68 que se determinó por granulometría; se obtuvo interpolando, dando como resultado 0,6225. Para calcular la cantidad de agregado grueso en Litros, el peso obtenido se dividió entre el peso específico de dicho agregado.

Seguidamente se procedió a calcular el volumen de agregado fino utilizando la fórmula (4), en la cual a 1000 se le resta la suma de los volúmenes que se obtuvieron anteriormente (cemento, agua y agregado grueso).

Finalmente se determinó la cantidad de mezcla según el número de probetas a fabricar; multiplicando cada cantidad hallada de cemento, agua, agregado grueso y fino por el volumen y número de probetas.

3.3.2 Elaboración de las probetas. Las probetas fueron fabricadas en el Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

Inicialmente se limpiaron y se armaron los moldes; los cuales estaban elaborados por un tubo PVC de 7cm de diámetro y 15 cm de longitud aproximadamente; una base de acero, la cual fue previamente lijada y limpiada para colocarla en un orificio del tubo, formando así la base del molde; y por último se utilizó una correa para fijar y ajustar el molde a la base del mismo, como se indica en la Fotografía 4b.

Una vez listos los moldes, se procede a un paso importante en la realización de las probetas que es impregnar el interior de los moldes de ACPM para que la mezcla no se adhiera al tubo y así desmoldar fácilmente. Fotografía 4c.

Luego se procedió a realizar las mezclas; pesando cada uno de los materiales en la balanza analítica, de acuerdo a los cálculos para el diseño de las mezclas

mostrados en el capítulo 4 en las tablas 11, 12, 13, 14 para las respectivas relaciones agua/cemento.

En la preparación de las mezclas; primero se depositó la arena, seguidamente el cemento, los cuales se mezclaron por un tiempo hasta homogenizar, esta se extendió en forma de círculo para así luego agregar la grava y seguidamente el agua, como se indica en la Fotografía 5.

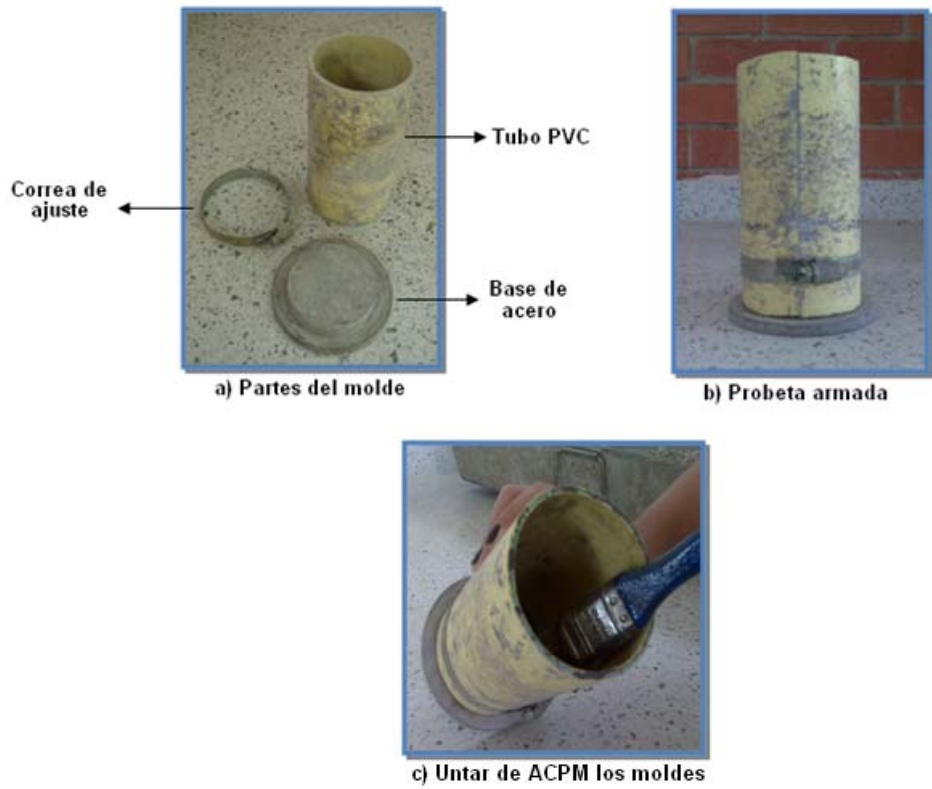
Una vez vertidos todos los materiales en el recipiente, se mezclaron vigorosamente hasta obtener una pasta homogénea y manejable como se aprecia en la fotografía 5d.

Una vez lista la mezcla, se deposita en los moldes en tres capas de igual volumen aproximadamente hasta llenarlo. Cada una de las capas se empareja con la mano y se apisona con la varilla compactadora utilizando el extremo semiesférico de esta, dando 25 golpes distribuidos uniformemente en cada una de las capas, además se dieron unos golpes por fuera del tubo para que ayude a una mejor compactación de la mezcla. Se debe seguir las recomendaciones de la norma NTC 1377¹⁷.

Posteriormente, se dejaron entre 18 y 24 horas de fraguado en los moldes a temperatura ambiente bajo techo como se muestra en la fotografía 6 y después se desencofraron.

¹⁷ Norma Técnica Colombiana. NTC 1377. Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio.

Fotografía 4. Preparación de los moldes



Fotografía 5. Preparación de la Mezcla



Fotografía 6.Fraguado de las probetas



3.3.3 Curado de las probetas. Después de sacarlas del molde, las probetas se dejaron curar en condiciones ambientales bajo techo durante los días 7, 14 y 28. Este proceso se llevó a cabo en los laboratorios del Centro de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil.

Fotografía 7.Curado de las probetas.



3.4 ENSAYO DE POROSIDAD

La medición de la porosidad en las probetas de concreto se efectuó con el porosímetro de campo Ruska, el cual se basa en el principio de Arquímedes y la ley de Boyle midiendo porosidad efectiva (poros intercomunicados).

Posterior al tiempo de curado al aire durante los días 7, 14 y 28 se realizó el ensayo de porosidad a una probeta por cada relación agua/cemento. A cada una de estas se les efectuó el ensayo tres veces obteniendo así un promedio de sus resultados.

Para el desarrollo de la prueba a cada una de las probetas destinadas para la determinación de porosidad se les extrajo el núcleo en forma de cubo con medidas aproximadas a 1 pulgada de lado; el porosímetro utilizado cuenta con tres copas de núcleos de distintos tamaños (como se observa en la fotografía 8a), de las cuales se seleccionó la que mejor se ajustaba al tamaño del cubo; en este caso la más grande, cuyo diámetro es de 1 pulgada.

La copa escogida se ajustó al porosímetro con la válvula de descargue abierta, seguidamente se llevó la manga micrométrica a su posición inicial, la cual viene calibrada con el equipo según la copa seleccionada; para la copa escogida la posición inicial es de 400.

Luego se cerró la válvula de descargue y se llevó la manga micrométrica lentamente hasta cero; a medida que la manga va de 400 a cero el nivel de mercurio en el manómetro aumenta; una vez la manga micrométrica llegó a cero se tomó el nivel de mercurio alcanzado como referencia para las mediciones posteriores.

Seguidamente se procedió a desmontar, es decir, se llevó la manga a su posición inicial y seguidamente se abrió la válvula de descargue suavemente y se desmontó la copa del equipo.

Posteriormente, se introdujo el núcleo de la relación agua/cemento a experimentar dentro de la copa (fotografía 8b), seguidamente se montó la copa con la muestra en el equipo, ajustándola. Se llevó la manga a la posición inicial, es decir, 400 y se cerró la válvula de descargue, se desplazó suavemente la manga hasta alcanzar la altura de mercurio de referencia. Se tomó la medida de llegada de la manga en centésimas.

Una vez tomada la medida de la manga micrométrica, se consultó en el manual del equipo hallando el volumen equivalente (cm^3) a esa medición por medio de unas graficas incluidas en él, en este caso la equivalencia es la del volumen del grano, el cual es necesario para hallar la porosidad efectiva.

Se desmontó nuevamente la copa con la muestra y se procedió a hallar el volumen total de la muestra introduciendo el picnómetro en una vasija, llenándolo con mercurio al ras como es mostrado en la fotografía 9a.

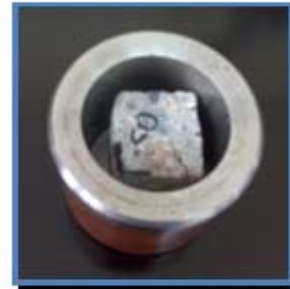
Seguidamente se introdujo la muestra en el picnómetro y con ayuda de la tapa de este, se sumergió en él hasta lograr cerrarlo completamente como es mostrado en la figura 9b; el volumen de mercurio recogido de la vasija (rebotado del picnómetro) se llevó a la copa usada para obtener el volumen total de la muestra (ver fotografía 9c) repitiendo el procedimiento previamente mencionado.

Por último se calculó la porosidad del núcleo aplicando la ley de Boyle a los resultados obtenidos.

Fotografía 8. Accesorios del porosímetro de campo Ruska



a) Juego de copas para núcleos



b) Muestra a ensayar en la copa para núcleos

Fotografía 9. Medición del volumen total.



a) Rebosar el picnómetro con mercurio



b) Introducir la muestra en el picnómetro



c) Mercurio sobrante en la copa para núcleos

3.5 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Este ensayo destructivo mide el comportamiento del concreto, bajo cargas de compresión, estimando su máxima carga axial soportada. Esta prueba fue realizada a dos probetas correspondientes a cada relación agua/cemento por día de curado (7, 14, 28).

La máquina universal de ensayos TREBEL fue la utilizada para realizar esta prueba, empleando las probetas cilíndricas fundidas anteriormente y se procedió a

realizarlo conforme a la norma NTC 673¹⁸, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas.

Inicialmente se depositó azufre líquido para obtener superficies planas y paralelas en las probetas, y por lo tanto, lograr un contacto uniforme con las matrices de la máquina, ver fotografía 10a.

Luego se situó cada una de las probetas en el centro del disco base del equipo, seguidamente se dio vuelta al cabezal de la máquina hasta que quedaran en contacto las caras de las probetas con ella, para aplicar la fuerza eléctricamente; inspeccionando que las agujas de la máquina estén en cero. Ensayadas las muestras se obtuvieron los respectivos valores de máxima carga axial.

Una vez obtenida la carga axial, esta se divide entre el área de contacto, obteniéndose la resistencia máxima soportada por cada cilindro.

Fotografía 10. Ensayo de Resistencia a la Compresión.



¹⁸ Norma Técnica Colombiana. NTC 673. Determinación de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto.

3.6 ENSAYO DE ULTRASONIDO

Para medir la velocidad de pulso ultrasónico se utilizó el equipo V METER MK II, el cual mide el tiempo de vuelo de la onda en microsegundos que es importante para estimar el VPU conociendo la longitud de trayectoria de la onda.

Para el desarrollo de este ensayo se utilizaron cuatro probetas por cada relación agua/cemento (a/c) durante los respectivos días de curado (7, 14 y 28), efectuándoles a cada una tres mediciones en diferentes partes de la superficie, obteniéndose 12 valores por cada relación a/c, calculándose un promedio de los datos.

Para proceder a realizar las mediciones, se prepararon las caras de las probetas, lijándolas de tal manera que sus superficies quedaran lisas y planas (fotografía 11a), para un mejor acople y así garantizar la toma de los datos.

Luego se tomaron tres mediciones del diámetro y de la longitud de cada una de las probetas a ensayar, para tener mayor precisión en sus dimensiones (Ver fotografía 11b y 11c); obteniéndose 12 valores de cada variable (diámetro y longitud).

Previamente cargado el equipo, se procedió a conectar los transductores a los puertos correspondientes, se encendió el equipo y se unieron los transductores para su calibración, mostrando un tiempo de vuelo de la onda de 0 μ s como se observa en la fotografía 11d.

Una vez calibrado el equipo se procede a aplicar suficiente acoplante (ver fotografía 11e), que en este caso fue glicerina, a los transductores para iniciar la toma de datos.

Se ubicó el transductor en un extremo de la probeta y el receptor en el otro extremo, utilizando el método directo de medida de velocidad de pulso ultrasónico (fotografía 11f).

Una vez tomados los tiempos de vuelo y longitudes de las probetas, se determinaron sus velocidades de pulso ultrasónico, cuyos resultados se presentan en el capítulo 4.

Fotografía 11. Ensayo de Ultrasonido.



a) Preparación de las superficies de las probetas



b) Medición de diámetros



c) Medición de longitudes



d) Calibración al equipo



e) Aplicación de acoplante a los palpadores



f) Toma del tiempo de vuelo

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en los procesos de Caracterización de los Materiales, Diseño de Mezcla, Porosidad, Resistencia a la Compresión y Ultrasonido; y sus análisis respectivos.

Adicionalmente se muestran las relaciones obtenidas entre resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico; resistencia a la compresión y porosidad; velocidad de pulso ultrasónico y porosidad. Cada una de ellas en los respectivos días de curado (7, 14 y 28).

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En las tablas 7, 8 y 9 se presentan los resultados de propiedades de los agregados, gravedades específicas, granulometría (módulo de finura y tamaño máximo de agregado)

Tabla 7. Propiedades del Agregado

	Agregado fino	Agregado grueso
Peso Unitario Suelto	1.464	1450
Peso Unitario Compacto	1.640	1604
Absorción %	1.96	1.605
Porcentaje de Vacios	36.7	39

Tabla 8. Gravedades Específicas

	Agregado Fino	Agregado Grueso
Real	2.64	2.70
Aparente	2.54	2.59
Aparente SSS	2.59	2.63

Análisis granulométrico.

✓ Agregado Fino.

Tabla 9. Análisis granulométrico del agregado fino.

Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	21.8	2.18	2.18	97.82
8	104.4	10.44	12.62	87.38
16	161.2	16.12	28.74	71.26
30	257.7	25.77	54.51	45.49
50	250.1	25.01	79.52	20.48
100	114	11.4	90.92	9.08
Fondo	90.8	9.08	100	0
Total	1000	100	Peso Muestra	1000 g

Modulo de Finura = $\sum \% \text{Retenido Acumulado Tamiz 4-100} / 100$

Modulo de Finura = $268.49 / 100 = 2.6849$

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

La tabla 9 muestra que el agregado fino esta gradado entre los límites fino y grueso teniendo la granulometría mostrada en la tabla 3 del capítulo 2.

✓ Agregado Grueso.

Se determinó que el tamaño máximo fue de $\frac{3}{4}$ " y el tamaño máximo nominal fue de $\frac{1}{2}$ ".

Tabla 10. Análisis granulométrico del agregado grueso.

Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
$\frac{3}{4}$	-	-	-	-
$\frac{1}{2}$	694.8	9.926	9.926	90.074
3/8	4375	62.5	72.42	27.58
4	1930.2	27.57	99.99	0.01
Fondo	-	100		
Total	7000			

4.2 DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

Un ejemplo del cálculo del diseño de mezcla para la relación a/c de 0.45 se presenta en el anexo 1, de la misma forma se procedió para el cálculo de la dosificación de las otras relaciones a/c requeridas (0.50; 0.55 y 0.60). A continuación se presentan los resultados obtenidos en las tablas 10, 11, 12 y 13.

✓ **Para relación a/c = 0.45**

Tabla 11. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.45

Material	Peso (Kg)	Volumen (L)
Agua	202.143	202.143
Cemento	444.44	148.148
Agregado fino	688.186	265.71
Agregado grueso	998.49	379.65

✓ Para relación a/c = 0.50

Tabla 12. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.50

Material	Peso (Kg)	Volumen (L)
Agua	202.143	202.143
Cemento	404.286	134.762
Agregado fino	722.856	279.095
Agregado grueso	998.49	379.65

✓ Para relación a/c = 0.55

Tabla 13. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.55

Material	Peso (Kg)	Volumen (L)
Agua	202.143	202.143
Cemento	367.533	122.511
Agregado fino	754.58	291.346
Agregado grueso	998.49	379.65

✓ Para relación a/c = 0.60

Tabla 14. Dosificación de la mezcla de concreto para la relación a/c de 0.60

Material	Peso (Kg)	Volumen (L)
Agua	202.143	202.143
cemento	336.905	112.302
Agregado fino	781.028	301.55
Agregado grueso	998.49	379.65

4.3 ENSAYO DE POROSIDAD

En el anexo 1 se presenta un ejemplo del cálculo de la porosidad a partir de los datos obtenidos del porosímetro de campo Ruska para la relación a/c de 0.45 del día 7. De esta misma manera se procedió para cálculo de la porosidad en cada núcleo destinado para este ensayo obteniéndose los siguientes resultados. Ver tabla 15.

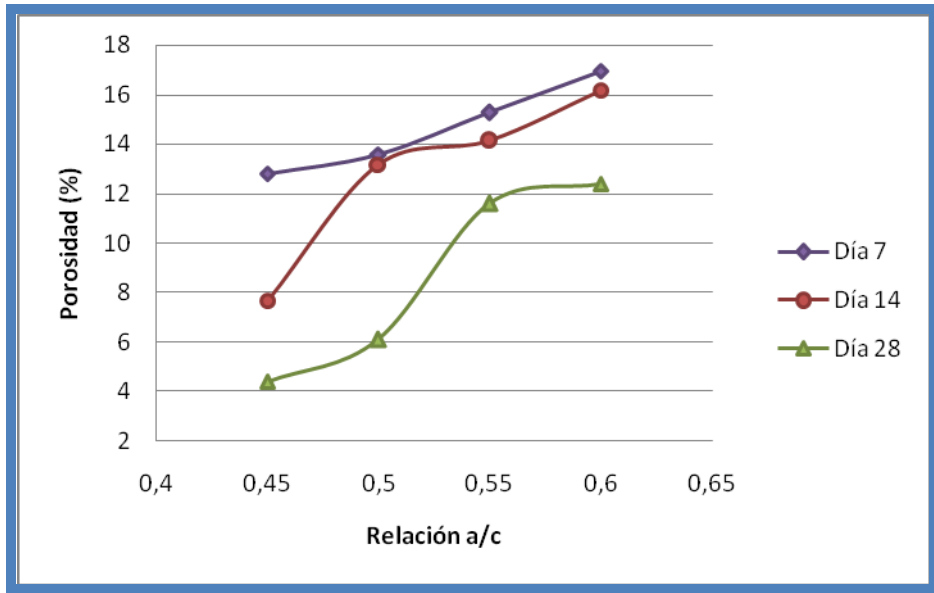
En la gráfica 4 se muestra el comportamiento de la porosidad efectiva de las muestras de concreto para las relaciones a/c en los respectivos días de curado.

Tabla 15. Resultados del ensayo de Porosidad a los respectivos días.

RELACION a/c	Porosidad del Día 7	Porosidad del Día 14	Porosidad del Día 28
0.45	12,82%	7.69%	4.41%
0.50	13.58%	13.16%	6.1%
0.55	15.28%	14.13%	11.6%
0.60	16.95%	16.18%	12.4%

De los resultados presentados en la tabla 15 se puede observar, para los respectivos días de ensayo, un comportamiento creciente de la porosidad con respecto a la relación agua/cemento como es mostrado en la gráfica 4; el cual no presenta una tendencia uniforme, estando acorde con los resultados reportados por otros investigadores ^[2]. Los menores valores de porosidad se presentan para la relación a/c de 0.45 y los mayores para la relación a/c de 0.60 para todos los días de curado, puesto que a medida que aumenta la relación a/c hay mayor probabilidad de generación de poros capilares en el concreto ^[30].

Gráfica 4. Comportamiento de la porosidad en función de la relación agua/cemento en los respectivos días.



Además se aprecian mayores porcentajes de porosidad en el día 7 (12.82% a 16.95%) y menores en el día 28 (4.41% a 12.4%) para todas las relaciones agua/cemento estudiadas; siendo más notorio el efecto de la disminución de los valores de porosidad entre el día 14 y 28, que entre el día 7 y 14; debido al aumento del tiempo de curado (doble) de las muestras para el ensayo.

El máximo valor de porosidad obtenido fue de 16.95% para la relación a/c de 0.60 en el día 7 y el mínimo valor conseguido fue de 4.41% para la relación a/c de 0.45 en el día 28. Los menores valores de porosidad se presentan a los 28 días de curado de las muestras de concreto, debido a que las reacciones de hidratación se fueron completando a medida que pasaba el tiempo de curado.

4.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

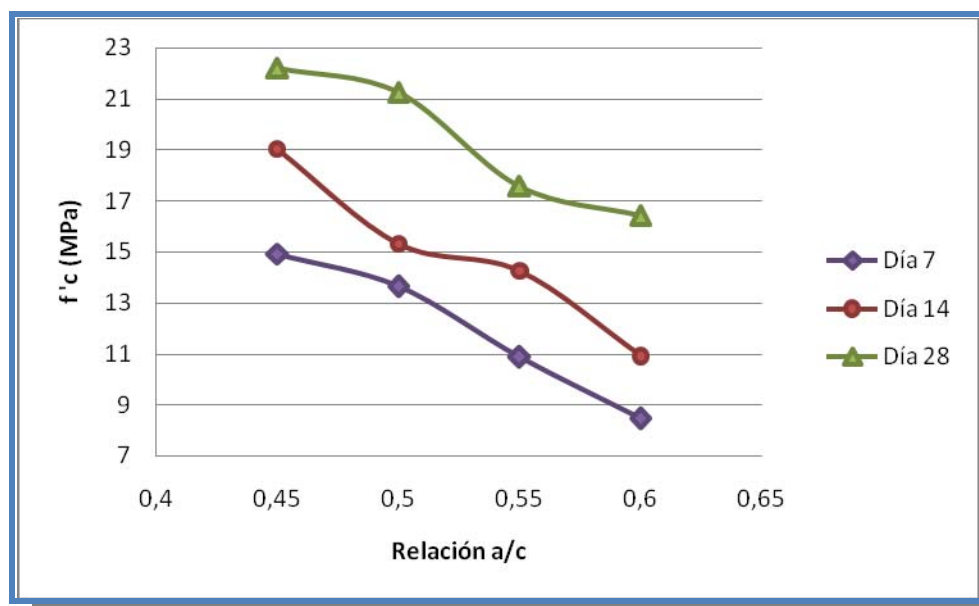
En la tabla 16 se presentan los resultados promedio obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión (f'_c) para cada relación agua/cemento para los respectivos días de curado (7, 14 y 28).

Tabla 16. Resistencia a la compresión de las muestras de concreto ensayadas.

Relación a/c	f'_c (MPa) Día 7	f'_c (MPa) Día 14	f'_c (MPa) Día 28
0.45	14,93124	19,03067	22,22
0.50	13,6319	15,3172	21,2587
0.55	10,88025	14,26143	17,58223
0.60	8,46629	10,9289	16,44196

A partir de los resultados presentados en la tabla 16 se observó que a medida que aumenta la relación agua/cemento disminuye la resistencia a la compresión en cada día de curado, como es mostrado en la gráfica 5. A su vez se presentan mayores valores de resistencia en el día 28 (22.22 MPa a 16.44196 MPa) y menores para el día 7 (8.46629 MPa a 14.93124 MPa). El mayor valor de resistencia obtenido fue de 22.22 MPa para la relación a/c de 0.45 en el día 28 y el menor de 8.46629 MPa para la relación a/c de 0.60 en el día 7.

Gráfica 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento en los respectivos días.



4.5 ENSAYO DE ULTRASONIDO. VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).

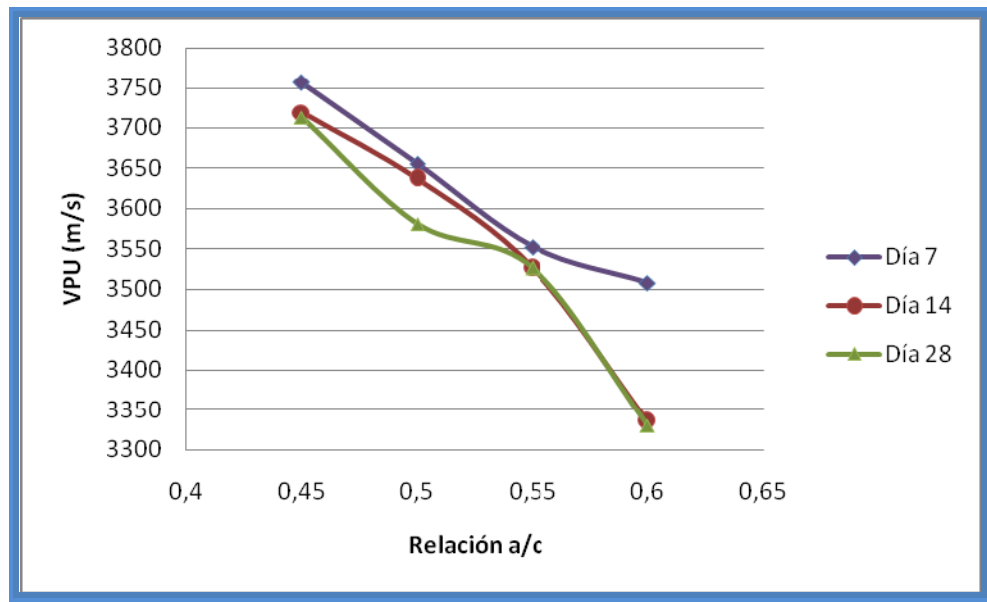
En la tabla 17 se muestran los resultados promedio obtenidos para la velocidad de pulso ultrasónico de las probetas de concreto de cada relación agua/cemento y tiempo de curado y en la gráfica 6 se muestra su respectivo comportamiento.

Los resultados promedio tomados a las muestras son presentados en el anexo 2.

Tabla 17. Resultados obtenidos del ensayo de Ultrasonido (VPU) en los respectivos días.

Relación a/c	VPU del Día 7 (m/s)	VPU del Día 14 (m/s)	VPU del Día 28 (m/s)
0.45	3755.8476	3719.0427	3712.6442
0.50	3655.0985	3636.8903	3580.9912
0.55	3552.3463	3526.4106	3525.8173
0.60	3507.8730	3335.4660	3329.8970

Gráfica 6. Comportamiento de de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la relación agua/cemento en los días respectivos.



En los resultados presentados en la tabla 17 se observa un comportamiento decreciente de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la relación a/c , así mismo se comporta al aumentar los días de curado. Por lo anterior, los mayores valores de velocidad de pulso ultrasónico son los obtenidos para la relación a/c de 0.45 (3755.8476m/s a 3712.6442m/s); y los menores valores son los obtenidos para la relación a/c de 0.60 (3329.8970m/s a 3507.8730m/s); de acuerdo a lo anterior el mayor valor de VPU alcanzado fue de 3712.6442 m/s correspondiente a la relación a/c de 0.45 en el día 7 y el menor valor fue de 3329.8970 m/s obtenido de la relación a/c de 0.60 en el día 28.

Cabe resaltar que la alta variabilidad de los resultados obtenidos en las probetas de concreto, es debida probablemente, a factores como la alta heterogeneidad del material, la calidad y forma de sus agregados; y posibles fallas en su proceso de fabricación tales como la falta de apisonado o de vibración para la compactación, la distribución de la mezcla y la humedad del ambiente.

4.6 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD PARA LAS DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTO.

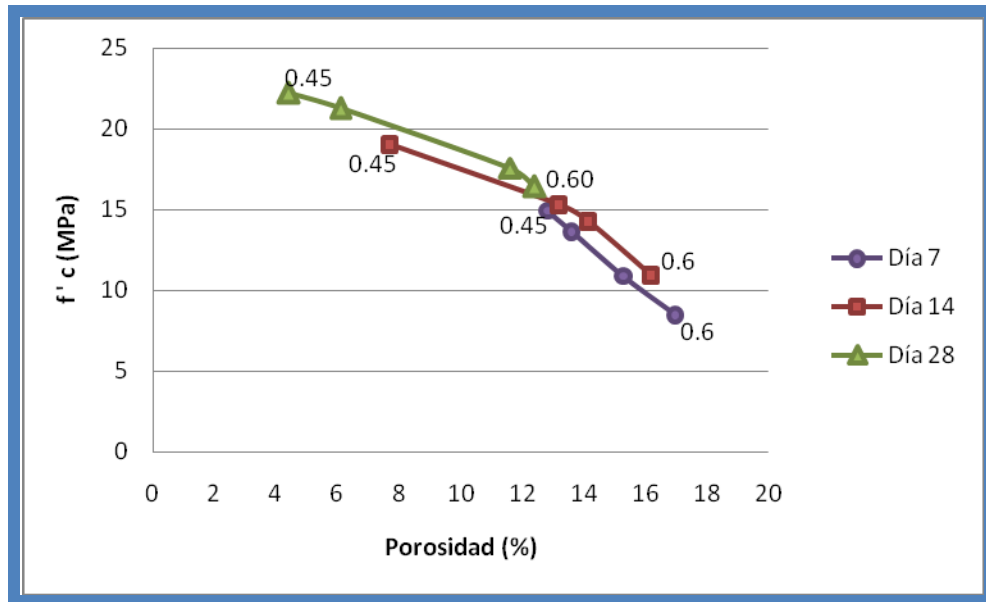
Se presenta a continuación una relación entre los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión en función de la porosidad, los cuales fueron tomados a cada relación a/c y en los respectivos días de curado con su gráfica correspondiente, la cual muestra el comportamiento de estos dos parámetros.

Tabla 18. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y porosidad en los días y relaciones a/c respectivas.

Relación a/c	Día 7		Día 14		Día 28	
	Porosidad (%)	f'c (MPa)	Porosidad (%)	f'c (MPa)	Porosidad (%)	f'c (MPa)
0.45	12,82	14,93124	7,69	19,03067	4,41	22,22
0.50	13,58	13,6319	13,16	15,3172	6,1	21,2587
0.55	15,28	10,88025	14,13	14,26143	11,6	17,58223
0.60	16,95	8,46629	16,18	10,9289	12,4	16,44196

La resistencia a la compresión presenta un comportamiento inverso con respecto a la porosidad, es decir, a medida que disminuye la porosidad aumenta la resistencia a la compresión en cada relación a/c como es mostrado en la gráfica 7; así mismo, a medida que avanza el tiempo de curado aumenta la resistencia a la compresión de las probetas ensayadas en cada relación a/c; debido a que al pasar el tiempo de curado se van completando las reacciones de hidratación en el concreto, por lo tanto va disminuyendo la porosidad aumentando así la resistencia, con lo cual se confirma la teoría. ^{[30] [38] [45]}

Gráfica 7. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la porosidad en los respectivos días.



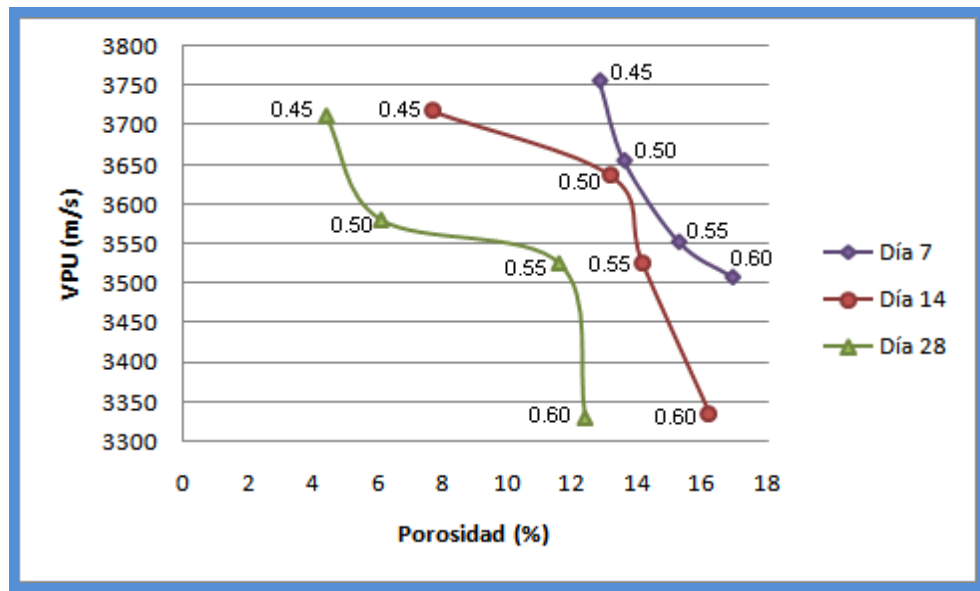
4.7 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA POROSIDAD EN LOS DÍAS DE CURADO PARA LAS RESPECTIVAS RELACIONES a/c.

En la tabla 19 se presentan los valores de la velocidad de pulso ultrasónico y de la porosidad en los días de curado para cada relación agua/cemento, con su respectiva relación mostrada en la gráfica 8.

Tabla 19. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos velocidad de pulso ultrasónico y porosidad en los días y relaciones a/c respectivas.

Relación a/c	Día 7		Día 14		Día 28	
	Porosidad (%)	VPU (m/s)	Porosidad (%)	VPU (m/s)	Porosidad (%)	VPU (m/s)
0.45	12,82	3755,8476	7,69	3719,0427	4,41	3712,6442
0.50	13,58	3655,0985	13,16	3636,8903	6,1	3580,9912
0.55	15,28	3552,3463	14,13	3526,4106	11,6	3525,8173
0.60	16,95	3507,8730	16,18	3335,4660	12,4	3329,8970

Gráfica 8. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la porosidad en los respectivos días.



En la gráfica 8 se puede apreciar un comportamiento descendente de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la porosidad para cada relación a/c, observándose los menores valores en la relación a/c de 0.6, la cual presentó los más altos porcentajes de porosidad en comparación con las otras. Con respecto a los días de curado se observa una disminución de la velocidad de pulso ultrasónico y la porosidad a medida que avanza el tiempo, notándose los valores más bajos en las probetas del día 28 para las diferentes relaciones a/c. Este comportamiento se debe a que en el día 7, no se han completado los productos de reacción de la pasta de cemento, por lo tanto la onda ultrasónica pasa a través del contenido de agua que aún no ha reaccionado; mientras que en el día 28, estas reacciones se han completado consumiendo el agua de la mezcla y dejando espacios vacíos (poros) los cuales obstaculizan el paso del haz sonoro debido a las diferencias en las impedancias acústicas entre los poros llenos de aire y la pasta de cemento endurecida. ^[12]

4.8 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO DE LAS DIFERENTES RELACIONES A/C.

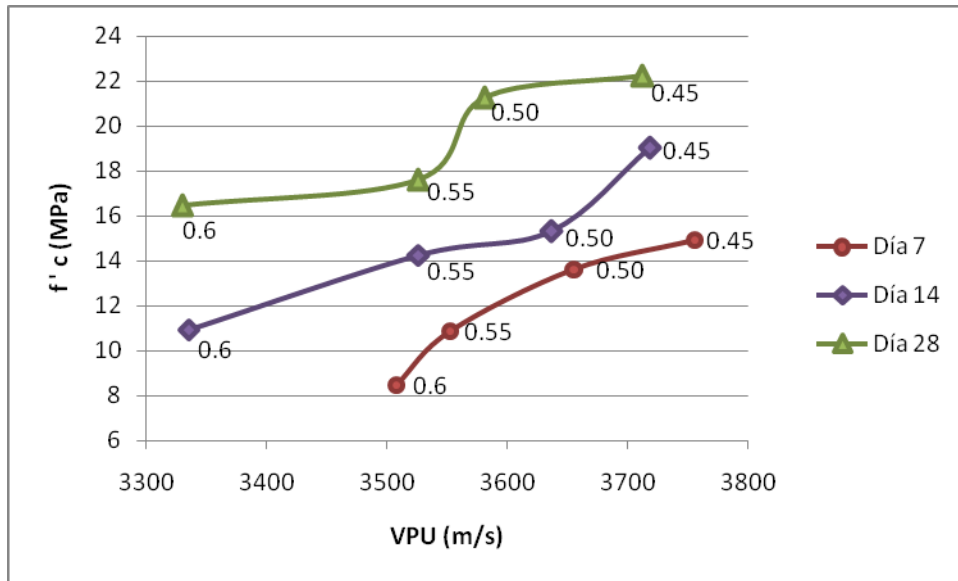
En la tabla 20 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, seguidamente se muestra su respectiva gráfica relacionando el comportamiento de estos dos parámetros para cada relación a/c en cada día de curado.

Tabla 20. Relación de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión y VPU.

	DIA 7		DIA 14		DIA 28	
Relación a/c	VPU (m/s)	f'c (MPa)	VPU (m/s)	f'c (MPa)	VPU (m/s)	f'c (MPa)
0.45	3755,8476	14,93124	3719,0427	19,03067	3712,6442	22,22
0.50	3655,0985	13,6319	3636,8903	15,3172	3580,9912	21,2587
0.55	3552,3463	10,88025	3526,4106	14,26143	3525,8173	17,58223
0.60	3507,8730	8,46629	3335,4660	10,9289	3329,8970	16,44196

La gráfica 9 muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión con relación a la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), observándose una dependencia directa entre estos dos parámetros, es decir, que a medida que aumenta la resistencia a la compresión aumenta la VPU en cada relación a/c en el mismo día de curado. Además a medida que transcurre el tiempo de curado son mayores los valores de resistencia y menores los de velocidad de pulso ultrasónico. En el día 28 la máxima resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico fue para la relación a/c de 0.45.

Gráfica 9. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso ultrasónico en los respectivos días.



CONCLUSIONES

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

Al incrementar la relación a/c se incrementa el valor porcentual de la porosidad y disminuyen la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Por otra parte al pasar el tiempo de curado el porcentaje de porosidad disminuye, debido a que el agua presente en las probetas de concreto, la cual era el agua empleada para la mezcla, fue reaccionando formando el gel de la pasta a medida que avanzaba el proceso de curado de las probetas. Por lo anterior se infiere que los productos de las reacciones de hidratación tienen influencia sobre las propiedades del material.

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica no destructiva que permite conocer el estado interno de las estructuras, posibilitando confirmar el contenido de porosidad en el concreto por medio del tiempo de vuelo de una onda ultrasónica. De acuerdo con los resultados obtenidos la disminución de la velocidad de pulso ultrasónico (aumento del tiempo de vuelo), se debe al aumento en el porcentaje de porosidad en las probetas, ocasionado por que los poros obstaculizan el paso del pulso ultrasónico en el material retardando su viaje.

Al disminuir el porcentaje de porosidad la resistencia a la compresión del concreto aumenta, debido a que los productos de la reacción de hidratación se van completando a medida que avanza el tiempo de curado disminuyendo los espacios dentro del material, es decir, compactándolo.

La velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión dependen en gran medida de la porosidad, la cual a su vez para el presente estudio depende de la relación agua/cemento empleada. Con esto no se concluye que estas variables solo dependan de la porosidad sino también de otros factores, tales como, tamaño máximo y origen de los agregados, resistencia de sus componentes, entre otros.

De acuerdo a los ensayos realizados en las diferentes relaciones a/c, la que mejor comportamiento presentó fue la de 0.45, en la cual se obtuvo menores porcentajes de porosidad, por lo tanto altos valores de resistencia a la compresión y menores velocidades de pulso ultrasónico.

El ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico es una herramienta útil en el estudio de la calidad del concreto, además sirve de complemento para los ensayos tradicionales que se realizan en este material.

Los resultados obtenidos en concretos no tienen un comportamiento uniforme debido a la misma heterogeneidad del material y a los múltiples factores que influyen en su proceso de fabricación, siendo fundamental aplicar las normas existentes y ser cuidadoso en su diseño, manipulación y colocación.

RECOMENDACIONES

Evaluar mayor cantidad de muestras de concreto con el fin de correlacionar cuantitativamente la porosidad, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico.

Determinar el efecto de la porosidad, resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en muestras de concreto curadas bajo agua con el fin de comparar los resultados obtenidos en esta investigación.

Trabajar muestras de mortero variando las relaciones agua/cemento para estimar su resistencia a la compresión, porosidad y velocidad de pulso ultrasónico mediante un proceso de curado en seco bajo techo.

Valorar la influencia del tamaño máximo de agregado grueso y modulo de finura en la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.

Determinar a través del ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico la resistencia a la compresión del concreto comparada con la resistencia hallada por medio del ensayo destructivo.

Determinar la VPU en probetas de concreto variando los diámetros, los cuales sean mayores que los diámetros de los palpadores para hacer toma de datos en distintos sitios de las caras de estas.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.* ASTM C597-02.USA, 2003.
- [2] _____. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens.* ASTM C215.USA.
- [3] _____. *Standard Specification for Concrete Aggregates.* ASTM C33-01. Philadelphia, USA, 2001.
- [4] _____. *Standard Specification for Portland Cement.* ASTM C150-07. Philadelphia, USA, 2007.
- [5] _____. *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.* ASTM C231-08c. USA, 2008.
- [6] _____. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.* ASTM C642-97. USA, 1997.
- [7] **ARQUYS.** Architecs Site. [en línea] Pagina Web. Republica Dominicana. <Disponible en: www.arqhys.com>. Visitada en marzo del 2009.
- [8] **CEMEX COLOMBIA S.A.** [en línea] Pagina Web. Colombia. <Disponible en: www.cemexcolombia.com>. Visitada en junio del 2009.
- [9] **CONCRETO.** *República Dominicana.* <Disponible en: <http://pdf.rincondelvago.com/concreto.html>>
- [10] **CONSTRUAPRENDE.** Ingeniería Civil y Arquitectura. Tesis, apuntes y trabajos. [en línea] Pagina Web. Colombia. <Disponible en: www.construaprende.com>. Visitada en marzo del 2009.

[11] **DISEÑO DE HORMIGONES DIRIGIDO A LA APLICACIÓN.** <Disponible en: upcommons.upc.edu>. Visitado en marzo del 2009.

[12] **DMP Servicios Industriales.** Diagnostico y mantenimiento predictivo. [en línea] Pagina Web. Argentina. Ultrasonido <Disponible en: www.dmpsa.com.ar/Ultasonido.htm>

[13] **ESPINEL, Leonardo. GRISALES, Juan Carlos.** *Manual de operaciones de los equipos del laboratorio de yacimientos y petrofísica.* Proyecto de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 1993.

[14] **FERNÁNDEZ, J.L., GONZALEZ, E.L., BROWN, S.A. y BATIC, O.R.** *Evolución de la porosidad de pastas de cemento Portland por la incorporación de una puzolana natural.*

[15] **GORISSE, Francis.** *Ensayos y Control de los Hormigones.* Editorial Reverte.1981.

[16] **HANDBOOK NONDESTRUCTIVE TESTING CONCRETE.** *The Ultrasonic Pulse Velocity Method.* Chapter 8.

[17] **ICA.** *Curso-Taller de Concreto.* 2000. <Disponible en: www.monografias.com/.../concreto>. Visitado en marzo del 2009.

[18] **INDUSTRIAL APPLICATIONS AND CHEMISTRY SECTION INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures.* Vienna, 2002

[19] **INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.** *Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos).* NTC 77. 1994.

[20] _____. *Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje del material que pasa tamiz.* NTC 78. 1995.

- [21] _____. *Especificaciones de los agregados de hormigón*. NTC 174. 2000.
- [22] _____. *Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso*. NTC 176. 1995.
- [23] _____. *Hormigón y sus agregados*. NTC 385. 1999.
- [24] _____. *Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra*. NTC 550. 2000.
- [25] _____. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC 92. 1995.
- [26] _____. Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino. NTC 237. 1995.
- [27] _____. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC 673. 2000.
- [28] _____. Elaboración y curado de muestras de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377.
- [29] **INSTITUTO COSTARRICENSE DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO**. *Boletín N°6*. Julio 2009. <Disponible en: www.boletin-icccyc.com>. Visitado en marzo del 2009.
- [30] **KUMAR Mehta P, Monteiro, Paulo J.M.** *Concrete, Microstructure, Properties, and Materials*. University of California at Berkeley. 3ra Edition. Mc Graw Hill.
- [31] **MANUAL DEL POROSÍMETRO RUSKA.**
- [32] **MONTOYA-MESEGUER-MORAN. GILI, Gustavo.** *Hormigón Armado*. Barcelona. 2000.

- [33] **NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION.** *El Concreto en la Práctica.* <Disponible en: www.nrmca.org>. Visitado el Abril del 2009.
- [34] _____, *El curado en la práctica.* <Disponible en: www.hormigonerospr.org>. Visitado en junio del 2009.
- [35] **PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE.** *Tecnología del hormigón.* Capítulo 1. <Disponible en: www.scribd.com/.../Tecnologia-Del-Hormigon-Cap-1Antecedentes-Generales>. Visitado en mayo del 2009.
- [36] **POPOVICS, John S.** *The behavior of ultrasonic pulse in concrete.* Cement and Concrete Research. Vol 20. 1990
- [37] _____. *Ultrasonic Testing of Concrete Structures.* September 2004.
- [38] **REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA.** *Porosity Analisis of Concrete Made with Limestone Aggregate.* Versión 21 numero 3 Caracas set. 2006.
- [39] **RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Manuel. BONAL CACERES, Rolando.** *El contenido de agua en el concreto y su incidencia sobre el valor de la velocidad del pulso ultrasónico.* Departamento de Física Universidad Central de las Villas. Cuba. <Disponible en: www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE086.PDF.> Visitado en marzo del 2009.
- [40] **SIKA INFORMACIONES TÉCNICAS.** *Curado del Concreto.* <Disponible en: www.sika.com.co/co-curado_concreto.pdf>. Visitado en abril del 2009.
- [41] **TECNOCONCRETO.S.A.** *Diseño de Mezclas.*
- [42] **UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.** Cursos. Composición del concreto simple. Sede Manizales. [en línea] Pagina Web. <Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitul>

o%203/COMPOSICION%20DEL%20CONCRETO%20SIMPLE.htm>. Visitado en Abril del 2009.

[43] **UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO LUIS GALLO.** *Naturaleza del Concreto.* <Disponible en: www.scribd.com/.../Naturaleza-Del-Concreto-IngCivil-UNPRG>. Visitado en abril del 2009.

[44] **UNIVERSITY MALAYSIA SARAWAK.** *The Influence of Porosity to the Accuracy of Ultrasonic Pulse Velocity Method.*

[45] **ZOUBEIR, Lafhaj; GOUEYGOU, Marc; DJERBI, Assia; KACZMAREK, Mariusz.** *Correlation Between Porosity, Permeability and Ultrasonic Parameters of Mortar with Variable Water/ Cement Ratio and Water Content.* November 2005.

ANEXOS

ANEXO 1.

CALCULOS

PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DEL DISEÑO DE MEZCLA.

✓ Para relación a/c = 0.45

Conociendo el valor de asentamiento (8-10cm) y el tamaño máximo nominal (19.050mm) se consultó en la tabla 4 los kilogramos de agua necesarios para la mezcla; para ello se interpoló de la siguiente manera:

Ecuación de interpolación:

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

$$x = 19 \quad x_1 = 13 \quad x_2 = 20 \quad y_1 = 215 \quad y_2 = 200$$

Reemplazando estos valores en la anterior fórmula, se obtuvo la cantidad de agua en kilogramos.

$$y = \frac{(19 - 13)}{(20 - 13)} (200 - 215) + 215$$

$$y = 202.13 \text{ Kg de agua}$$

Ahora, conociendo la cantidad de agua y la relación agua/cemento se aplica la fórmula (2), para saber la cantidad de cemento en kilogramos.

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

$$C = \frac{200}{0.45}$$

$$C = 444.44 \text{ Kg de cemento}$$

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{444.44 \text{ Kg}}{3.0 \text{ Kg/cm}^3}$$

$$V_c = 148.148 \text{ litros}$$

Una vez obtenida la cantidad de agua y cemento de la mezcla se procedió a hallar la cantidad de de agregado grueso y para ello se aplica la fórmula (3).

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

En la cual el valor de b/b_0 se encuentra en la tabla 5 dependiendo del tamaño máximo de agregado en mm y del módulo de finura los cuales respectivamente fueron 19.050mm y 2.68; para obtener el valor de la relación b/b_0 se interpoló tres veces de la siguiente manera:

Interpolación 1.

Se efectuó con el fin de calcular el valor de b/b_0 para 2.60 con 19.050mm.

$$x = 19.050 \quad x_1 = 13 \quad x_2 = 20 \quad y_1 = 0.57 \quad y_2 = 0.64$$

Reemplazando en la fórmula de interpolación se obtuvo que b/b_0 para una finura de 2.60 y un tamaño máximo de agregado de 19.050 sea igual a 0.6305.

Interpolación 2.

Se efectuó con el fin de calcular el valor de b/b_0 para 2.80 con 19.050mm.

$$x = 19.050 \quad x_1 = 13 \quad x_2 = 20 \quad y_1 = 0.55 \quad y_2 = 0.62$$

Reemplazando en la fórmula de interpolación se obtuvo que b/b_0 para una finura de 2.80 y un tamaño máximo de agregado de 19.050 sea igual a 0.6105.

Interpolación 3.

Se efectuó con el fin de calcular el valor de b/b_0 para 2.68 el cual era el que se necesitaba, con 19.050mm. Tomando las variables previamente calculadas por interpolación.

$$x = 2.68 \quad x_1 = 2.60 \quad x_2 = 2.80 \quad y_1 = 0.6305 \quad y_2 = 0.6105$$

Reemplazando en la fórmula de interpolación se obtuvo que b/b_0 para una finura de 2.68 y un tamaño máximo de agregado de 19.050 sea igual a 0.6225.

Conociendo el valor de b/b_0 se reemplazan los valores en la fórmula (3) de la siguiente manera:

$$b = 0.6225 \times 1604$$

$$b = 998.49 \text{ Kg/m}^3.$$

Ahora para hallar volumen del agregado grueso se divide valor b entre el peso específico de este que es igual a 2.63 Kg, calculado por granulometría. Obteniendo que el volumen de agregado grueso (V_{ag}) es igual a 379.65 L.

Por último se halla la cantidad de agregado fino utilizando la fórmula (4).

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

Dando como resultado $V_{af} = 265.709$ Litros; para obtener la cantidad de agregado fino en kilogramos se multiplica su volumen por su peso específico:

$$265.709 \times 2.59 = 688.186 \text{ Kg de agregado fino}$$

Procediendo de esta misma manera se efectúan los cálculos de cada componente del concreto para las diferentes relaciones agua/cemento requeridas

CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD

En el cálculo de la porosidad fue necesario hallar el volumen de grano y volumen total de cada espécimen para la posterior aplicación de la ley de Boyle; se procedió de la siguiente manera:

Utilizando el método del equipo de campo Ruska, se halló el valor del volumen de grano en centésimas, lo cual para la probeta de 0.45 en el día 7 dio un valor promedio de 103, con este valor se consulta en la gráfica calibrada con el equipo dando un volumen de grano de 13.6 cm^3 . Luego se procedió a hallar el volumen total de la muestra, lo cual dio un valor promedio de 116, siendo este según la gráfica semejante a 15.6 cm^3 . Con estos dos datos se aplica la fórmula () donde:

$$\emptyset = (1 - 13.6/15.6) * 100 = 12.82\%$$

ANEXO 2.

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Se muestran los resultados promedios de los 12 datos obtenidos por cada probeta en las distintas relaciones a/c para el ensayo de ultrasonido.

PARA EL DÍA 7

✓ Relación a/c = 0.45

Tabla 21. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para a/c = 0.45

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)
1	0.075423	0.141777	37.3×10^{-6}	3800.9920
2	0.07363	0.141697	38.233×10^{-6}	3706.1439
3	0.075253	0.14172	37.6×10^{-6}	3769.1489
4	0.075233	0.141753	37.83×10^{-6}	3747.1055
Velocidad de Pulso Ultrasónico Promedio				3755.8476

✓ Relación a/c = 0.50

Tabla 22. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para a/c = 0.50

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasónico (m/s)
1	0.075547	0.144177	39.9×10^{-6}	3613.4586
2	0.07485	0.140883	38.6667×10^{-6}	3643.5227
3	0.074957	0.14317	38.5333×10^{-6}	3715.4876
4	0.074787	0.139837	38.3333×10^{-6}	3647.9249
Velocidad de Pulso Ultrasónico Promedio				3655.0985

✓ Relación a/c = 0.55

Tabla 23. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para a/c = 0.55

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.07520	0.14049	39.1×10^{-6}	3593.0946
2	0.07446	0.14563	41.166×10^{-6}	3537.6281
3	0.075056	0.142736	39.4×10^{-6}	3622.7411
4	0.07392	0.140656	40.7×10^{-6}	3455.9214
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3552.3463

✓ Relación a/c = 0.60

Tabla 24. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 7 para a/c = 0.60

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.07554	0.14107	39.40×10^{-6}	3580.4569
2	0.07537	0.14272	41.13×10^{-6}	3469.9733
3	0.07368	0.14078	40.50×10^{-6}	3476.0494
4	0.07507	0.13985	39.90×10^{-6}	3505.0125
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3507.8730

PARA EL DIA 14.

✓ Relación a/c = 0.45

Tabla 25. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para a/c = 0.45

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.074453	0.14636	38×10^{-6}	3851.5789
2	0.07519	0.14349	39.4333×10^{-6}	3638.8027
3	0.074437	0.15107	41.5×10^{-6}	3640.2409
4	0.074943	0.141457	37.7667×10^{-6}	3745.5483
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3719.0427

✓ Relación a/c = 0.50

Tabla 26. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para a/c = 0.50

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.07505	0.14035	37.13×10^{-6}	3779.9623
2	0.07441	0.14151	40.07×10^{-6}	3531.5696
3	0.07397	0.14120	39.27×10^{-6}	3595.6201
4	0.07510	0.14234	39.10×10^{-6}	3640.4092
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3636.8903

✓ Relación a/c = 0.55

Tabla 27. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para a/c = 0.55

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.07546	0.1406	39.5×10^{-6}	3559.4936
2	0.075847	0.14045	39.5333×10^{-6}	3552.7281
3	0.075417	0.141683	40.4667×10^{-6}	3501.2245
4	0.075667	0.14027	40.1667×10^{-6}	3492.1963
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3526.4106

✓ Relación a/c = 0.60

Tabla 28. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 14 para a/c = 0.60

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.07348	0.140947	42.8×10^{-6}	3293.1542
2	0.075547	0.144377	42.6667×10^{-6}	3383.8833
3	0.073627	0.14222	42.5×10^{-6}	3346.3529
4	0.07362	0.142253	42.867×10^{-6}	3318.4734
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3335.4660

PARA EL DIA 28.

✓ Relación a/c = 0.45

Tabla 29. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para a/c = 0.45

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.073896	0.13529	35.43×10^{-6}	3818.5154
2	0.07391	0.14139	37.9×10^{-6}	3730.6069
3	0.07399	0.13958	39×10^{-6}	3578.9746
4	0.074126	0.139593	37.5×10^{-6}	3722.48
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3712.6442

✓ Relación a/c = 0.50

Tabla 30. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para a/c = 0.50

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.075887	0.14299	39.6×10^{-6}	3610.8586
2	0.073883	0.14096	39.6333×10^{-6}	3556.6321
3	0.07445	0.1423367	39.733×10^{-6}	3582.3296
4	0.074573	0.142133	39.767×10^{-6}	3574.1444
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3580.9912

✓ Relación a/c = 0.55

Tabla 31. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para a/c = 0.55

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.073753	0.14176	40.2667×10^{-6}	3520.5269
2	0.073693	0.14284	40.1667×10^{-6}	3556.1796
3	0.07547	0.142647	40.4×10^{-6}	3530.8663
4	0.074423	0.140527	40.2×10^{-6}	3495.6965
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3525.8173

✓ Relación a/c = 0.60

Tabla 32. Resultado del ensayo de Ultrasonido del día 28 para a/c = 0.60

Probeta	Diámetro (m)	Longitud (m)	Tiempo de vuelo de la onda (s)	Velocidad de pulso Ultrasonico (m/s)
1	0.0739	0.138957	41.47×10^{-6}	3351.050361
2	0.0752	0.143953	44.1×10^{-6}	3264.240363
3	0.0745	0.138883	40.9×10^{-6}	3395.672372
4	0.0740	0.14194	42.9×10^{-6}	3308.624709
Velocidad de Pulso Ultrasonico Promedio				3329.896953

ANEXO 3.

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los datos que se obtuvieron en este ensayo fueron los de Resistencia última (Kg), los cuales fueron divididos por el área de contacto de la probeta para obtener el respectivo esfuerzo (Kg/cm²).

Para hallar el área de contacto de la superficie de las probetas se utilizó la siguiente formula:

$$A = \pi \times r^2$$

Donde: A= área de contacto.

r = radio de la probeta.

Para determinar el radio de la probeta se utilizó el promedio de los diámetros de las probetas realizadas en el día y relación a/c especificado.

A continuación se presentan los datos obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión.

PARA EL DÍA 7

✓ Relación a/c = 0.45

Diámetro promedio= 7.5304 cm

Área de contacto= 44.5375 cm²

Tabla 33. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.45 en el día 7.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
6600	148.1897	14.81897
6700	150.4350	15.04350
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		14.93124

✓ Relación a/c = 0.50

Diámetro promedio= 7.4548 cm

Área de contacto= 43.6478 cm²

Tabla 34. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.50 en el día 7.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
6000	137.4640	13.74640
5900	135.1729	13.51729
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		13.6319

✓ Relación a/c = 0.55

Diámetro promedio= 7.3767 cm

Área de contacto= 42.7380 cm²

Tabla 35. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.55 en el día 7.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
4800	112.3122	11.23122
4500	105.2927	10.52927
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		10.88025

✓ Relación a/c = 0.60

Diámetro promedio= 7.358 cm

Área de contacto= 42.5216 cm²

Tabla 36. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.60 en el día 7.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
3500	82.3111	8.23111
3700	87.0146	8.70146
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		8.46629

PARA EL DIA 14.

✓ Relación a/c = 0.45

Diámetro promedio= 7.4519 cm

Área de contacto= 43.6138 cm²

Tabla 37. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.45 en el día 14.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
8100	185.7210	18.57210
8500	194.8924	19.48924
Esfuerzo Último promedio		19.03067

✓ Relación a/c = 0.50

Diámetro promedio= 7.5294 cm

Área de contacto= 44.5257 cm²

Tabla 38. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.50 en el día 14.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
6700	149.8214	14.98214
7000	156.5299	15.65299
Esfuerzo Último promedio		15.3172

✓ Relación a/c = 0.55

Diámetro promedio= 7.5458 cm

Área de contacto= 44.7199 cm²

Tabla 39. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.55 en el día 14.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
6200	139.2454	13.92454
6500	145.9831	14.59831
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		14.26143

✓ Relación a/c = 0.60

Diámetro promedio= 7.439 cm

Área de contacto= 43.4629 cm²

Tabla 40. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.60 en el día 14.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
5000	115.0406	11.50406
4500	103.5366	10.35366
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		10.9289

PARA EL DIA 28.

✓ Relación a/c = 0.45

Diámetro promedio= 7.3975 cm

Área de contacto= 42.9793 cm²

Tabla 41. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.45 en el día 28.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
11100	258.2639	25.82639
8000	186.1361	18.61361
Esfuerzo Último promedio		22.22

✓ Relación a/c = 0.50

Diámetro promedio= 7.4633 cm

Área de contacto= 43.7468 cm²

Tabla 42. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.50 en el día 28.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
9400	214.8729	21.48729
9200	210.3011	21.03011
Esfuerzo Último promedio		21.2587

✓ Relación a/c = 0.55

Diámetro promedio= 7.4915 cm

Área de contacto= 44.0786 cm²

Tabla 43. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.55 en el día 28.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
7700	174.6879	17.46879
7800	176.9566	17.69566
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		17.58223

✓ Relación a/c = 0.60

Diámetro promedio= 7.441 cm

Área de contacto= 43.4863 cm²

Tabla 44. Resultados de resistencia a la compresión para la relación a/c=0.60 en el día 28.

Carga axial (Kg)	Esfuerzo (Kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
7500	172.4681	17.24681
6800	156.3711	15.63711
<i>Esfuerzo Último promedio</i>		16.44196