

**“EVALUACIÓN DE CONCRETO EXPUESTO A HIDROCARBUROS MEDIANTE
TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS”**

**EDINSON JAVIER JEREZ SILVA
JORGE LUIS LUNA MORENO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA
2012**

**“EVALUACIÓN DE CONCRETO EXPUESTO A HIDROCARBUROS MEDIANTE
TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS”**

**EDINSON JAVIER JEREZ SILVA
JORGE LUIS LUNA MORENO**

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

**Directora
M.Sc LUZ AMPARO QUINTERO**

**Co-Director
Ph.D RICARDO ALFREDO CRUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA
2012**

DEDICATORIA

A Diosito y la Virgen santísima por guiarme, darme salud y sobre todo por nunca dejarme caer en los momentos difíciles cuando parecía no haber luz ni camino para seguir.

A mi mami Marlen por ser siempre mi motor, motivación, la mujer perfecta, mi guía y apoyarme en todos los momentos por difíciles, estando siempre hay para darme un consejo cuando lo necesitaba y sobre todo por ser lo que más amo en mi vida y todo lo que soy se lo debo a esa maravillosa mujer.

A mi padre Q.E.P.D. por la vida y por qué aunque no puede estar a mi lado sé que siempre esta desde el cielo apoyándome y haciendo todo lo posible para que todo salga bien en mi vida.

A mi tía Flor por ser esa segunda mamá y por su nobleza amabilidad y sobre todo por su incondicionalidad.

A mis hermanos Alexis, Elio y Natalia por siempre estar pendientes de todo lo que me relaciona y por qué aparte de ser mis hermanos son verdaderos amigos que siempre me motivaron, me dieron lo mejor de ellos y me sacaron sonrisas en los momentos tristes.

A mi compañero de proyecto Jorge Luna, por su entrega total y su amistad.

A mis dos parceros y amigos del alma Fabián Pita y Luis Herrera por ser una chimba, por su amistad, confianza, cariño, por las tomaditas y por qué siempre me acompañaron en todo momento sin importar lo que fuera.

A mis amigos más cercanos de la carrera Jenny, Andrea, Nathalia, Iván, pipe y el enano por siempre apoyarme, colaborarme y pasar momentos inolvidables, los cuales quedaran por siempre en mi memoria.

A mis amigos de toda la vida Pocho y Jonathan que siempre estuvieron esperando este momento tan anhelado y compartiendo a mi lado.

A la profesora Luz Amparo Quintero, por su aporte, dedicación y colaboración.

Y a ti amor por ser una persona tan maravillosa, hermosa, por apoyarme, brindarme su amistad, confianza, cariño y compartir tantos momentos a mi lado, ser tan única y sobre todo por ser mi novia "melocotona".

Edinson Javier Jerez Silva

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen por mantenerme con bien y llevarme por el buen camino a lo largo de la carrera y sobre todo por darme la capacidad y fuerza para este trabajo.

A mi madre que siempre ha estado allí para mí en las buenas y en las malas apoyándome en todo.

A mi padre que nunca le faltó un consejo justo cuando más lo necesitaba y me ayudo a superarme.

A mi hermana, Paola por estar conmigo y siempre ofrecerme una sonrisa cuando más me hacía falta.

A una mujer que se ha ganado mi corazón y mi respeto, me ha apoyado, comprendido, entendido y me ha sabido demostrar su cariño. Carmen Elisa gracias por estar conmigo en esta etapa de mi vida.

A mi compañero de proyecto, Edison Jerez por su compromiso.

A la profe Luz Amparo Quintero, por ayudarme a culminar mis Estudios superiores de la mejor manera.

A mis amigos, compañeros de Universidad y personas que Estuvieron a mi lado que me brindaron su cariño, amistad y Confianza, con los cuales viví momentos tristes y felices durante este Largo camino universitario

Jorge Luis Luna Moreno

AGRADECIMIENTOS

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

A nuestra directora Ms.C Luz Amparo Quintero, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por compartirnos sus conocimientos para el desarrollo de esta investigación y para nuestro futuro.

A nuestro codirector Ph.D Ricardo Cruz por su orientación, conocimiento sobre el área de la Ingeniería Civil y darnos el conocimiento necesario para poder realizar este proyecto.

A la escuela de ingeniería metalúrgica a sus profesores y técnicos: Ambrosio, Mario, Javier y Domingo por brindarnos los elementos necesarios en nuestra formación profesional y 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.

Al técnico Jairo Hernández por aportarnos todos sus conocimientos en ingeniería civil, por su colaboración y apoyo.

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

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE CONCRETO EXPUESTO A HIDROCARBUROS MENDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS. ¹

AUTORES: JEREZ SILVA, EDISON JAVIE. LUNA MORENO, JORGE LUIS. ²

PALABRAS CLAVES: Concreto, inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, ensayo de gravimetría, hidrocarburo e inmersión.

RESUMEN

En este trabajo se describe el estudio que se realizó para evaluar el grado de deterioro y/o los cambios en concreto debido al contacto directo con un hidrocarburo. Los valores de velocidad de pulso ultrasónico, porcentaje de absorción y resistencia a la compresión fueron medidos a probetas de 20x20x20 cm³ en diferentes tiempos para un periodo total de 75 días de exposición. Para la elaboración de las muestras se utilizaron cemento portland, agregados finos y gruesos, y agua potable; se trabajaron dos relaciones agua/cemento 0.45 y 0.5. Para el proceso de elaboración de probetas se llevó a cabo un fraguado (24 horas), curado (28 días 100% humedad) y un secado (15 días), seguidamente las muestras fueron inmersas en biodiesel. A medida que se cumplieron los tiempos de exposición se fueron retirando las probetas para realizarles los ensayos indicados.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados para cada tiempo de exposición, muestran cambios de aumento en la resistencia a la compresión, el porcentaje de absorción y los valores de velocidad de pulso ultrasónico, el aumento de estos, es debido al papel que juega las relaciones de agua/cemento, las características del medio de inmersión y el tiempo de exposición.

Con los datos obtenidos en la resistencia a la compresión y en la VPU se encontró una correlación lineal para la relación a/c 0.45 y exponencial la relación a/c 0.5.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Director. .M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz. Codirector Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF CONCRETE EXPOSED TO OIL BY NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES.³

AUTHORS: JEREZ SILVA, EDISON JAVIER. LUNA MORENO, JORGE LUIS.⁴

KEYWORDS: Concrete, visual inspection, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, gravimetric test, hydrocarbon and immersion.

ABSTRACT

This paper describes the study that was performed to evaluate the degree of deterioration and/or changes in the concrete due to direct contact with the biodiesel. The values of ultrasonic pulse velocity, absorption rate and the compressive strength were measure on samples of 20x20x20 cm³ at different times for a total period of 75 days of exposure. For the preparation of the samples were used Portland cement, fine and coarse aggregates, and potable water, it worked with two cement/water ratio 0.45 and 0.5. For the process of elaboration of samples was carried out a setting (24 hours) cured (28 days, 100% moisture) and a dry (15 days), then the samples were immersed in biodiesel. As the met expose times were retired the samples for make them the test before indicated.

The results obtained in various tests for each exposure time, show increase changes of the compressive strength, absorption rate and the values of ultrasonic pulse velocity, this increase is due to role of the cement/water ratio, the characteristics of the immersion liquid and the exposure time.

With the information obtained in the compressive strength and UPV, linear correlation was found for the w/c ratio 0.45 and exponential for the w/c ratio 0.5.

³ Trabajo de Grado

⁴ Facultad de fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Director. .M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz. Codirector Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 ESTADO DEL ARTE	23
1.3 OBJETIVOS	27
1.3.1 Objetivo General	27
1.3.2 Objetivos Específicos	27
2. MARCO TEORICO	28
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO	28
2.2 AGUA	30
2.3 AGREGADOS	30
2.4 RELACIÓN AGUA – CEMENTO	31
2.5 POROSIDAD EN EL CONCRETO	32
2.6 DETERIORO DEL CONCRETO	33
2.7 BIODEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS	33
2.8 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	34
2.8.1 Generalidades de la técnica.	34
2.8.2 Modo de transmisión directo.	35
2.8.3 Modo de transmisión semi-directo.	36
2.8.4 Modo de transmisión indirecto.	36
2.8.5 Factores a tener en cuenta en la Velocidad de Pulso Ultrasónico.	37

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	39
3.1 RECOLECCIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	40
3.2 PROCESO DE FABRICACION DEL CONCRETO	40
3.2.1 Caracterización de la materia.	41
3.2.2 Diseño de Mezcla.	41
3.2.3 Elaboración de probetas.	42
3.2.4 Fraguado y curado de las probetas.	44
3.3 PREPARACIÓN DE LOS EQUIPOS Y CAPACITACIÓN	45
3.4 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS ANTES DE LA INMERSION EN ACEITE	48
3.4.1 Inspección Visual	49
3.4.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico.	49
3.4.3 Ensayo Gravimétrico	50
3.4.4 Ensayo de resistencia a la compresión.	50
3.5 INMERSIÓN DE LAS PROBETAS EN ACEITE	50
3.6 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE LA INMERSIÓN EN ACEITE	52
3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
3.8 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	53
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	54
4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	54
4.1.1 Caracterización de la materia prima. Como se indicó anteriormente, se estudiaron el cemento, el agua de mezcla y los agregados grueso y fino.	54
4.1.2 Diseño de mezcla.	57
4.1.3 Elaboración de probetas.	58
4.1.4 Fraguado y curado	58
4.2 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS ANTES DE LA INMERSIÓN EN ACEITE.	59
4.2.1 Inspección visual.].	59

4.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico.	61
4.2.3 Ensayo de gravimetría.	64
4.2.4 Ensayo de resistencia a la compresión	65
4.3 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE LA INMERSIÓN EN ACEITE.	67
4.3.1 Inspección visual	67
4.3.2 Velocidad de pulso ultrasónico.	68
4.3.3 Ensayo de gravimetría.	72
4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión.	77
CONCLUSIONES	84
6. RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Método de Transmisión Directo	36
Figura 2. Metodo de Transmisión Semi-directo	37
Figura 3. Método de Transmisión indirecto	37
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto	39
Figura 5. Formaleta para las probetas	42
Figura 6. Mezcla de cemento, agregado grueso, fino y agua	43
Figura 7. Proceso de Fraguado	44
Figura 8. Proceso de Curado	45
Figura 9. Equipo de Ultrasonico de Baja Frecuencia marca CNS Farnell Limited Tipo PUNDIT PLUS Modelo PC1006	46
Figura 10. Calibrador digital marca UPM	47
Figura 11. Máquina universal de ensayos AMSLER	48
Figura 12. Cuadrícula para la toma de tiempos de vuelo de las probetas	50
Figura 13. Piscina de inmersión para las probetas	51
Figura 14. Inmersión de las probetas en contacto directo con el biodiesel	52
Figura 15. Proceso de Fraguado y Curado	59
Figura 16. Inspección Visual	60
Figura 17. Estado superficial de dos probetas con un tiempo de exposición de 45 días y con relaciones a/c 0.5 y 0.45	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del cemento según la norma ASTM C 150	29
Tabla 2. Propiedades de los agregados del concreto	31
Tabla 3. Clasificación de los poros según sus características y tamaño	32
Tabla 4. Parámetros utilizados en el equipo de ultrasonido	46
Tabla 5. Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua potable	55
Tabla 6. Caracterización de los agregados fino y grueso	56
Tabla 7. Análisis granulométrico del agregado fino	56
Tabla 8. Cantidades representativas para un diseño de mezcla de 0.5	57
Tabla 9. Cantidades representativas para un diseño de mezcla de 0.45	57
Tabla 10. Distribución de probetas	58
Tabla 11. Longitudes de algunas probetas	60
Tabla 12. Velocidad de pulso promedio de las probetas con una relación a/c de 0.5 antes de la inmersión en biodiesel	61
Tabla 13. Velocidad de pulso promedio de las probetas con una relación a/c de 0.45 antes de la inmersión en biodiesel	62
Tabla 14. Pesos obtenidos de algunas probetas para la relación a/c 0.5	64
Tabla 15. Pesos obtenidos de algunas probetas para la relación a/c 0.45	65
Tabla 16. Valores de carga y resistencia a la compresión para las probetas con relación a/c 0.5	66
Tabla 17. Valores de carga y resistencia a la compresión para las probetas con relación a/c 0.45	66
Tabla 18. Valores promedios totales para la relación a/c 0.5	69
Tabla 19. Valores promedios totales para la relación a/c 0.45	69

Tabla 20. Pesos de algunas probetas expuestas antes y después del secado con relación a/c 0.5	73
Tabla 21. Pesos de algunas probetas expuestas antes y después del secado con relación a/c 0.45	73
Tabla 22. Promedios de porcentaje de absorción en probetas con relación a/c 0.5	74
Tabla 23. Promedios de porcentaje de absorción en probetas relación a/c 0.45	74
Tabla 24. Valores de la resistencia a la compresión de algunas probetas con relación a/c 0.5	78
Tabla 25. Valores de la resistencia a la compresión de algunas probetas con relación a/c 0.45	78
Tabla 26. Valores promedios de resistencia a la compresión para cada tiempo de inmersión en cada relación a/c	79

LISTA DE GRAFICA

	Pág.
Gráfica 1 Velocidad de pulso promedio de las probetas con relación a/c 0.5 antes de la inmersión en biodiesel	62
Gráfica 2 Velocidad de pulso promedio de las probetas con relación a/c 0.45 antes de la inmersión en biodiesel	63
Gráfica 3 Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico respecto al tiempo de inmersión y tiempo de secado en las probetas con relación a/c 0.5	70
Gráfica No. 4 Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico respecto al tiempo de inmersión y tiempo de secado en las probetas con relación a/c 0.45	70
Gráfica No. 5 Promedio de porcentaje de absorción vs Tiempo de inmersión, para las relaciones a/c 0.5 y 0.45	75
Gráfica No. 6 Velocidad de pulso ultrasónico con respecto al porcentaje de absorción en las probetas con relación a/c 0.5 y 0.45	77
Gráfica No. 7 Valores promedios de la resistencia a la compresión de cada relación a/c Vs Tiempo de inmersión	80
Gráfica No. 8 Relación de los valores de VPU y resistencia a la compresión	82

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Cálculos para el diseño de mezcla	91
ANEXO B Ensayo De Gravimetría	100
ANEXO C. Valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión.	102
ANEXO D. Velocidades promedio de pulso ultrasónico	104

INTRODUCCIÓN

Desde siglos atrás el concreto ha sido la herramienta principal en las grandes construcciones tales como el COLISEO ROMANO, el primer puente de concreto (no reforzado) construido en Souillac, Francia, entre otros, los cuales aun 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 [1].

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 de 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.

La presencia del concreto expuesto a hidrocarburos puede ser perjudicial, debido al debilitamiento de la estructura del material y al cambio de sus propiedades especialmente su resistencia, este es de vital importancia, debido a que el concreto es uno de los materiales mas utilizados por el hombre.

En esta investigación se hace uso de ensayos no destructivos (inspección visual, ensayo de gravimetría y velocidad de pulso ultrasónico) y destructivos (resistencia a la compresión), para evaluar el comportamiento del concreto expuesto a hidrocarburos y conocer los cambios ocurridos en el material.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Algunas estructuras de concreto tienen zonas en contacto directo con hidrocarburos o derivados del petróleo y por lo tanto son muy propensas a ser afectadas por contaminantes de éstos productos. Generalmente el resultado final de esta absorción del hidrocarburo o derivado de éste, es el cambio de la resistencia a la compresión, permeabilidad y algunos daños a largo plazo como la formación de pequeñas grietas y en algunos casos hasta la disolución del material. La cantidad del hidrocarburo absorbido o penetrado se puede atribuir a la cantidad de poros que posea la superficie expuesta, a la viscosidad del hidrocarburo y a la carga la cual se encuentra el concreto expuesto.

La fuga de hidrocarburos derivados del petróleo (compuestos orgánicos formados solamente por hidrógeno y carbono) y su infiltración en sistemas acuíferos es un problema que sucede con alguna frecuencia. Cuando un hidrocarburo entra en contacto con el agua, este se disuelve parcialmente y la contamina. Los contaminantes más habituales son el benceno, etil benceno, tolueno y xileno.^[6]Lo anterior indica que en el momento en que el hidrocarburo este en contacto con una fuente de agua inmediatamente empieza su biodegradación así sea de una forma anaeróbica o aeróbica. En la primera forma se originan productos como dióxido de carbono, metano y sales inorgánicas; En la segunda forma los productos de su biodegradación son el benceno y tolueno, los cuales pueden principalmente producir concentraciones de ácidos orgánicos. Los productos generados por la degradación son los responsables de los cambios físicos y mecánicos experimentados por el concreto.

La evaluación de estos daños producidos en las estructuras de concreto pueden ser evaluadas por medio de ensayos no destructivos (END) y uno de los ensayos no destructivos utilizado es el de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Su principal objetivo es evaluar por medio del tiempo de recorrido de un haz de ondas sonoras los posibles cambios ocurridos en la estructura del material, sin afectarlo en sus características y propiedades. Por lo tanto se constituye una técnica apropiada para monitorear estructuras de concreto.

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto es estudiar la relación que tiene la absorción del hidrocarburo con las propiedades mecánicas y físicas del concreto mediante ensayos destructivos y no destructivos

1.2 ESTADO DEL ARTE

El interés por estudiar el comportamiento de los tanques en concreto para almacenamiento de hidrocarburos se dio debido a su bajo costo de reparación, mantenimiento y construcción. Adicionalmente, el concreto ofrece una alta resistencia al fuego y las explosiones. Durante los años 70 se ganó una experiencia considerable en el diseño de tanques con el objetivo de almacenamiento [8]. Una de las principales características a evaluar en una estructura de concreto que este en contacto con un hidrocarburo es el porcentaje de absorción relacionado con la resistencia a la compresión. Algunas de las investigaciones llevadas a cabo son:

En 1976 Orwin G. Maxson y Gary D. Achenbach en su artículo “Properties of Concrete in Contact with Pressured Hydrocarbons and Seawater” demostraron que el hidrocarburo no reacciona químicamente con hormigones de alta resistencia y no alteran sus propiedades físicas (las propiedades evaluadas fueron la resistencia a la fatiga y la permeabilidad). Estas muestras de hormigón

mostraron cambios menores en las propiedades debido a los efectos de los hidrocarburos a presión sobre este material. En este trabajo de investigación los autores utilizaron probetas cilíndricas, y utilizaron como medios de inmersión agua y crudo de petróleo (correspondiente al mar del norte). Las condiciones en las cuales se realizaron los ensayos fueron: una presión de 300 psi, 4 ciclos/min y un tiempo de exposición de 20 horas. Todas la probetas tuvieron un tiempo de curado previo de 28 días debido a que los investigadores asumen que la humedad interna del concreto puede influir en el cambio de las propiedades que fueron ensayadas, ensayo a la fatiga y permeabilidad.[9]

En Noviembre del 1983 [11] se evaluaron los cambios sufridos por el concreto debido al contacto directo con un crudo (oil crude), en este caso se evaluó el comportamiento del concreto mediante el uso de ondas de longitudinales y la técnica de resonancia. Para la realización de este trabajo de investigación, se trabajo con cuatro relaciones a/c diferentes con el fin de tener una porosidad y permeabilidad diferentes. Las relaciones a/c que se trabajaron fueron de: 0.40, 0.50, 0.55 y 0.60; las dimensiones de las probetas fueron de 100x100x500 mm³. En la etapa de curado se manejaron diferentes tiempos de curado los cuales fueron 6, 13, 20 y 27 días. Los tiempos de inmersión trabajados en este proyecto de investigación fueron 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 días de exposición. A pesar de que todas las probetas para cada relación fueron fundidas de una misma mezcla, en el momento de realizar los ensayos destructivos como resistencia a la compresión se presentaron pequeñas variaciones debido a que el concreto no es un material homogéneo. La investigación demostró que en las primeras etapas de inmersión del concreto en crudo, se presentó alta velocidad de absorción, pero se estabiliza a medida que transcurre el tiempo. Este fenómeno puede ser atribuido al llenado de los poros vacíos. También se observó que el concreto obtuvo un aumento del 40 – 50% del modulo dinámico cuando es inmerso en aceite, el estudio permitió saber el comportamiento de la frecuencia de resonancia la cual presentó un aumento entre 5-8% y el cambio de peso en las probetas no excedió

el 2%. Se concluye en este trabajo que los cambios observados en las propiedades mecánicas se deben a las diferentes relaciones a/c trabajadas, al tiempo de curado y al tipo de fluido de inmersión.

En 1985 se publicó la investigación de la Universidad Tecnológica de Bagdad, Irak[10], donde se realizaron nuevamente estudios sobre las propiedades del concreto en contacto con hidrocarburos, utilizando concreto reforzado y manejando unos intervalos de tiempo determinados. Se utilizaron probetas en forma cilíndrica con una barra de refuerzo en el centro de ella, también se fabricaron prismas de hormigón con una barra de refuerzo para medir la distribución de tensiones cuando estas están saturadas en petróleo crudo. Los ensayos que se realizaron fueron: resistencia a la tracción, ensayo de gravimetría, ensayo de tensión en la barra de refuerzo y ensayo de adherencia del concreto sobre la barra de refuerzo. Este trabajo se enfatizó en el efecto que tiene la saturación de petróleo crudo sobre la adhesión entre la barra de refuerzo y el concreto. Se observó que la adhesión entre la barra y el hormigón disminuye, al aumentar el porcentaje de petróleo crudo. También concluyó que la distribución de la tensión de adherencia es mayor en el extremo donde no se produjo contacto con el petróleo crudo. Adicionalmente el punto de ruptura a lo largo de la barra de acero en las muestras que fueron expuestas a petróleo crudo se produjo a una carga menor en comparación con la condición de almacenamiento. Los investigadores concluyeron que a medida que se aumenta el porcentaje de petróleo crudo en el concreto, se va disminuyendo el esfuerzo de adherencia entre la barra y el concreto; además el aumento del porcentaje de absorción afecta las propiedades mecánicas y físicas de la barra de refuerzo.

En la Universidad Tecnología de Iraq durante el 2000 [8] realizaron un estudio de los efectos sobre el concreto en presencia de hidrocarburos, pero en este caso se realizó el estudio aplicando una carga sobre le concreto. Estudiando % absorción del hidrocarburo y propiedades mecánicas del concreto como la resistencia a la

compresión y módulo de ruptura. Se utilizaron probetas cilíndricas para evaluar la resistencia a la compresión y probetas prismáticas para la evaluación de los módulos de ruptura. En este trabajo de investigación se trabajó con dos técnicas, por inmersión con y sin aplicación de carga. La primera técnica consiste simplemente en exponer las probetas en un medio, la segunda técnica consiste en aplicar una carga que es definida como un porcentaje de la resistencia a la compresión teórico y posterior inmersión. Para este último caso se aplicó la carga sobre las probetas y se expusieron al hidrocarburo en tiempos de inmersión determinados y seguidamente se realizó la evaluación de las propiedades nombradas anteriormente. Los tiempos de inmersión fueron: 1, 7, 30 y 60 días. La investigación mostró una alta reducción en la resistencia a la compresión que sucede debido a la absorción del crudo y a las impurezas de éste (azufre), ya que estas escapaban mediante vapores generando grietas y daños a las probetas. La reducción de la resistencia a la compresión alcanzó hasta 12.5 % después de los 60 días de exposición. El módulo de ruptura se incrementó en un 4% después del tiempo de exposición.

En el 2006 A.W. Hago, H.F. Hassan *, A. Al Rawas, R. Taha, S. Al-Hadidi[12] realizaron una investigación de la influencia que tiene sobre un bloque de concreto la contaminación por hidrocarburos. Estos contaminantes son cenizas de hidrocarburos. El sólido contiene 6.8% de aceite, el agregado fino fue remplazado por partículas sólidas de hidrocarburo con porcentaje desde 0% hasta 80% por el peso de la arena en la mezcla. En este proyecto se realizaron las pruebas: Densidad, Resistencia a la compresión, Absorción, Resistencia a la compresión de una columna de mampostería y la conductividad térmica. Las pruebas se realizaron durante el curado y después del curado. Los resultados obtenidos muestran una reducción de densidad al incrementar el porcentaje de hidrocarburos e igualmente sucedió una reducción de la resistencia a la compresión. También se especificó el contenido (60%) máximo de hidrocarburo en los bloques de cemento para mantener las propiedades mecánicas del concreto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el concreto expuesto a hidrocarburos mediante técnicas no destructivas

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto del porcentaje de absorción de hidrocarburo sobre concreto sin refuerzo, mediante la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión.
- Determinar la influencia que tiene el tiempo de exposición sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto expuesto a hidrocarburos.
- Relacionar la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en las muestras de concreto sin refuerzo expuestas a hidrocarburos.

2. MARCO TEORICO

2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

Hoy en día el concreto representa para la construcción, un material de gran resistencia, manejabilidad, adaptabilidad y un comportamiento bastante predecible, además, es un material que ofrece posibilidades para adaptarse a los requisitos contemporáneos.

Este material está compuesto por la mezcla de 3 componentes fundamentales como lo son: cemento, agregados (arena y gravas), y finalmente agua. El producto de esta combinación de materiales forma una pasta húmeda y consistente que tiene la capacidad de fraguar y adquirir dureza al contacto con el agua, esto es debido a una reacción química de hidratación dada entre los dos.

Sin embargo el principal componente del concreto es el cemento portland, que ocupa entre el 7% y el 15% del volumen de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y cohesión que provee la buena resistencia a la compresión. El cemento portland es producido por el hombre y proviene de la calcinación de rocas calizas y arcillas. El segundo componente son los agregados, ocupan entre el 59% y el 76% del volumen de la masa. Son esencialmente materiales inertes, naturales o artificiales de forma granular, que por conveniencia han sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). En general proviene de las rocas naturales, pero también existen agregados artificiales. El tercer componente, el agua ocupa entre el 14% y el 18% del volumen de la mezcla e hidrata al cemento portland^{[1][2]}.

Posterior al tiempo de fraguado y curado, la pasta húmeda se transforma en una aglomeración dura, resistente y durable. La función de los agregados es servir

como relleno transformando la pasta en un material más fuerte y menos costoso [13].

Como ya se indico los tres componentes fundamentales de este material son: el cemento el agua y los agregados.

El cemento se define como una sustancia de polvo fino hecha de argamasa de yeso capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con el agua y que se endurece espontáneamente en contacto con el aire.

La norma ASTM C 150 [15], establece 8 tipos diferentes de cemento de acuerdo a los usos y necesidades del cliente (ver Tabla 1).

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

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

Fuente: Norma ASTM C 150 [16]

2.2 AGUA

Constituye el componente fundamental en la formación del concreto, pues es quien permite el desarrollo de su adhesión con el cemento. La cantidad de agua que se le añade se puede dividir en los porcentajes requeridos para la hidratación del cemento y lo restante para fluidizar la pasta y permitir el mejor desempeño al añadir los agregados.

El agua utilizada en la elaboración del concreto debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, compuestos químicos, sulfatos, sulfuros y cloruros [16].

2.3 AGREGADOS

Se define como agregado al conjunto de partículas inorgánicas de origen natural o artificial cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados en la NTC 174 [17].

Los agregados finos son arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; por el contrario, los agregados gruesos son aquellos que resultan retenidos en la malla No. 16 después del proceso de tamizado y que pueden variar sus tamaños hasta 152 mm [18].

Algunas de las propiedades de los agregados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los agregados del concreto ^{[4] [5]}

PROPIEDAD	ALGUNAS CARACTERISTICAS
Granulometría	Esta es la forma en que se encuentran distribuidos los diferentes tamaños de los agregados.
Sanidad	Es la propiedad que tienen los agregados para resistir el ataque de la intemperie.
Sustancias deletéreas	Son aquellas que contaminan a los agregados y que de alguna forma dañan el concreto

Fuente: Instituto del concreto

2.4 RELACIÓN AGUA – CEMENTO

La resistencia del concreto se determina por la relación agua/cemento, que expresa la relación existente entre el peso del agua y el peso del cemento utilizados. A la hora de constituir un diseño de mezcla, una relación agua/cemento baja resulta ideal debido a que se puede obtener las siguientes ventajas:

- Incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Menor permeabilidad.
- Lograr una mejor unión entre capas sucesivas entre el concreto y el esfuerzo.

- Reducir las tendencias de agrietamientos por contracción.

2.5 POROSIDAD EN EL CONCRETO

En la elaboración del concreto existen proporciones determinadas para un concreto deseado. Para poder regular estas proporciones de aire en la mezcla de concreto se sugiere una buena compactación mediante vibración o leves golpes en la formaleta que la contiene.

Tabla 3. Clasificación de los poros según sus características y tamaño ^{[6]<}

TIPO	CARACTERÍSTICAS	EFFECTO Y TAMAÑO
Poros de aire o macroporos	Corresponden a las burbujas de aire que quedan naturalmente atrapados y/o intencionalmente incluidas (mediante un aditivo inductor de aire) en la masa de concreto.	No suelen estar interconectados, su diámetro es de 0,2mm (200 micras).
Poros capilares	Son los poros que se encuentran por fuera del gel de cemento, están interconectados y abiertos al exterior, son susceptibles de ser saturados y por ellos ocurre la permeabilidad del concreto a los fluidos.	Cuando aumenta la cantidad de poros capilares, se reduce significativamente la resistencia del concreto a los ataques físicos, químicos y biológicos. Su forma es variable y su tamaño oscila entre 0,00002 mm (0.002 micras) y 0.2 mm (200 micras).
Poros de gel o microporos	Son los poros que presenta la pasta de cemento hidratada y endurecida (poros intersticiales del gel de cemento)	Estos poros no intercambian agua con el medio ambiente, a menos que la humedad que presenten se encuentre por debajo del 20 % ^[6] , su diámetro es menor de 0,00002 mm (0,02 micras).

Fuente: Sánchez De Guzmán Diego; Durabilidad y Patología del concreto

2.6 DETERIORO DEL CONCRETO

Para que se desarrollen procesos de deterioro de carácter físico, químico o biológico, tanto en el concreto como en las armaduras de acero, debe darse una interacción entre los materiales de la estructura y el medio ambiente circundante. En ello, intervienen: la permeabilidad del concreto a los fluidos (gases o líquidos), a través de los macro poros, los poros capilares y las fisuras; y el microclima (condiciones de humedad, de temperatura, de presión y la presencia de agentes agresivos), que rodea a la superficie del concreto.

El alcance de la penetración, la velocidad, y el efecto del transporte de agentes agresivos dentro del concreto, depende principalmente de: la estructura de los poros y fisuras dentro del concreto; de la presencia de humedad; y de los mecanismos de transporte. Del mismo modo, la velocidad y magnitud de las reacciones que se puedan presentar entre los agentes agresivos y el concreto, depende a su vez de: el tipo y la concentración de las sustancias agresivas; la composición química del cemento y las propiedades químicas y mineralógicas de los agregados; de la temperatura y presión; de la humedad relativa; y, de la naturaleza y distribución de los poros y fisuras^[6].

2.7 BIODEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS

La fuga de hidrocarburos derivados del petróleo (compuestos orgánicos formados solamente por hidrógeno y carbono) y su infiltración en sistemas acuíferos es un problema que sucede con alguna frecuencia. Cuando un hidrocarburo entra en contacto con el agua, este se disuelve parcialmente y la contamina. Los contaminantes más habituales son el benceno, etil benceno, tolueno y xileno.

La mayoría de acuíferos contienen microorganismos con capacidad metabólica para oxidar hidrocarburos y por su acción, los hidrocarburos se pueden degradar en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La biodegradación de algunos hidrocarburos, por la acción de ciertos microorganismos aeróbicos, es consecuencia de una reacción de oxireducción, en el cual se producen dióxido de carbono, metano, sales inorgánicas, hierro reducido y agua. En una biodegradación anaeróbica de benceno y tolueno, principalmente se pueden producir altas concentraciones de ácidos orgánicos.

Si los hidrocarburos o los productos de su biodegradación entran en contacto con el concreto, pueden ocurrir agresiones significativas de carácter químico y/o biológico^[6].

2.8 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

En el campo de los ensayos no destructivos, la velocidad de pulso ultrasonido es una de las técnicas de inspección de mayor aplicación en la actualidad para la evaluación de estructuras de concreto.

De acuerdo con la norma ASTM C597 – 02 [20], la técnica de la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto puede medir la calidad relativa y uniformidad interna del mismo.

2.8.1 Generalidades de la técnica. Por medio de la técnica de velocidad de pulso se puede establecer el tiempo de vuelo, es decir, el tiempo que tarda una onda emitida por uno de los transductores del equipo en desplazarse por la estructura de concreto. Conociendo el tiempo de vuelo, podemos calcular la velocidad de esta pulsación, por medio de la ecuación (1) [21]:

$$V = L / T$$

Dónde:

V = Velocidad de pulso ultrasónico

L = Longitud de la pieza de concreto

T = Tiempo de vuelo

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se basa en que los materiales sólidos conducen apropiadamente las ondas acústicas, por lo cual las ondas ultrasónicas, pueden llegar a reflejarse en las interfaces y discontinuidades internas del concreto [13].

El equipo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), trabaja con pulsaciones de onda longitudinal de baja frecuencia generadas por un transductor de tipo electro acústico que actúa como emisor transformando energía eléctrica en mecánica, que traspasa la pieza a analizar y es recibida por un receptor que actúa de manera opuesta recibiendo la energía mecánica y transformándola en eléctrica.

Teniendo en cuenta la geometría de la pieza a analizar, la técnica de velocidad de pulso ultrasónico permite 3 tipos de mediciones distintas.

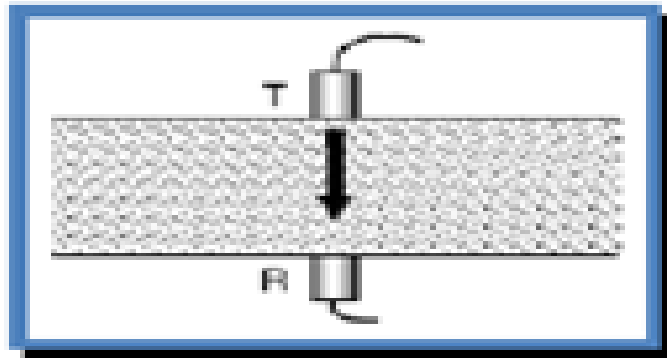
2.8.2 Modo de transmisión directo. Esta modalidad ofrece una máxima transferencia entre los palpadores debido a que la onda viaja en dirección normal a ellos y por tanto brinda una lectura más precisa, ver figura 1

2.8.3 Modo de transmisión semi-directo. El método semi-directo (ver figura 2), puede ser a veces satisfactorio, si el ángulo entre los dos transductores no es superior a 90° , o si la longitud del recorrido no es demasiado larga. La sensibilidad de los transductores será menor y puede ocurrir que la señal recibida no sea clara a causa de la atenuación del impulso ultrasónico. La longitud de recorrido no se define bien dado al tamaño finito del transductor, pero es usual medir esta longitud desde el centro del emisor hasta el centro del receptor [22].

2.8.4 Modo de transmisión indirecto. Esta modalidad permite la lectura de velocidades de pulso muy cercanas a la superficie de la pieza de concreto, ver figura 3 La falencia de dicha modalidad radica en la incapacidad de conocer la respuesta al paso del pulso en zonas representativas de la pieza de concreto.

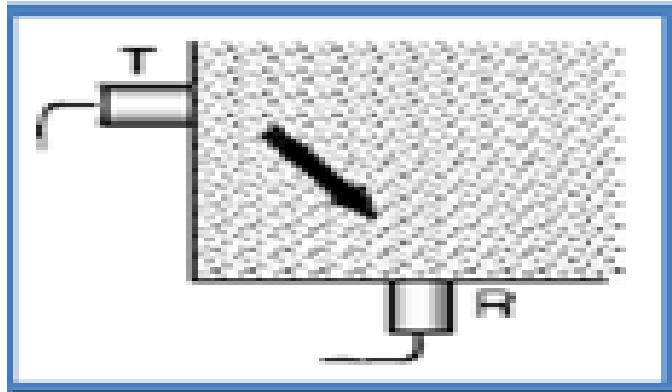
En el caso del concreto, debido a su alta heterogeneidad, es recomendado el uso de bajas frecuencias (50 y 200 KHz), las cuales proporcionan haces en longitudes de onda que permiten su evaluación.

Figura 1. Método de Transmisión Directo



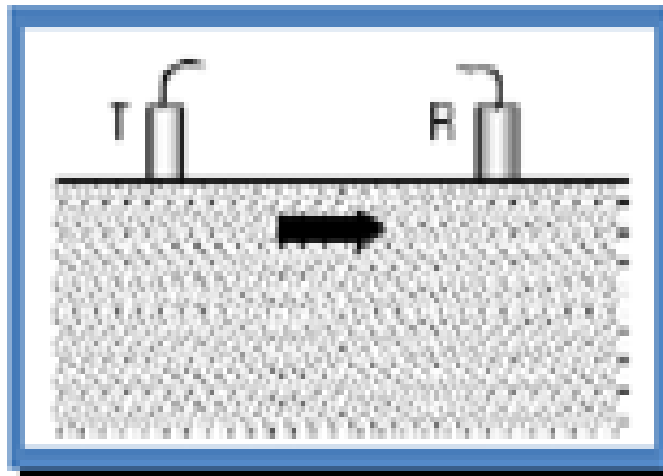
Fuente: Handbook nondestructive testing concrete

Figura 2. Metodo de Transmisión Semi-directo



Fuente: Handbook nondestructive testing concrete

Figura 3. Método de Transmisión indirecto



Fuente: Handbook nondestructive testing concrete

2.8.5 Factores a tener en cuenta en la Velocidad de Pulso Ultrasónico. Al utilizar la técnica de velocidad de pulso ultrasónico sobre el concreto, se deben tener en cuenta factores tales como la edad de la pieza, el tipo de agregado, la

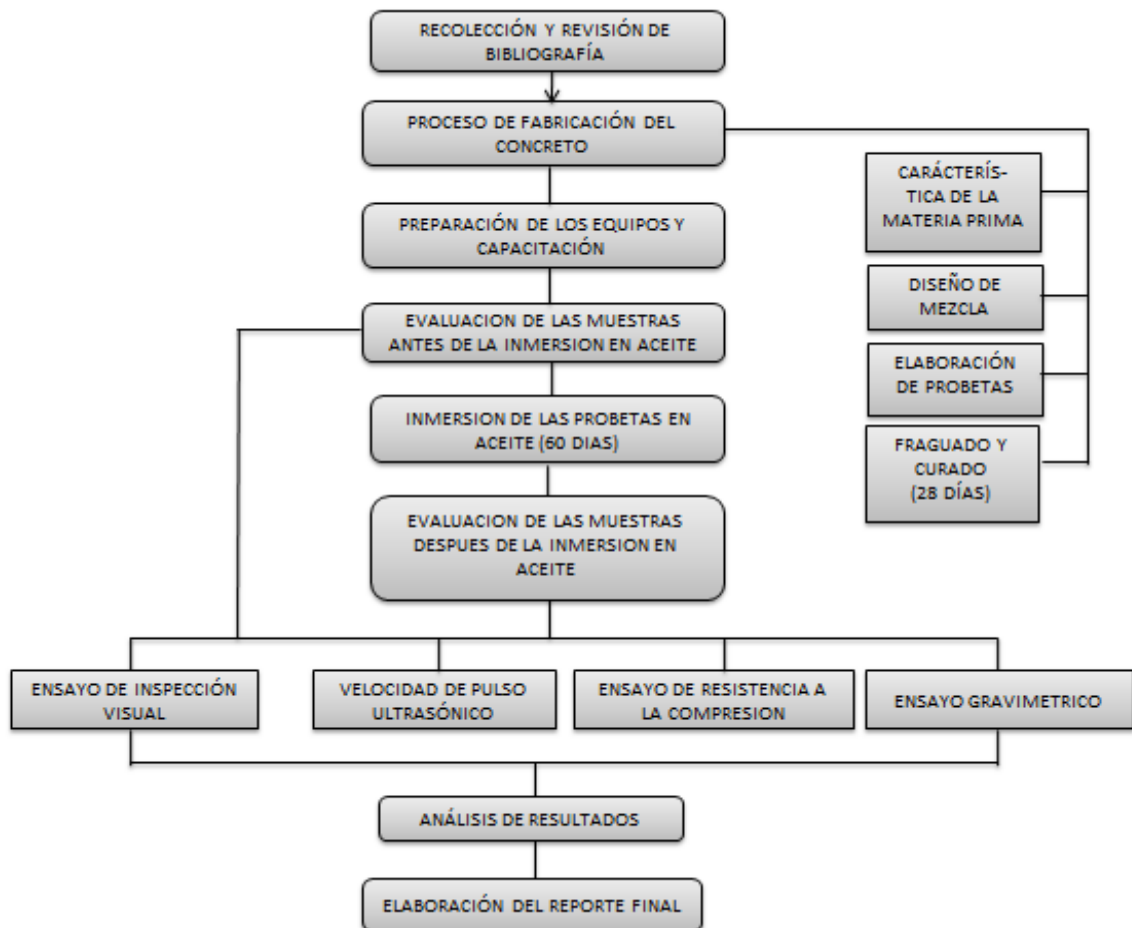
humedad, la longitud de la pieza a evaluar y el ataque presente en su estructura interna [23], [25]:

- **Edad de la pieza:** La velocidad de pulso ultrasónico es favorecida cuando la pieza de concreto en su proceso de curado aumenta su hidratación ganando rigidez y disminuyendo su porosidad interna.
- **Tipo de agregado:** El tamaño y la forma del agregado influyen directamente sobre la velocidad de pulso ultrasónico, ya que las rocas poseen velocidades de pulso mayor que la pasta de concreto.
- **La Humedad:** El equipo de ultrasonido permite captar mínimas cantidades de líquido retenido en los poros y grietas del concreto a evaluar, por ello, un aumento en la humedad de la pieza, permite un aumento proporcional de la velocidad del pulso ultrasónico.
- **Relación agua-cemento:** Este es uno de los factores mas importantes ya que cuando en una estructura de concreto con mayor relación a/c, la velocidad de pulso ultrasónico será menor debido a la mayor porosidad y la onda se dispersara debido a los espacios vacíos.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 4, se muestra un diagrama de flujo con las diferentes etapas que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto. A continuación se presentan detalles de cada una de estas etapas.

Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto



Fuente: Autores del Proyecto

3.1 RECOLECCIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Desde el inicio y durante el desarrollo de la presente investigación se realizó una recopilación y revisión de material bibliográfico, relacionada con el tema a trabajar en el proyecto, esta información fue investigada en trabajos de grado, libros y artículos.

En este caso se tuvieron en cuenta normas de la ASTM e ICONTEC, las cuales fueron base importante para el desarrollo de la presente investigación del concreto.

Con base a la información y planteamientos encontrados en la literatura, se definieron parámetros importantes como el valor de la relación agua/cemento, tipo de hidrocarburo que estaría en contacto con las probetas, condiciones para su elaboración, técnicas destructivas y no destructivas y finalmente las pruebas de caracterización, para organizar el eje central de esta investigación.

3.2 PROCESO DE FABRICACION DEL CONCRETO

Para el desarrollo de la investigación, las probetas fueron elaboradas con relación de Agua/Cemento de 0.5 y 0.45, con el fin de tener muestras con diferente grado de absorción de hidrocarburo (diferente porosidad).

Se fabricaron en total 40 probetas cúbicas de $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ para inspección visual, lecturas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), ensayo gravimétrico y resistencia a la compresión. Para la elaboración de estas muestras se llevaron a cabo las siguientes etapas: caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, elaboración de las probetas, fraguado y curado. A continuación se presentan detalles de las mismas.

3.2.1 Caracterización de la materia. Los materiales utilizados en la mezcla fueron: Cemento Portland Tipo I, Agua potable y agregado, fino y grueso.

Para estas caracterizaciones se tuvieron en cuenta las siguientes normas: NTC 121 [18] y NTC 321 [23], para el Cemento Portland, NTC 92 [25] NTC176 [26] y NTC 237[27] para propiedades de los agregados, NTC 77 [28] y NTC 78 [29] para la granulometría de los mismos.

En la caracterización de los agregados se realizaron pruebas granulométricas a fin de determinar el módulo de finura y el tamaño máximo de agregado grueso, aspectos importantes para el diseño de mezcla.

Para determinar la granulometría de los agregados se tuvo en cuenta las normas nombradas anteriormente, 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 la cantidad pasante en cada uno de ellos, y con ello se determinó su módulo finura; para el agregado grueso se tomó el juego de tamices $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ y 4 en el orden respectivo, adicionalmente se determinaron las gravedades específicas para cada tipo de agregado.

Las gravedades específicas, pesos específicos y la absorción para cada tipo de agregado se determinaron siguiendo las normas referenciadas anteriormente.

Los resultados obtenidos para los diferentes materiales en las respectivas pruebas, se presentan en el siguiente capítulo.

3.2.2 Diseño de Mezcla. Para la elaboración del diseño de mezcla, se tuvieron en cuenta factores tales como la selección del tamaño de agregado fino y grueso, las dimensiones de las probetas, el tipo de asentamiento y la resistencia a la compresión teórica, como se estipula en el procedimiento del **American Concrete Institute (A.C.I)**. **Detalles del diseño se presentan en el Anexo A.**

Siguiendo el método A.C.I se fabricaron probetas con una relaciones de agua cemento de 0.5 y 0.45 con el fin de obtener un porcentaje de absorción diferente en cada una de las mezclas. Los resultados de los diseños de mezcla se muestran en el capítulo 4.

3.2.3 Elaboración de probetas. Para llevar a cabo la investigación se elaboran probetas cúbicas de 20 cm x 20 cm x 20 cm, con una relación de agua/cemento (a/c): 0.5 y 0.45, Las cuales fueron elaboradas en el Centro de Caracterización de Materiales del Edificio Álvaro Beltrán Pinzón, en la Escuela de Ingeniería Civil.

Para la elaboración de las probetas se utilizaron formaletas de madera, las cuales inicialmente fueron limpiadas e internamente se les aplicó una capa de ACPM para evitar que la mezcla de concreto se adhiriera a la formaleta y se procedió a armarlas como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Formaleta para las probetas



Fuente: Autores del Proyecto

La preparación de la mezcla inició con el pesado del agregado fino y el cemento, esto se llevó a cabo en una bandeja metálica donde se realizó la mezcla y posteriormente se pesó el agregado grueso añadido de igual manera a la bandeja y mezclado con el cemento y arena anteriormente mencionados. Finalmente, se agregó la cantidad de agua necesaria para llevar a cabo la mezcla.

A continuación, como se muestra en la Figura 6, la mezcla obtenida de la combinación de agregado fino, grueso cemento y agua.

Figura 6. Mezcla de cemento, agregado grueso, fino y agua



Fuente: Autores del Proyecto

Una vez lista la mezcla se procedió a introducirla en las formaletas en tres porciones de igual volumen aproximadamente y se apisonó con una varilla uniformemente.

Finalmente se le dieron algunos golpes por la parte exterior del molde para garantizar una mejor compactación y con la ayuda de un palustre se alisó la

superficie para darle un acabado plano. Para este procedimiento se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 1377 [30].

3.2.4 Fraguado y curado de las probetas. La fase inicial de hidratación (Fraguado) fue de 24 horas ver figura 7, al cumplir el tiempo requerido de fraguado se realizó el desmolde de las probetas. El proceso de endurecimiento de la mezcla (curado) ver figura 8, se realizó bajo condiciones estándar de temperatura y humedad (23°C y humedad del 100%). Estas condiciones se lograron por inmersión en piscina. Debido al gran número de probetas estas fueron enumeradas de la siguiente manera, del 1 al 20 son las probetas con relación a/c 0.5 y del 21 al 40 con relación 0.45.

Figura 7. Proceso de Fraguado



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 8. Proceso de Curado



Fuente: Autores del Proyecto

3.3 PREPARACIÓN DE LOS EQUIPOS Y CAPACITACIÓN

En esta parte de la investigación, se reconocieron los equipos empleados en la realización de los diferentes ensayos para su uso adecuado. Estos fueron el equipo de ultrasonido de baja frecuencia y la máquina universal de ensayos.

Para determinar la velocidad de pulso ultrasónico de las probetas, se utilizó el equipo de ultrasonido de baja frecuencia marca CNS Farnell Limited Tipo PUNDIT PLUS Modelo PC1006 (ver Figura 9), con el cual se realizaron las lecturas de tiempo de vuelo y junto con las longitudes medidas de las probetas, se determinó la velocidad de pulso ultrasónico.

Figura 9. Equipo de Ultrasonico de Baja Frecuencia marca CNS Farnell Limited Tipo PUNDIT PLUS Modelo PC1006



Fuente: Autores del Proyecto

Previo al uso del equipo fue necesaria su calibración, siguiendo las instrucciones del respectivo manual. El equipo trabaja con 2 palpadores metálicos de 54 KHz que hacen las veces de transductor y emisor de onda, interconectados por medio de 2 cables al equipo. Las condiciones de operación establecidas para esta investigación se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros utilizados en el equipo de ultrasonido

Voltaje	110 V
Unidades	Métricas
Modo de pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	Apagado
Distancia entre transductores	0.20 metros
Pulso de referencia	10 Segundos

Tabla 4 (Continua)

Límite superior	9999
Límite inferior	1
Frecuencia de los palpadores	54 KHz

Fuente: Autores del Proyecto

Para la medición de longitudes, se utilizó un calibrador digital con lectura de tres dígitos, marca UPM (United Precision Machine, Inc), el cual se observa en la Figura 10.

Figura 10. Calibrador digital marca UPM



Fuente: Autores del Proyecto

En los ensayos de resistencia a la compresión que se le realizaron a las probetas se utilizó la máquina universal de ensayos AMSLER (Alfred J. Amsler y Cia), la cual permite lecturas de resistencia a la compresión de hasta 200 toneladas. Este

equipo (ver Figura 11), se encuentra ubicada en el Centro de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil.

Figura 11. Máquina universal de ensayos AMSLER



Fuente: Autores del Proyecto

Para el buen manejo de los equipos empleados fue necesario recibir capacitación sobre el proceso de calibración y uso apropiado de los mismos.

3.4 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS ANTES DE LA INMERSION EN ACEITE

Se llevaron a cabo sobre treinta muestras de concreto, antes de la inmersión en aceite, los ensayos de inspección visual, VPU y gravimetría. Se realizó la prueba de resistencia a la compresión a seis muestras patrón.

Los ensayos indicados se realizaron después de finalizado el proceso de curado (28 días) y secado (15 días) de las muestras fabricadas.

A continuación se presentan detalles de la metodología seguida en cada ensayo y en el capítulo 4, se muestran los resultados obtenidos.

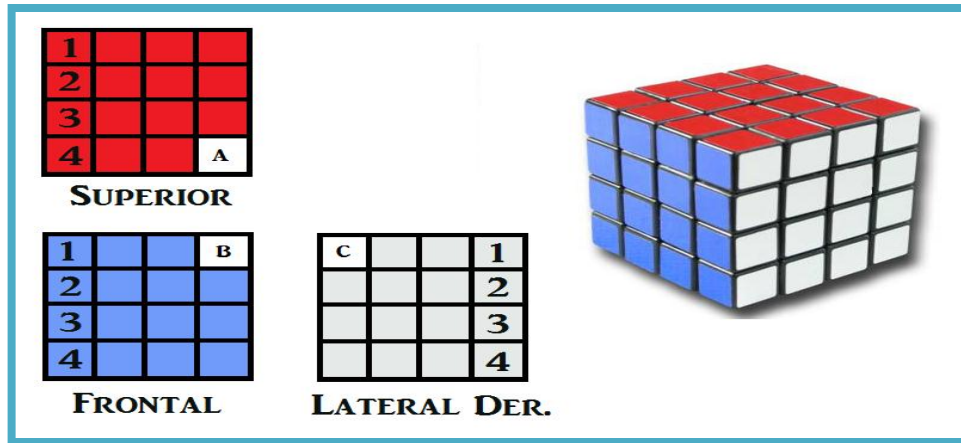
3.4.1 Inspección Visual. Esta inspección se realizó al momento de desencofrar las probetas, verificando que la superficie de concreto se encontrara uniforme. Luego se procedió a homogenizar la superficie de las probetas mediante un disco de esmeril y lijas No 80 y 120 con el fin de retirar algunas heterogeneidades del material y asegurar que la superficie del concreto se encontraba lista.

Empleando el calibrador digital, se llevó a cabo la toma de medidas de longitud en todas las caras de las probetas elaboradas.

3.4.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico. Como se indicó anteriormente, las superficies de cada probeta se prepararon dejándolas lo más homogéneamente posible para poder realizar la toma de lecturas de tiempo de vuelo. A cada muestra elaborada se le hizo una demarcación con cuadros de 5 x 5 cm, es decir 16 cuadros en cada cara y 96 en toda la probeta, (ver Figura 12). El objetivo de esta cuadrícula fue el controlar el posicionamiento de los palpadores para tener confiabilidad en las lecturas de VPU.

En la figura 12, la cara A representa la vista superior, la cara B la vista frontal, y la cara C la vista lateral derecha. Las filas 1, 2, 3 y 4 de la cara A, al igual que las demás caras, cuentan con 4 columnas.

Figura 12. Cuadrícula para la toma de tiempos de vuelo de las probetas



Fuente: Autores del Proyecto

3.4.3 Ensayo Gravimétrico. En este ensayo se utilizó una balanza con capacidad de 25 Kg y una precisión de 5 dígitos. Con este instrumento se tomó el peso de cada una de las probetas elaboradas, siguiendo el procedimiento establecido en la norma NTC 5653 [32].

3.4.4 Ensayo de resistencia a la compresión. Este ensayo se realizó a las seis probetas patrón (cero días de exposición) de las relaciones a/c 0.45 y 0.5. La prueba se llevo a cabo siguiendo la norma NTC 673 [31].

Los resultados de este ensayo, sirvieron de base para evaluar comparativamente, los cambios ocurridos en las probetas inmersas en aceite.

3.5 INMERSIÓN DE LAS PROBETAS EN ACEITE

Para el desarrollo de esta etapa se tuvieron en cuenta varios aspectos tales como: diseño del recipiente de inmersión (piscina), selección del aceite de inmersión,

tiempo de exposición al hidrocarburo y zona de contacto directo de las muestras en el aceite.

Con base en el número y tamaño de las probetas de concreto, se hizo el diseño adecuado para poder realizar la inmersión de las muestras. El material empleado fue un acero ordinario al carbono y sus dimensiones fueron 170 x 70 x 30 cm³, ver figura 13.

Figura 13. Piscina de inmersión para las probetas



Fuente: Autores del Proyecto

El aceite escogido para la realización de este trabajo fue biodiesel. La selección se hizo teniendo en cuenta su alta viscosidad, baja volatilidad, fácil adquisición y bajo costo.

Se establecieron los siguientes tiempos de exposición directa al biodiesel 3, 7, 15, 45 y 75 días.

Todas las muestras se ubicaron de la misma forma, de tal manera que las caras B y C estuvieran en contacto directo con el biodiesel, el nivel de inmersión fue

aproximadamente $\frac{3}{4}$ de la altura de la probeta, condición que se mantuvo durante toda la exposición. En la figura 14 se aprecia la forma como se llevó a cabo la inmersión.

Figura 14. Inmersión de las probetas en contacto directo con el biodiesel



Fuente: Autores del Proyecto

3.6 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE LA INMERSIÓN EN ACEITE

A medida que se fueron cumpliendo los tiempos de exposición, fueron extraídas las probetas correspondientes a cada relación a/c con el fin de realizar los ensayos de inspección visual, VPU, gravimetría (% de absorción), y resistencia a la compresión.

Antes de realizar los ensayos de gravimetría y VPU, se llevó a cabo un secado superficial empleando lanilla o estopa, realizándose posteriormente las pruebas indicadas.

Seguidamente las muestras se dejaron secar en condiciones ambientales durante 5 días, con el fin de lograr un secado homogéneo y realizar nuevamente las pruebas.

Después de realizados estos ensayos no destructivos se llevó a cabo la evaluación de la resistencia a la compresión de las probetas. Cabe destacar que para cada tiempo de inmersión se evaluaron tres probetas por cada relación a/c.

3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta etapa de la investigación, se analizaron los datos obtenidos en las pruebas realizadas, buscando relacionar los resultados hallados experimentalmente de la inspección visual, ensayo de gravimetría, las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico y los valores de resistencia a la compresión, para evaluar el efecto que tiene sobre el concreto la exposición directa a un hidrocarburo.

3.8 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Se realizó un informe detallado de la investigación con el marco teórico, la metodología utilizada, los resultados obtenidos, el análisis de resultados, las conclusiones y las recomendaciones a partir de la investigación y el trabajo experimental realizado.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En esta parte del informe se presentan los resultados obtenidos durante las etapas de fabricación de las muestras de concreto, los ensayos no destructivos y ensayos destructivos, realizados antes y después de la inmersión en biodiesel.

Además se hace el análisis de estos resultados y se establecen las relaciones pertinentes entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.



4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la investigación, en lo referente a caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, elaboración de las probetas, fraguado y curado de las mismas.

4.1.1 Caracterización de la materia prima. Como se indicó anteriormente, se estudiaron el cemento, el agua de mezcla y los agregados grueso y fino. El cemento Portland Tipo I, fue suministrado por el grupo de investigación GIMAT de la UIS; su marca comercial es Argos S.A. y este producto cumple con los valores de la norma colombiana NTC 121 [18], NTC 321 [23] y la norma americana ASTM C-1157 [24].

El agua empleada en la mezcla, fue agua potable suministrada por el acueducto metropolitano de Bucaramanga. El análisis fisicoquímico y microbiológico, se presenta en la Tabla 5, suministrada por la empresa amb.

Tabla 5. Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua potable

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA																		
F CC 507-006		RED DE DISTRIBUCIÓN																		
Rev.:0		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																		
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA				AÑO:		2011												
PARAMETROS MES	Parámetros Fisicoquímicos													Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL	
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color aparente UPC	pH Unidades	Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg AIL	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	0,95	0,60	4,1	7,19	0	0,05	46,1	65,5	3,4	26,7	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,95	0,70	3,5	7,27	0	0,05	51,7	69,5	3,8	26,8	N.D	1,2	N.D	168	0	100	0	100	0,00
Marzo	93	0,94	1,00	5,9	7,15	0	0,06	44,9	69,1	4,0	27,6	N.D	1,1	N.D	186	0	100	0	100	0,00
PROMEDIO	89	0,95	0,83	4,5	7,20	0	0,05	47,6	68,0	3,7	27,0	N.D	1,2	N.D	178	0,0	100	0,0	100	0,00
RES. 2115/07	3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/día	0	100	0	100	0 - 5
Conveniones:	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 IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																			
Elaboró:		Leonor Chaón				Revisó y Aprobó:		 CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas												

Fuente: Acueducto metropolitano de Bucaramanga

Para la preparación de la mezcla se usó arena como agregado fino y grava como agregado grueso, los cuales fueron suministrados por el grupo de investigación GIMAT.

La caracterización tanto para el agregado fino como para el agregado grueso se muestra en las Tablas 6 y 7, donde se dan a conocer sus principales propiedades físicas halladas siguiendo la metodología planteada.

Tabla 6. Caracterización de los agregados fino y grueso

Características	Agregado fino	Agregado grueso
Gravedad específica aparente S.S.S	2.65	2.6
Peso Unitario Suelto	1490	1381.51
Peso Unitario Compactado	1560	1465.34
Porcentaje de Absorción%	2.0	1.58
Porcentaje de Vacíos%	36.0	44.64

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 7. Análisis granulométrico del agregado fino

TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE
4	7.2	0.72	0.72	99.2
8	9.8	0.98	1.70	98.30
16	39.3	3.93	5.63	94.37
30	192.1	19.21	24.84	75.16
50	495.3	49.53	74.37	25.63
100	168.5	16.85	91.22	8.78
Fondo	87.2	8.72	99.94	0.06
Total	999.4	99.94	Peso Muestra	1000 gr
		Indicé Finura	1.98	

Fuente: Autores del Proyecto

El agregado grueso utilizado presentó un tamaño máximo nominal de ¾" y el módulo de finura para el agregado fino fue de 1.98. Este último se encontró ligeramente por debajo de lo recomendado por la norma ICONTEC 127.

4.1.2 Diseño de mezcla. Los valores que se encuentran en las Tablas 8 y 9, describen las cantidades significativas para el diseño de mezcla utilizado en esta investigación. Los cálculos y relaciones numéricas se encuentran en el anexo A.

Tabla 8. Cantidades representativas para un diseño de mezcla de 0.5

Constituyente	Masa en Kg/m³ (kg)	Una probeta cubica de 20 cm de lado. (kg)
Agua	225,000	1.8
Cemento	450,000	3.6
Agregado Fino	835,780	6.68
Agregado Grueso	825,000	6.60

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 9. Cantidades representativas para un diseño de mezcla de 0.45

Constituyente	Masa en Kg/m³ (kg)	Una probeta cubica de 20 cm de lado. (kg)
Agua	225,000	1.8
Cemento	500,000	4
Agregado Fino	790,098	6.32
Agregado Grueso	780,000	6.24

Fuente: Autores del Proyecto

4.1.3 Elaboración de probetas. Se elaboraron en total 40 probetas cúbicas de 20 cm de lado, para el desarrollo de la presente investigación. En la Tabla 10 se presenta la distribución de las probetas para cada tiempo de inmersión, teniendo en cuenta la respectiva relación a/c.

Tabla 10. Distribución de probetas

Días exposición	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.45
0	3	3
3	3	3
7	3	3
15	3	3
45	3	3
75	3	3

Fuente: Autores del Proyecto

Total = 36 Probetas cubicas.

Se elaboraron 2 probetas más por cada relación a/c con el fin de tener la opción de tener probetas de repuesto.

4.1.4 Fraguado y curado. Las probetas fabricadas, tuvieron un proceso de curado y fraguado siguiendo la metodología indicada. En la Figura 15, muestran imágenes de las etapas de fraguado y curado de las mismas.

Figura 15. Proceso de Fraguado y Curado



a) Proceso de Fraguado (24 horas)



b) Proceso de Curado (28 días)

Fuente: Autores del Proyecto

4.2 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS ANTES DE LA INMERSIÓN EN ACEITE.

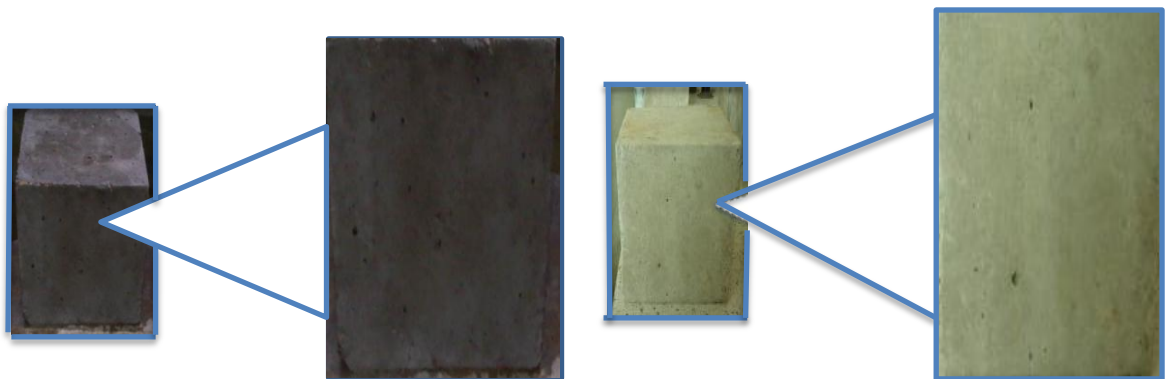
A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de Inspección Visual, Velocidad de pulso (VPU), gravimetría y resistencia a la compresión.

4.2.1 Inspección visual. La inspección visual se realizó a las probetas, luego de su extracción de las formaletas. Este ensayo permitió verificar la buena condición superficial de las mismas, así como establecer diferencias entre la porosidad obtenida para las dos relaciones a/c. La relación a/c 0.5 presentó mayor porosidad que la de 0.45, lo cual se debe a la mayor cantidad de agua presente en estas muestras. Este resultado es acorde con lo reportado en la bibliografía [9][11].

La presencia de mayor porosidad en las muestras de mayor relación a/c, podría indicar un porcentaje mayor de absorción de hidrocarburos.

En la Figura 16 se muestran imágenes de muestras con diferentes relaciones a/c y diferente porosidad.

Figura 16. Inspección Visual



a) Concreto relación a/c 0.5

b) Concreto relación a/c 0.45

Fuente: Autores del Proyecto

En la Tabla 11 se presentan los datos correspondientes a las longitudes medidas para cada cara de algunas probetas con diferente relación a/c. Los valores presentaron una variación máxima menor al 3%.

Tabla 11. Longitudes de algunas probetas

No Probeta	Relación a/c	Cara A-A' (cm)	Cara B-B' (cm)	Cara C-C' (cm)
4	0.5	19,621	19,782	19,846
5	0.5	19,894	20,198	19,567

Tabla 11 (Continua)

6	0.5	20,250	20,168	20,282
24	0.45	19,603	20,334	19,838
25	0.45	19,926	20,251	20,060
26	0.45	19,410	20,096	20,295

Fuente: Autores del Proyecto

4.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico. En las Tablas 12 y 13, y en las gráficas 1 y 2 se presentan los resultados promedio de VPU para cada relación a/c estudiada. Las tablas muestran los resultados promedio de las veinte probetas por cada relación a/c trabajada. En cada probeta se tomaron 96 medidas de tiempo de vuelo a partir de las cuales se determino la VPU.

Tabla 12. Velocidad de pulso promedio de las probetas con una relación a/c de 0.5 antes de la inmersión en biodiesel

Número de Filas	Distancia (m)	Velocidad Promedio de la cara A. (m/s)	Velocidad Promedio de la cara B. (m/s)	Velocidad Promedio de la cara C. (m/s)
1	0.05	3740,02	3739,32	3749,56
2	0.1	3712,34	3740,49	3730,00
3	0.15	3699,61	3731,14	3742,95
4	0.20	3676,48	3726,06	3729,97

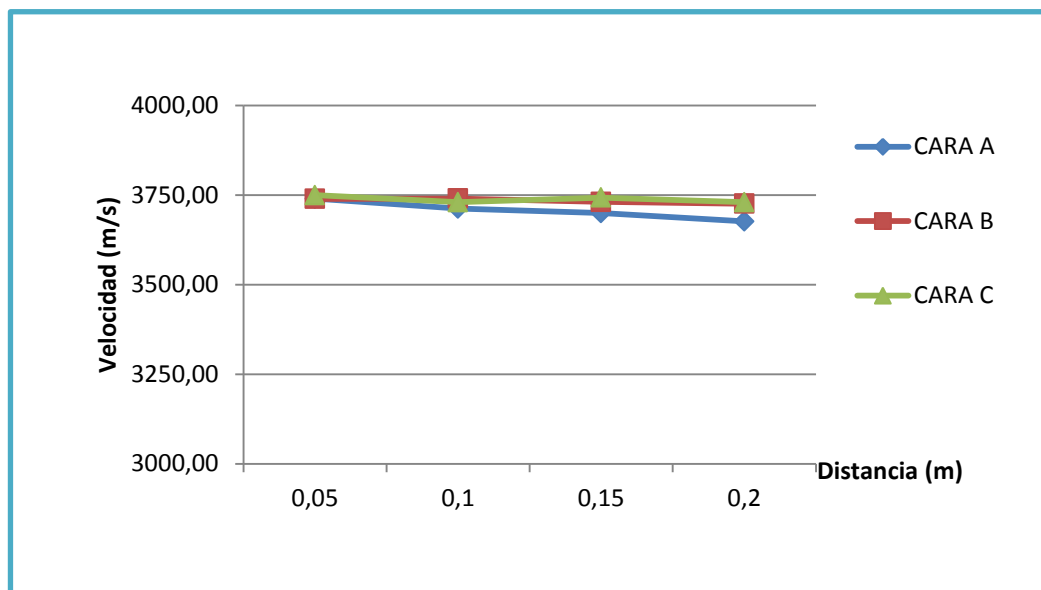
Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 13. Velocidad de pulso promedio de las probetas con una relación a/c de 0.45 antes de la inmersión en biodiesel

Número de Filas	Distancia (m)	Velocidad Promedio de la cara A. (m/s)	Velocidad Promedio de la cara B. (m/s)	Velocidad Promedio de la cara C. (m/s)
1	0.05	3964,98	3987,57	3961,29
2	0.1	3960,99	3985,09	3969,12
3	0.15	3953,91	3974,17	3976,17
4	0.20	3929,71	3929,52	3924,20

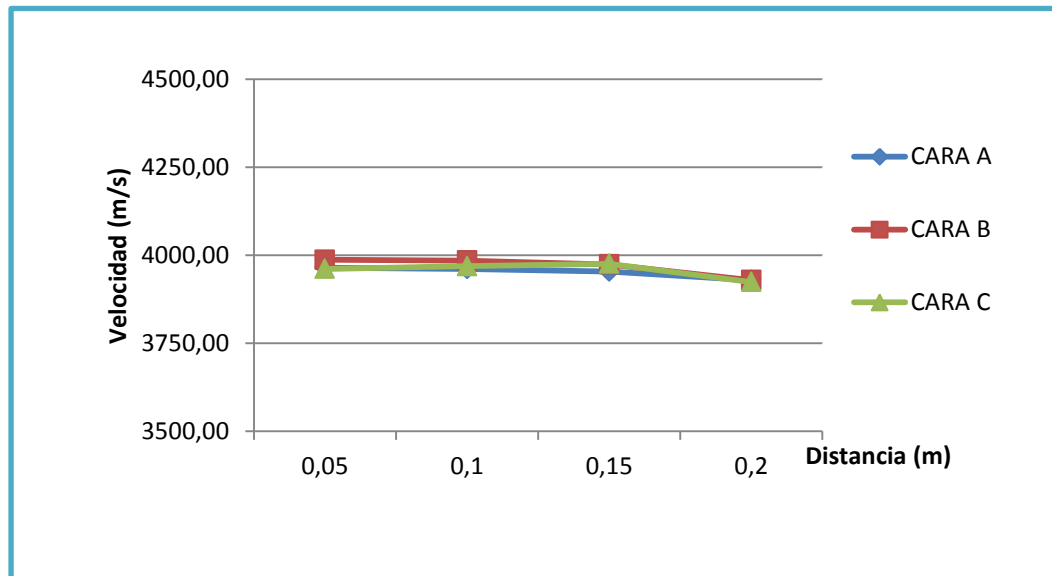
Fuente: Autores del Proyecto

Gráfica 1 Velocidad de pulso promedio de las probetas con relación a/c 0.5 antes de la inmersión en biodiesel



Fuente: Autores del Proyecto

Gráfica 2 Velocidad de pulso promedio de las probetas con relación a/c 0.45 antes de la inmersión en biodiesel



Fuente: Autores del Proyecto

Como se puede observar en la gráfica 1 la velocidad de pulso ultrasónico en las 20 probetas con relación a/c 0.5, presenta un comportamiento casi constante en todas las caras. Para esta relación a/c se obtuvo velocidades de pulso entre 3670 a 3750 m/s, con diferencia de valores menor al 2.7% lo cual confirma la uniformidad y calidad en las probetas con dicha relación.

Para la gráfica 2 se observó que el promedio de la velocidad de pulso para las 20 probetas restantes con relación a/c 0.45, presenta un comportamiento similar a la gráfica anterior pero con la diferencia de que se obtuvo velocidades en el rango de 3950 a 4000 m/s, obteniendo diferencia de valores menores al 1.2%, indicando homogeneidad en las tres caras y una buena calidad del hormigón de dichas probetas.

De lo anterior se comprueba que las probetas con relación a/c 0.45 tienen mejor calidad, debido a la menor porosidad existente, reflejada en los tiempos de vuelo más cortos, lo cual indica una menor dispersión de la onda.

4.2.3 Ensayo de gravimetría. Para obtener el porcentaje de absorción, se realizó el procedimiento planteado en la Norma NTC-5653 [32], para este ensayo se utilizaron quince probetas de cada relación estudiada, es decir tres probetas por cada periodo de inmersión.

Las Tablas 14 y 15 nos muestran los pesos obtenidos antes de la inmersión de algunas probetas, para cada una de las relaciones a/c trabajadas. En el Anexo B se pueden apreciar de manera detallada los pesos de todas las probetas elaboradas para cada relación a/c antes de los periodos de exposición.

Tabla 14. Pesos obtenidos de algunas probetas para la relación a/c 0.5

No Probeta	Relación a/c	Peso (gr)
4	0.5	17722
5	0.5	17720
6	0.5	18302
1	0.5	17472
2	0.5	17724
3	0.5	17824
7	0.5	17860
8	0.5	17454
9	0.5	17630
10	0.5	18080
	Promedio	17779

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla15. Pesos obtenidos de algunas probetas para la relación a/c 0.45

No Probeta	Relación a/c	Peso (gr)
24	0.45	18152
25	0.45	18496
26	0.45	18002
21	0.45	18484
22	0.45	17820
23	0.45	18602
27	0.45	17488
28	0.45	18170
29	0.45	18092
30	0.45	18544
	Promedio	18185

Fuente: Autores del Proyecto

Comparando las Tablas 14 y 15, y observando el promedio de cada una de ellas, se puede notar que el valor promedio del peso para la relación a/c 0.5 es menor que el valor obtenido para la relación a/c 0.45, confirmando esto la mayor presencia de poros para la mezcla con relación a/c 0.5. Por otra parte se aprecia para cada relación a/c, poca variabilidad en los pesos, indicando homogeneidad en las muestras.

Como se indicó anteriormente, los datos obtenidos son necesarios para calcular el porcentaje de absorción para cada una de las probetas expuestas.

4.2.4 Ensayo de resistencia a la compresión. Para esta prueba, se evaluaron tres probetas por cada relación a/c con cero días de exposición. Se ensayaron

estas seis probetas patrones con el fin de tener valor de referencia y así poder comparar los valores obtenidos antes y después de la inmersión.

Los valores logrados en esta etapa se observan en las Tablas 16 y 17. En el anexo C se podrán observar las resistencias obtenidas para cada una de las probetas con su respectivo tiempo de inmersión. Comparando los valores obtenidos con las resistencias teóricas calculadas en el diseño de mezcla, se observa que estos promedios son aproximados a los teóricos, reafirmando los buenos cálculos del diseño de mezcla y la buena elaboración de las probetas para cada una de las relaciones trabajadas.

Tabla 16. Valores de carga y resistencia a la compresión para las probetas con relación a/c 0.5

No Probeta	Relación a/c	CARA	CARGA (KN)	RESIST. (Mpa)
15	0.5	C	961,05	24,03
16	0.5	C	1010,08	25,25
20	0.5	A	931,63	23,29
		Promedio	967,59	24,19

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 17. Valores de carga y resistencia a la compresión para las probetas con relación a/c 0.45

No Probeta	Relación a/c	CARA	CARGA (KN)	RESIST. (Mpa)
38	0.45	C	1078,73	26,97
39	0.45	C	1088,54	27,21
40	0.45	C	1059,12	26,48
		Promedio	1075,46	26,89

Fuente: Autores del Proyecto

4.3 EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE LA INMERSIÓN EN ACEITE.

En esta etapa del proyecto se extrajeron las probetas según la distribución que se presentó en el capítulo anterior (3, 7, 15, 45 y 75) días. A medida de que éstas se fueron retirando de la exposición, se fue realizando el procedimiento planteado en la metodología.

4.3.1 Inspección visual. La inspección visual se realizó a medida que las probetas fueran cumpliendo su tiempo de exposición. Este ensayo permitió verificar la condición superficial de las mismas, así como establecer la presencia de algún daño en alguna de ellas.

En la Figura 17 se observa el estado superficial de dos probetas que con un tiempo de exposición de 45 días y con relaciones de a/c de 0.5 y 0.45.

Figura 17. Estado superficial de dos probetas con un tiempo de exposición de 45 días y con relaciones a/c 0.5 y 0.45



a) Relación a/c 0.5



b) Relación a/c 0.45

Fuente: Autores del Proyecto

Como se puede observar en la Figura 17, la relación a/c 0.5 presentó una coloración mas clara que la relación a/c 0.45; la diferencia de coloración se dió posiblemente a que la relación a/c 0.5 tubo una mayor penetración debido a la mayor presencia de poros, distribuyendo la mayoría del biodiesel absorbido en su estructura interna. La relación a/c 0.45 adquirió una tonalidad mas oscura ya que la zona afectada por la absorción del biodiesel fue la superficial, esto se dio gracias a que el hormigón elaborado posee un menor número de poros a diferencia de la otra relación. Adicionalmente no se observó ninguna presencia de grietas o imperfecciones sobre la superficie de las probetas expuestas.

Se tomaron nuevamente las longitudes en todas las caras, los valores obtenidos no mostraron ningún cambio dimensional.

4.3.2 Velocidad de pulso ultrasónico. Una vez se terminó el procedimiento de extracción de las probetas y realizada su inspección visual se continúo con la toma de velocidad de pulso llevaba a cabo antes de realizar un secado por 5 días. Se aclara nuevamente que las tomas de tiempo de vuelo se realizaron solamente en las caras B y C ya que estas fueron las que estuvieron en contacto directo con el Biodiesel.

En la Tabla 18 y 19, y las gráficas 3 y 4 se observa los valores promedios totales obtenidos para cada tiempo de inmersión antes y después de los cinco días de secado. En el anexo D se observa de manera más detallada las velocidades obtenidas para cada una de estas muestras.

Tabla 18. Valores promedios totales para la relación a/c 0.5

Relación a/c 0.5		
Tiempo de Exposición	Antes de secado (m/s)	Después de secado (m/s)
3	3724,93	3674,49
7	3812,47	3789,42
15	3864,56	3931,69
45	3965,98	3879,66
75	4040,90	4005,65

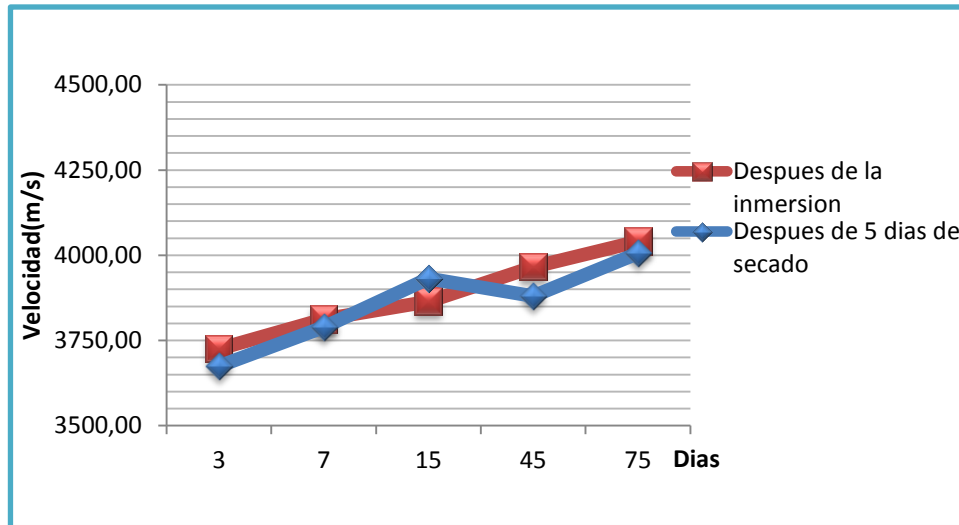
Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 19. Valores promedios totales para la relación a/c 0.45

Relación a/c 0.45		
Tiempo de exposición	Antes de secado (m/s)	Después de secado (m/s)
3	4025,97	3900,85
7	4094,22	4014,26
15	4054,37	4068,97
45	4232,23	4166,53
75	4225,88	4184,12

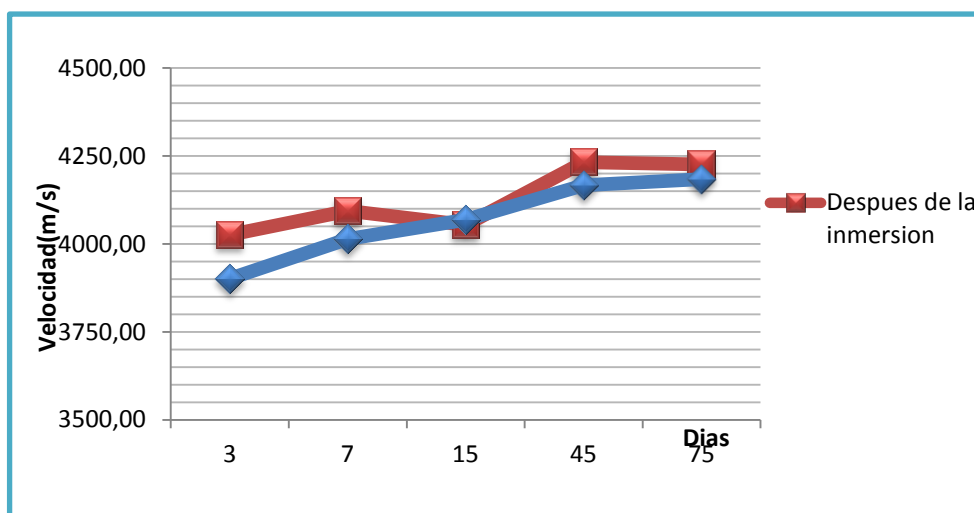
Fuente: Autores del Proyecto

Gráfica 3 Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico respecto al tiempo de inmersión y tiempo de secado en las probetas con relación a/c 0.5



Fuente: Autores del Proyecto

Gráfica No. 4 Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico respecto al tiempo de inmersión y tiempo de secado en las probetas con relación a/c 0.45



Fuente: Autores del Proyecto

En las gráficas 3 y 4 se observa el comportamiento de las probetas de relación a/c 0.5 y 0.45 frente a los tiempos de inmersión. Las velocidades de pulso obtenidas después de la inmersión, en las probetas con relación a/c 0.5 (gráfica 3) muestran incremento a medida que va aumentando los días de inmersión, mostrando que existe mayor absorción de biodiesel en el hormigón gracias a la presencia de poros. Lo anterior se presenta debido a que los poros se llenan de biodiesel, permitiendo el viaje del haz sonoro dentro del material (se presenta menor dispersión de la onda).

Los mayores valores de la VPU indica un mejoramiento en las propiedades mecánicas de las probetas según la revisión bibliográfica hecha [10].

Por otra parte las velocidades de pulso después de cinco días de secado para la relación a/c 0.5 (gráfica 3) adquirieron un comportamiento similar a las velocidades obtenidas inicialmente.

Aunque se presenta una pequeña disminución entre el periodo de inmersión de quince días (3931,69 m/s) y cuarenta y cinco días (3879,66 m/s), que porcentualmente representa una disminución del 1.34 % en la VPU, esta disminución puede significar un daño que se originó entre los periodos de exposición citados. Este cambio podría alterar los resultados de resistencia a la compresión obtenidos.

Los valores máximos obtenidos en la relación a/c 0.5 antes y después de los cinco días de secado fueron: 4040,90 m/s antes y de 4005,65 m/s para después del secado. Con respecto a los valores iniciales de VPU (probetas 0 días de exposición) se presentó un aumento del 8.1% y 7.2% respectivamente en los valores calculados, con una disminución en el proceso de secado del 0.9%.

En la gráfica.4, se presenta el comportamiento propio que siguieron las probetas con la relación a/c 0.45 durante los periodos de exposición y después del tiempo

de secado especificado anteriormente. La tendencia que se obtuvo para este hormigón fue muy similar a la de la gráfica.3 aunque los valores de esta relación fueron mayores que a la de la relación a/c 0.5. Se aprecia que los valores de VPU antes del secado entre siete y quince días de inmersión, el hormigón presentó un mínimo de velocidad de pulso, debido posiblemente a que no se generó una saturación en los poros, tomando valores muy similares a las velocidades de pulso obtenidas antes de la exposición.

Para los valores de VPU después del tiempo de secado en la relación a/c 0.45 (Figura 4), se observa un aumento continuo durante todos los tiempos. Con base en los valores de velocidad de pulso obtenidos, se puede afirmar que durante los periodos de exposición no se presentó ningún daño en las probetas.

Los valores máximos obtenidos para la relación a/c 0.45 fueron: 4225,88 m/s antes y 4184,12 m/s después del tiempo de secado, comparados con los valores de VPU iniciales, se obtuvo un aumento del 6.6 % y 5.5% respectivamente. Estos valores nos indican que con el proceso de secado hubo una disminución en los valores de VPU para la relación de a/c 0.45 del 0.9%.

En general, ambas relaciones a/c trabajadas presentaron una continua absorción de biodiesel durante los tiempo de exposición. Adicionalmente se pueden comparar los porcentajes de aumento antes del secado, los cuales fueron: 8.1% para la relación a/c 0.5 y 6.6% para la relación a/c 0.45. Observando que la relación mayor (0.5), presenta un mayor aumento en los valores de VPU con respecto a la relación a/c 0.45; indicándonos una mayor absorción gracias a la mayor presencia de porosidad en las probetas ensayadas.

4.3.3 Ensayo de gravimetría. Para esta prueba se tomaron nuevamente los pesos antes y después del secado con el fin de verificar de que si se dio un secado sobre las probetas ensayadas. Siguiendo el procedimiento de la norma

NTC 5653 [32], se debe tener en cuenta para calcular el porcentaje de absorción del concreto el peso antes de los cinco días de secado.

En las Tablas 20 y 21, se presenta algunos pesos de las probetas inmersas con su respectivo número de probeta, relación a/c y tiempo de exposición. En el Anexo B se encuentran los pesos de cada una de las probetas ensayas, con su peso inicial y su peso antes del secado.

Tabla 20. Pesos de algunas probetas expuestas antes y después del secado con relación a/c 0.5

No. Probeta	Relación a/c	Tiempo de Inmersión	Peso antes de secado (gr)
4	0.5	7 días	17800
5	0.5	7 días	17802
6	0.5	7 días	18400
7	0.5	45 días	17966
8	0.5	45 días	17574
9	0.5	45 días	17788

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 21. Pesos de algunas probetas expuestas antes y después del secado con relación a/c 0.45

No. Probeta	Relación a/c	Tiempo de Inmersión	Peso antes de secado (gr)
24	0.45	7 días	18212
25	0.45	7 días	18550
26	0.45	7 días	18060

Tabla 21 (Continua)

27	0.45	45 días	17548
28	0.45	45 días	18238
29	0.45	45 días	18152

Fuente: Autores del Proyecto

Siguiendo norma NTC 5653 [32], se calculó el porcentaje de absorción basándose en los pesos obtenidos durante este trabajo de investigación. Los resultados de este ensayo se presentan en las Tablas 22 y 23, y la Gráfica 5. En el Anexo B se podrán encontrar los porcentajes de absorción para cada probeta expuesta.

Tabla 22. Promedios de porcentaje de absorción en probetas con relación a/c 0.5

Tiempo exposición	Porcentaje de Absorción (%)
0	0
3	0,249
7	0,571
15	0,665
45	0,726
75	0,823

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 23. Promedios de porcentaje de absorción en probetas relación a/c 0.45

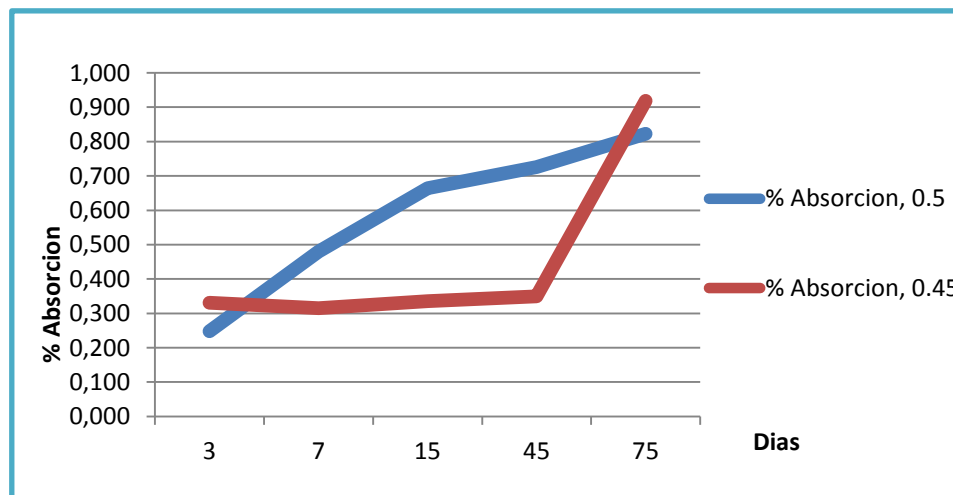
Tiempo exposición	Porcentaje de Absorción (%)
0	0

Tabla 23. (Continua)

3	0,331
7	0,315
15	0,336
45	0,350
75	0,919

Fuente: Autores del Proyecto

Gráfica No. 5 Promedio de porcentaje de absorción vs Tiempo de inmersión, para las relaciones a/c 0.5 y 0.45



Fuente: Autores del Proyecto

Como se observa en la Tabla 22, los porcentajes de absorción para la relación 0.5 adquieren un comportamiento creciente uniforme para los tiempos de exposición establecidos, indicando la presencia de zonas porosas debido al continuo aumento del porcentaje absorción.

Para la relación a/c 0.45 (Tabla 23) se obtuvo un comportamiento casi constante de forma lineal hasta el día 45, tiempo a partir del cual se observó un aumento significativo del porcentaje de absorción. Lo anterior se debe posiblemente a las características de compactación de la muestra, por la cual se mantuvo constante el porcentaje de absorción hasta los 45 días de exposición, tiempo a partir del cual se logro el ingreso significativo del hidrocarburo al concreto. Es importante destacar que el aumento se presentó en las tres probetas correspondientes a este tiempo de exposición.

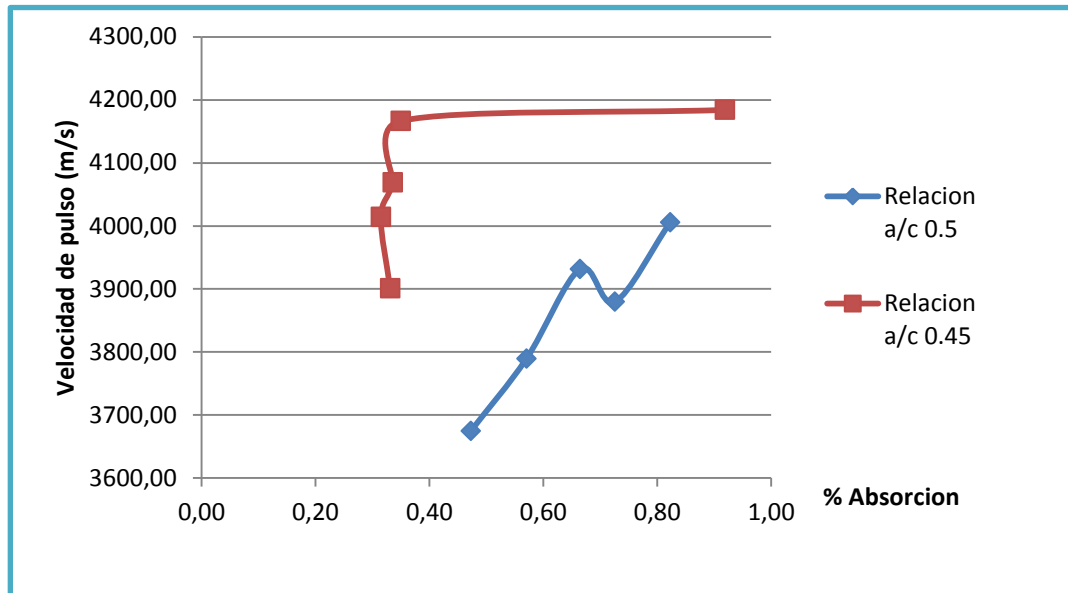
El gráfico 5 representa los promedios obtenidos en las Tablas 22 y 23, mostrando el comportamiento indicado anteriormente.

En cuestión de calidad, la relación a/c 0.45 mostró un mejor comportamiento ya que los porcentajes de absorción obtenidos en este ensayo no cambiaron significativamente con respecto a los de la otra relación a/c, presentando una mejor compactación y baja permeabilidad hasta el día 45.

A continuación en la gráfica 6, donde se muestran los valores promedios calculados en VPU para cada relación a/c y los porcentajes de absorción obtenidos, con el fin de poder observar la relación que tiene estos dos factores.

A partir de la observación de la gráfica 6 se puede decir que la relación a/c de 0.45 presenta aumento de los valores de VPU a medida que se aumenta el porcentaje de absorción, también presenta mejor homogeneidad con respecto al perfil observado para las probetas de relación a/c 0.5. En segundo lugar las probetas con relación 0.5, también mostraron un perfil en aumento, pero a diferencia de las probetas de relación a/c 0.45 se observó un cambio entre 0.66 a 0.73 % de absorción (entre 15 y 45 días de inmersión) los cuales fueron también observados en la gráfica 3 (VPU vs tiempo inmersión 0.5), lo cual posiblemente es debido a que ocurrió algún cambio en alguna de las tres probetas expuestas en este periodo de inmersión.

Gráfica No. 6 Velocidad de pulso ultrasónico con respecto al porcentaje de absorción en las probetas con relación a/c 0.5 y 0.45



Fuente: Autores del Proyecto

En general ambas relaciones a/c durante este tiempo de inmersión presentaron un comportamiento directamente proporcional, es decir que los valores de VPU aumentaron a medida de que el porcentaje de absorción aumentaba, esto se da debido a un llenado continuo de los poros capilares y a una menor dispersión de la onda sonora. Los resultados obtenidos en este ensayo fueron acordes con lo expresado por *Faiyadh* [10].

4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión. Para la resistencia a la compresión se tuvieron en cuenta 18 probetas para cada relación a/c para un total de 36 probetas, es decir que se realizaron 3 ensayos por cada tiempo de inmersión. La carga se aplicó en la cara A con el objetivo de mantener la posición en la cual se sumergieron las probetas.

En las Tablas 24 y 25 se presentan algunos valores de la resistencia a la compresión de algunas muestras, al igual que la cara a la cual fue aplicada la carga. En el anexo C se presentan la resistencia a la compresión de cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 24. Valores de la resistencia a la compresión de algunas probetas con relación a/c 0.5

No. Probeta	Relación a/c	Tiempo de Inmersión	Cara	Carga (KN)	Resist. Comp. (Mpa)
13	0.5	3 días	A	1039,50	25,99
14	0.5	3 días	A	1010,08	25,25
18	0.5	3 días	A	1029,70	25,74
10	0.5	75 días	A	1451,38	36,29
11	0.5	75 días	A	1480,80	37,02
12	0.5	75 días	A	1441,58	36,04

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 25. Valores de la resistencia a la compresión de algunas probetas con relación a/c 0.45

No. Probeta	Relación a/c	Tiempo de Inmersión	Cara	Carga (KN)	Resist. Comp. (Mpa)
33	0.45	3 días	A	1127,76	28,19
35	0.45	3 días	A	1068,92	26,72
37	0.45	3 días	A	1078,73	26,97
30	0.45	75 días	A	1608,29	40,21
31	0.45	75 días	A	1667,13	41,68
32	0.45	75 días	A	1578,87	39,47

Fuente: Autores del Proyecto

Se presentan los valores de la resistencia a la compresión (Ver Tabla 24 y 25) de las probetas que fueron expuestas en el primer tiempo de exposición (3 días) y en el último tiempo de exposición (75 días) con el objetivo de observar los cambios ocurridos. Para la relación a/c 0.5 se obtuvo un porcentaje de aumento del 42.07% y para la relación a/c 0.45 de 48.22%, con respecto a las resistencias de concreto con exposición de tres días. Estos porcentajes de aumento se dieron posiblemente, al llenado de los poros en ambas mezclas por el biodiesel y a la viscosidad del mismo.

El mayor aumento en la resistencia se dio en la relación a/c 0.45 con respecto a la de la otra relación a/c trabajada, indicando que la mezcla de relación a/c 0.45 es de mejor calidad, porcentaje de absorción menor, pero el mejoramiento de la resistencia a la compresión es mayor. Estos resultados van acorde a la bibliografía consultada.

En la tabla 26 y gráfica 7 se aprecian los valores promedios de resistencia a la compresión de cada uno de los tiempos de inmersión con su respectiva relación a/c.

Tabla 26. Valores promedios de resistencia a la compresión para cada tiempo de inmersión en cada relación a/c

PROMEDIO RESISTENCIA A LA COMPRESION (Mpa)		
Tiempo expo.	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.45
0	24,19	26,89
3	25,66	27,30
7	29,42	31,30

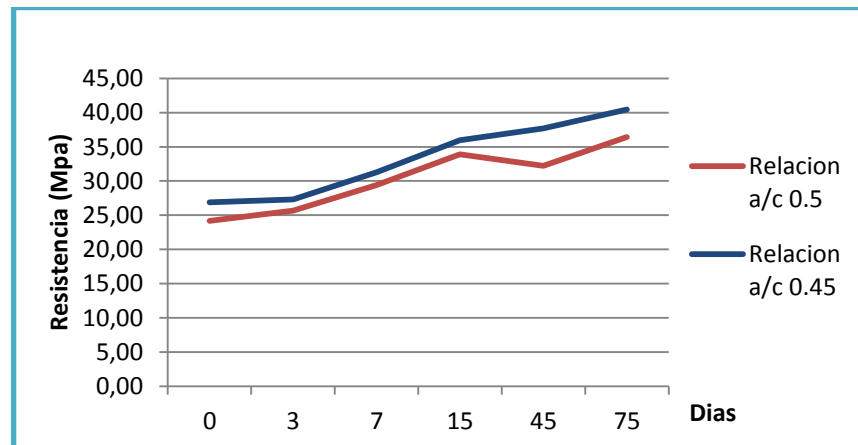
Tabla 26(Continua)

15	33,92	35,96
45	32,20	37,67
75	36,45	40,45

Fuente: Autores del Proyecto

De la observación de la tabla 26 se puede decir que a medida que los tiempos de inmersión a los cuales las probetas estuvieron expuestas al biodiesel; fueron cambiando, presentándose una modificación en su resistencia a la compresión para ambas relaciones de a/c.

Gráfica No. 7 Valores promedios de la resistencia a la compresión de cada relación a/c Vs Tiempo de inmersión



Fuente: Autores del Proyecto

Para la relación a/c 0.5, la gráfica 7 presenta un aumento continuo de la resistencia a la compresión hasta el periodo de inmersión de 15 días. Después de este periodo se observó una disminución 33,92 Mpa a 32,20 Mpa. Esta disminución también se observó en los resultados de velocidad de pulso

ultrasónico para esta relación a/c y en el mismo periodo de tiempo (15 días), este decrecimiento se dió probablemente a que una de las tres probetas ensayas para este periodo no presento buena homogeneidad, disminuyendo la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión. Para el periodo de 45 días y 75 días se observó nuevamente la tendencia de aumento.

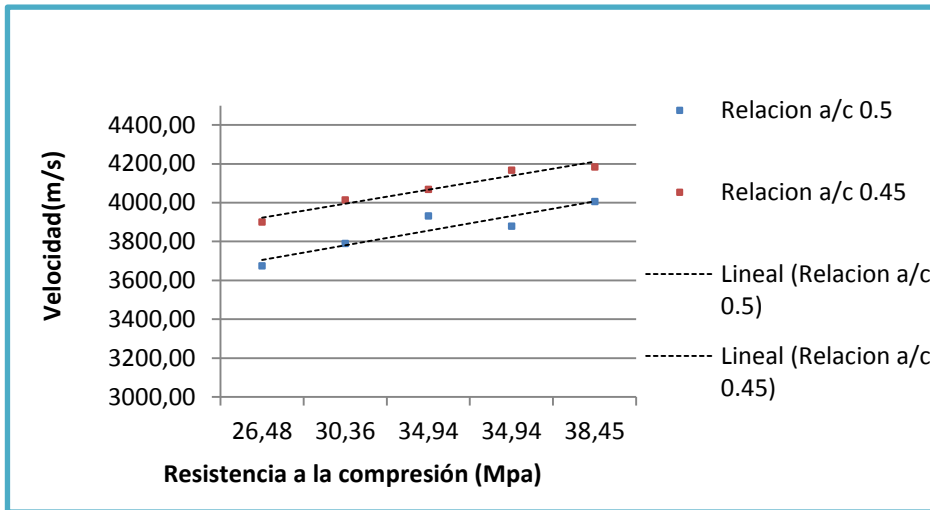
La relación a/c 0.45 presentó un perfil de aumento (gráfica 7) durante todos los periodos de exposición, este hormigón mostró un mejor comportamiento frente al contacto directo con el biodiesel. La razón por la cual el hormigón mostró una mejor calidad fue debido a que esta relación a/c obtuvo una mayor compactación con un menor porcentaje de absorción en comparación con la otra mezcla trabajada (relación a/c 0.5).

En general, la gráfica 7 presenta el comportamiento seguido por las probetas durante el tiempo de investigación, en el cual presentaron un perfil en aumento en la resistencia a la compresión, mostrando un mejoramiento en esta propiedad mecánica, y esto está acorde con lo reportado en la bibliografía, en donde se indica que a tiempo de exposición menor a 200 días, la respuesta en el concreto es un aumento en sus propiedades mecánicas [11].

El mejoramiento de esta propiedad durante el tiempo de exposición para las relaciones a/c trabajadas se dio por la saturación de los poros con biodiesel, y aunque se realizó un secado por 5 días, se mantuvo la absorción de biodiesel logrando una mayor compactación del hormigón y aumentando los valores de la resistencia a la compresión.

En la siguiente gráfica 8 muestra la relación entre la VPU y la resistencia a la compresión para las muestras de concreto con diferentes relaciones a/ inmersas en el biodiesel.

Gráfica No. 8 Relación de los valores de VPU y resistencia a la compresión



Fuente: Autores del Proyecto

A partir de los datos obtenidos de la resistencia a la compresión y VPU, utilizando el programa Microsoft Excel, se realizó un análisis de los datos y se determinó la correlación seguida por estas variables.

El modelo obtenido para la relación a/c 0.45 es de tipo lineal con un coeficiente de correlación de 0,9566, para la relación a/c 0.5 se obtuvo un modelo de tipo lineal con un coeficiente de correlación de 0,8573.

La ecuación de la línea de tendencia para la relación a/c 0.45 es la siguiente:

$$\text{Resistencia a la Compresión} = y = 71,882x + 3851,3 \quad R^2 = 0,9566$$

La ecuación de la línea de tendencia para la relación a/c 0.5 es la siguiente:

$$\text{Resistencia a la Compresión} = y = 75,257x + 3630,4$$

$$R^2 = 0,8573$$

X = Velocidad de pulso para ambas ecuaciones.

CONCLUSIONES

A partir de la investigación realizada y, de los datos obtenidos antes y después de los periodos de exposición a un hidrocarburo o derivado de este, las mezclas de concreto con relaciones a/c 0.5 y 0.45, curado en condiciones estándar de temperatura y secado al aire se puede concluir que:

La investigación permitió verificar que para ambas relaciones a/c trabajadas el porcentaje de absorción aumento al incrementar el tiempo de exposición, siendo mayor este efecto en las muestras de mayor relación a/c, lo cual se dió por la mayor presencia de poros presentes en estas muestras.

La velocidad de pulso ultrasónico aumentó a medida que se incrementó el tiempo de exposición y el porcentaje de absorción de biodiesel. Esto sucedió debido al llenado de los poros presentes en las muestras, lo cual disminuyó el tiempo de vuelo de la onda sonora y aumentando su VPU.

En cuanto a la resistencia a la compresión se presentó un aumento gradual asociado con el tiempo de inmersión y el porcentaje de absorción de hidrocarburo, lo cual contribuyó al mejoramiento de la compactación de la muestra y por lo tanto sus propiedades mecánicas.

Se encontró una correlación entre la VPU y la resistencia a la compresión de las muestras analizadas. Para la relación 0.5 se encontró la correlación de tipo lineal: $y = 75,257x + 3630,4$ con un coeficiente de correlación de: **0,8573**. Y para la relación a/c 0.45 se encontró la correlación de tipo lineal: $y = 71,882x + 3851,3$ con un coeficiente de correlación de: **0,9566**.

6. RECOMENDACIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación se hacen las siguientes recomendaciones:

Continuar con los estudios de evaluación de VPU en concreto expuestos a hidrocarburos pero dejando las probetas con un mayor tiempo de exposición para poder notar los cambios que ocurren.

Realizar estudios de VPU y resistencia a la compresión en concretos con refuerzo para poder observar y analizar los cambios que ocurren tanto en la estructura como en algunas de sus propiedades.

Poder realizar la mezcla en un solo día, con el fin de que las probetas de concreto con igual relación agua-cemento sean lo más homogéneas posibles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CEMEX COLOMBIA < Disponible en http://www.cemexcolombia.com/np/np_ce.html > Visitado en Agosto de 2011
- [2]. SANCHEZ DE GUZMAN Diego; MUÑOZ MUÑOZ Harold Alberto; Tecnología y Propiedades Colección básica del concreto. Volumen I, Bogotá 2004.
- [3]. Diseño y Control de Mezclas de Concreto.1^a Edición, 2004, Capítulo 5, páginas de 103- 134
- [4]. GONZALEZ-ISABEL, Germán. Hormigón de alta resistencia. Madrid. 1993.
- [5]. INSTITUTO DEL CONCRETO. Concreto arquitectónico. Cómo obtener un buen acabado. Colección básica del concreto. Tomo 3. 2000
- [6].SANCHEZ DE GUZMAN Diego; Durabilidad y Patología del concreto segunda edición, Bogotá 2006.
- [7].FATTLY Adel Mohamed. Inyección de grandes grietas con resina epoxi. España 1996.Trabajo de grado (Ingeniería Civil).Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior.
- [8].RamziB.Abdul-Ahad, Azad A.Mohammed, Engineering Journal of the University of Qatar, “Compressive and Tensile Strength of Concrete Loaded and Soaked in Crude Oil”, Irap, Vol 13, 2000

[9].Orwin G. Maxson, Gary D. Achenbach, Properties of Concrete in Contact with Pressured Hydrocarbons and Seawater, Offshore Technology Conference, 3-6 May , Houston, Texas.

[10].International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 7, Issue 2, May 1985, Pages 115-131, F.I. Faiyadh.

[11].International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete Volume 5, Issue 4, November 1983, Pages 277-282, M.A. Matti.

[12].A.W. Hago, H.F. Hassan *, A. Al Rawas, R. Taha, S. Al-Hadidi, Characterization of concrete blocks containing petroleum-contaminated soils, 2006.

[13] ARIZA DIAZ, Diana Marcela; ATUESTA ESPARZA, Javier Andres; "EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO, TAMAÑO DE AGREGADO Y TIEMPO DE CURADO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO SIN REFUERZO", Trabajo para optar el título de ingeniero Metalúrgico; Area de Ensayos no Destructivos; Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación GIMAT; 2010.

[14]. ASOCRETO. Concreto arquitectónico como obtener un buen acabado. Primera reimpresión de la tercera edición 2007.

[15] ASTM C150 / C150M - 11 Standard Specification for Portland Cement. 1980.

[16] EL AGUA DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/?label=El%20Agua%20del%20Concreto> > Visitado en julio de 2011.

- [17] ICONTEC, NTC 174, Norma Técnica Colombiana, Concretos. Especificaciones para los Agregados para Concreto; 2000.
- [18] ICONTEC, NTC 121, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas; 1982.
- [19] SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 22.
- [20] ASTM C597 (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Significance and Use.
- [21] IAEA, GUIDEBOOK ON NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURES, Vienna, 2002. Pag 106-107
- [22] METODOS DE ENSAYOS ULTRASÓNICOS <Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6154/8/07.pdf> > Visitado en Julio de 2011.
- [23] ICONTEC, NTC 321, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil Y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas; 1982.
- [24] ASTM C1157 / C1157M - 10 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement; 1990
- [25] ICONTEC, NTC 92, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil Y Arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado; 1995.
- [26] ICONTEC, NTC 176. Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y Absorción del Agregado Grueso; 1995.

[27] ICONTEC, NTC 237, Norma Técnica Colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y Absorción de Agregados Fino; 1995.

[28] ICONTEC, NTC 77, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo Para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos; 2007.

[29] ICONTEC, NTC 78, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para Determinar por Lavado el Material que Pasa el Tamiz 75 μm en Agregados Minerales; 1995.

[30] ICONTEC, NTC 1377, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio; 1994

[31] ICONTEC, NTC 673, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto; 1994

[32] ICONTEC, NTC 5653, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido.

ANEXOS

ANEXO A. Cálculos para el diseño de mezcla

El método utilizado para el diseño de mezcla de esta investigación corresponde al método de Diseño A.C.I. (American Concrete Institute), y se utiliza para determinar los contenidos de la pasta de cemento (cemento, agua y aire incluido), y agregados fino y grueso.

A continuación se describe el procedimiento formal para el método de diseño de mezcla A.C.I.

I. Selección del Asentamiento

El asentamiento del concreto es una característica que relaciona la cantidad de agua total presente en la mezcla. Los valores del asentamiento indicados son los aplicados cuando la vibración se utiliza en la compactación del concreto. Las mezclas deben utilizarse con la mínima consistencia que permita una colocación eficiente.

Tabla 27. Asentamiento recomendado para concretos de diferentes grados de manejabilidad

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO [cm]	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
MUY SECA	0 - 2	Vigas prefabricadas de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
SECA	2 - 3.5	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.

SEMI SECA	3.5 - 5	Pavimentos con vibraciones normales. Fundiciones de concreto simple. Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración.
MEDIA	5 - 10	Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas, columnas, vigas y muros reforzados con vibración
HÚMEDA	10 - 15	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzo. Trabajar donde la colocación sea difícil. Nuevamente no es apropiado para compactarlo con demasiado.

Fuente. Tecnoconcreto S.A. Diseño de Mezclas

Según el objetivo de la investigación, se seleccionó un asentamiento de 5 a 10 tal y como se señala en la Tabla 27, teniendo en cuenta una consistencia media.

II. Selección del tamaño de agregado

Para la selección del tamaño máximo de agregado, se tiene en cuenta que en ningún caso el tamaño máximo deberá exceder de $1/5$ de la menor dimensión entre los lados de la formaleta, se estimó el tamaño máximo de agregado a utilizar igual a $3/8$ de pulgada (9.503 mm).

Tabla 28. Tamaños máximos de agregado según el tipo de construcción

Dimensión mínima de la sección (cm)	Muros reforzados, vigas y columnas. Plg (mm)	Muros sin refuerzos. plg	Losas muy reforzadas. plg	Losas sin refuerzo o poco reforzadas. plg
6 – 15	½”(12)–¾”(19)	¾”(19)	¾”(19)-11/2”(38)	¾”(19)-11/2”(38)
19 – 29	¾”(19)-11/2”(38)	11/2”(38)	11/2”(38)	11/2”(38)-3”(76)
30 – 74	11/2”(38)-3”(76)	3”(76)	11/2”(38)-3”(76)	3”(76)
75 o más	11/2”(38)-3”(76)	6”(152)	11/2”(38)-3”(76)	3”(76)- 6”(152)

Fuente. Tecnoconcreto S.A. Diseño de Mezclas

III. Estimación del contenido de agua

Para poder determinar la cantidad necesaria de agua a utilizar se debe tener en cuenta que esta última dentro de la mezcla de concreto cumple dos funciones: hidratar el cemento, y producir la fluidez necesaria. Por lo tanto, la estimación de esta cantidad está sujeta al tipo de asentamiento que se quiera producir y el tamaño máximo de agregado con el cual se va a trabajar.

La Tabla 28 señala las estimaciones del contenido de agua en la mezcla de concreto según el tamaño máximo de agregado fino y grueso, además del asentamiento con aire incluido y sin él.

Tabla 29. Agua en Kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
5 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire (%)	3	2.3	2	1,5	1	0.5	0,3

Fuente. Tecnoconcreto S.A. Diseño de Mezclas

Los cálculos obtenidos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de agua a utilizar fue de 225 Kg con una densidad de $1000,0 \text{ Kg/m}^3$ y un Volumen de $0,225 \text{ m}^3$.

IV. Determinación de la resistencia del diseño.

El concreto debe dosificarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión promedio lo suficientemente alta para minimizar la frecuencia de los resultados de pruebas de resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del concreto, etc.

V. Selección de la relación agua-cemento

Debido a la importancia que tiene la relación agua/cemento para el diseño de mezcla de concreto, su selección se fundamenta principalmente sus propiedades tales como resistencia, durabilidad y acabado superficial. Puesto que el valor de

resistencia a la compresión varía según sean los diferentes tipos de agregados y cementos a pesar de mantener la misma relación agua/cemento, se hace necesario estudiar variables fundamentales como: tamaño de agregado, textura superficial, forma, tiempo y tipo de curado o inclusión de algunos aditivos. Para esta investigación se eligió una relación agua-cemento igual a 0,45 y 0,5.

Tabla 30. Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y la relación agua/cemento.

Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm ²	Relación agua/cemento máxima permisible			
	Concreto sin inclusión de aire		Concreto con inclusión de aire	
	Relación absoluta por peso	litros por saco de cemento de 50 kg	Relación absoluta por peso	litros por saco de cemento de 50 kg
175	0,65	324	0,54	270
210	0,58	293	0,46	230
245	0,51	257	0,40	200
280	0,44	222	0,35	177
315	0,38	191	0,30	151
350	0,31	151	-	-

Fuente. Tecnoconcreto S.A. Diseño de Mezclas

VI. Estimación del contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene a partir de la relación agua cemento y del contenido de agua encontrado en el paso anterior.

Por medio de la siguiente ecuación: $b = \left(\frac{b}{b_0}\right) \times b_0$

Ecuación (1)

Según los cálculos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de cemento a utilizar fue de 450 Kg con una densidad de 3030,0 Kg/m^3 y un volumen de 0,1485 m^3 .

VII. Estimación del contenido de agregado grueso

Para determinar la cantidad de agregado grueso necesario para el diseño de mezcla, se tiene en cuenta la tabla 29. En ella encontramos el coeficiente b/b_0 en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino.

El coeficiente b/b_0 se define como la relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

Tabla 31. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO (mm)	VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO, SECO Y COMPACTADO CON VARILLA, POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO PARA DIFERENTES MÓDULOS DE FINURA DE LA ARENA			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44

13	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Tecnoconcreto S.A. Diseño de mezclas

Después de conocer el valor de b/b_0 , se procede a calcular el peso absoluto del agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Por medio de la expresión:

Siendo:

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

Ecuación (2)

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.

Podemos conocer el valor del volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Los cálculos obtenidos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de agregado grueso a utilizar fue de 825 Kg con una densidad de $2611,0 \text{ Kg/m}^3$ y un volumen de $0,3159 \text{ m}^3$.

VII. Estimación del contenido de agregado fino

El volumen de agregado fino a utilizar en la mezcla se calcula sumando el volumen de cada uno de los componentes (agua, agregado grueso y cemento en m^3), y luego restarlos con un metro cúbico (1 m^3) de concreto.

Por medio de la expresión:

$$V_{af} = 1000 - (V_a + V_c + V_{ag}) \quad \text{Ecuación (3)}$$

Siendo:

V_{af} = Volumen de agregado fino

V_a = Volumen de agua

V_c = Volumen de cemento

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

Entonces se procedió a recopilar los volúmenes encontrados en los anteriores cálculos para encontrar el volumen de 1 m^3 de agregado fino:

$$V_a = 0,225 \text{ m}^3 \quad V_c = 0,1485 \text{ m}^3 \quad V_{ag} = 0,3159 \text{ m}^3$$

Por medio de la ecuación (3):

$$V_{af} = 0,3106 \text{ m}^3$$

Los cálculos obtenidos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de agregado fino a utilizar fue de 835,78 Kg con una densidad de $2630,0 \text{ Kg/m}^3$ y un volumen de $0,3106 \text{ m}^3$.

En la Tabla 30, se recopila todos los datos anteriormente calculados y se expresa el diseño de mezcla calculado para 1 m^3 de concreto:

Tabla 32. Diseño de mezcla para 1 m^3 de concreto

CONSTITUYENTE	MASA (Kg)	DENSIDAD (Kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)
AGUA	1,8	1000,0	0,225
CEMENTO	3,6	3030,0	0,1485
AGREGADO GRUESO	6,6	2584,0	0,3159
AGREGADO FINO	6,68	2630,0	0,3106
TOTAL			1,0000

Fuente: Autores

Utilizando el diseño de mezcla mostrado en la Tabla 30, se realizó el cálculo exactamente para las probetas cúbicas con una relación a/c = 0,45.

ANEXO B ENSAYO DE GRAVIMETRÍA

A continuación se presentan las tablas que muestran detalladamente el número de la probeta con su periodo de exposición y los pesos obtenidos para cada una de ellas.

Tabla No 33. Valores de los pesos obtenidos, antes de la inmersión, después de la inmersión y después de 5 días de secado para las probetas de relación a/c 0.5

Relación a/c	Tiempo de exposición (días)	Peso Inicial (gr)	Peso después inmersión (gr)	Peso final 5 días (gr)
0.5	15 días	17472	17602	17599
0.5	15 días	17724	17860	17722
0.5	15 días	17824	17910	17908
0.5	7 días	17722	17800	17792
0.5	7 días	17720	17802	17798
0.5	7 días	18302	18400	18550
0.5	45 días	17860	17966	17962
0.5	45 días	17454	17574	17571
0.5	45 días	17630	17788	17784
0.5	75 días	18080	18220	18215
0.5	75 días	17930	18095	18091
0.5	75 días	18090	18230	18226
0.5	3 días	17996	18042	18042
0.5	3 días	18404	18450	18427
0.5	0 días	18254	-	-
0.5	0 días	17276	-	-
0.5	no expuestas	-	-	-

0.5	3 días	18039	18082	16801
0.5	no expuestas	-	-	-
0.5	0 días	18962	-	-

Fuente: Autores

Tabla No 34. Valores de los pesos obtenidos, antes de la inmersión, después de la inmersión y después de 5 días de secado para las probetas de relación a/c 0.45

Relación a/c	Tiempo de exposición (días)	Peso Inicial (gr)	Peso después inmersión (gr)	Peso final 5 días (gr)
0.45	15 días	18484	18542	18540
0.45	15 días	17820	17886	17878
0.45	15 días	18602	18662	18660
0.45	7 días	18152	18212	18204
0.45	7 días	18496	18550	18544
0.45	7 días	18002	18060	18056
0.45	45 días	17488	17548	17538
0.45	45 días	18170	18238	18232
0.45	45 días	18092	18152	18148
0.45	75 días	18544	18690	18686
0.45	75 días	18076	18225	18220
0.45	75 días	17826	18030	18026
0.45	3 días	18074	18134	18132
0.45	no expuestas	-	-	-
0.45	3 días	18236	18302	18300
0.45	no expuestas	-	-	-
0.45	3 días	18022	18076	18074
0.45	0 días	18276	-	-
0.45	0 días	18856	-	-
0.45	0 días	18092	-	-

ANEXO C. Valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión.

A continuación se presenta los valores obtenidos en el ensayo de la resistencia a la compresión para las mezclas trabajadas en este trabajo de investigación. En cada tabla se muestra el valor obtenido para cada probeta con su respectivo periodo de inmersión y la cara en la cual fue aplicada la carga.

Tabla No. 35 Valores de la carga aplicada y la resistencia a la compresión para las probetas relación a/c 0.5 en diferentes periodos de tiempo

No Probeta	Relación a/c	Tiempo de exposición (días)	RESISTENCIA A LA COMPRESION		
			CARA	CARGA (KN)	RESIST.(Mpa)
15	0.5	0 días	C	961,05	24,03
16	0.5	0 días	C	1010,08	25,25
20	0.5	0 días	A	931,63	23,29
13	0.5	3 días	A	1039,50	25,99
14	0.5	3 días	A	1010,08	25,25
18	0.5	3 días	A	1029,70	25,74
4	0.5	7 días	A	1176,80	29,42
5	0.5	7 días	A	1166,99	29,18
6	0.5	7 días	A	1186,60	29,67
1	0.5	15 días	A	1363,12	34,08
2	0.5	15 días	A	1343,51	33,59
3	0.5	15 días	A	1363,12	34,08
7	0.5	45 días	A	1412,16	35,30
8	0.5	45 días	A	1441,58	36,04
9	0.5	45 días	A	1010,08	25,25
10	0.5	75 días	A	1451,38	36,29
11	0.5	75 días	A	1480,80	37,02
12	0.5	75 días	A	1441,58	36,04

Fuente: Autores

Tabla No. 36 Valores de la carga aplicada y la resistencia a la compresión para las probetas relación a/c 0.45 en diferentes periodos de tiempo

No Probeta	Relación a/c	Tiempo de exposición (días)	RESISTENCIA A LA COMPRESION		
			CARA	CARGA (KN)	RESIST. (Mpa)
38	0.45	0 días	C	1078,73	26,97
39	0.45	0 días	C	1088,54	27,21
40	0.45	0 días	C	1059,12	26,48
33	0.45	3 días	A	1127,76	28,19
35	0.45	3 días	A	1068,92	26,72
37	0.45	3 días	A	1078,73	26,97
24	0.45	7 días	A	1304,28	32,61
25	0.45	7 días	A	1216,02	30,40
26	0.45	7 días	A	1235,64	30,89
21	0.45	15 días	A	1441,58	36,04
22	0.45	15 días	A	1421,96	35,55
23	0.45	15 días	A	1451,38	36,29
27	0.45	45 días	A	1510,22	37,76
28	0.45	45 días	A	1520,03	38,00
29	0.45	45 días	A	1490,61	37,27
30	0.45	75 días	A	1608,29	40,21
31	0.45	75 días	A	1667,13	41,68
32	0.45	75 días	A	1578,87	39,47

Fuente: Autores

ANEXO D. Velocidades promedio de pulso ultrasónico

A continuación se muestran las tablas donde se muestran las velocidades promedios de las caras B y C de las probetas con una relación a/c 0.5.

Tabla No. 37 Valores de velocidad promedio para las probetas con relación a/c 0.5 después de la inmersión y cinco días de secado

	FILA	Después de la inmersión			Después de 5 días de secado		
		Cara A	Cara B	Cara C	Cara A	Cara B	Cara C
13 - 3 días	1	3937,35	3986,64	3892,90	3858,89	3849,66	3842,11
	2	3934,21	3962,67	3846,97	3815,10	3854,04	3790,51
	3	3928,38	3965,37	3929,35	3865,93	3848,55	3798,10
	4	3921,83	3961,12	3866,69	3856,48	3870,44	3814,38
14 - 3 días	1	3951,75	4018,81	4043,61	3824,07	3766,03	3766,65
	2	3971,91	3961,48	3944,12	3862,08	3744,91	3719,52
	3	3952,98	3901,05	3915,35	3886,29	3732,60	3774,57
	4	3902,34	3925,15	3878,74	3802,23	3704,72	3742,67
18 - 3 días	1	3376,26	3204,24	3240,29	3333,78	3424,60	3374,55
	2	3301,63	3173,81	3198,84	3358,77	3351,73	3355,46
	3	3284,07	3295,97	3351,48	3394,39	3441,68	3488,70
	4	3272,72	3482,27	3451,28	3389,43	3603,94	3527,61
4 - 7 días	1	3796,66	3779,87	3877,03	3850,70	3774,23	3734,38
	2	3817,49	3703,79	3872,57	3872,05	3771,56	3726,51
	3	3866,18	3710,44	3924,16	3829,83	3771,71	3795,93
	4	3814,62	3813,35	3905,29	3781,58	3875,39	3829,25
5 - 7 días	1	3755,80	3758,56	3804,27	3748,32	3717,27	3850,36
	2	3656,55	3734,90	3752,34	3698,11	3670,93	3790,72
	3	3646,32	3758,99	3784,38	3655,39	3726,59	3854,74
	4	3586,18	3717,17	3712,91	3659,85	3694,40	3756,00

6 - 7 días	1	3836,40	3957,47	3844,30	3824,18	3912,66	3825,80
	2	3826,86	3889,16	3854,82	3778,04	3824,77	3826,78
	3	3799,81	3886,66	3850,88	3831,45	3864,14	3797,02
	4	3754,28	3797,97	3808,00	3775,58	3741,36	3813,52
1 - 15 días	1	3803,03	3869,13	3808,74	3793,07	3912,63	3884,92
	2	3790,59	3851,34	3810,54	3797,59	3959,60	3899,44
	3	3819,85	3862,65	3747,23	3761,83	3975,66	3919,35
	4	3756,92	3848,71	3716,81	3798,51	3918,06	3830,72
2 - 15 días	1	3750,16	3942,94	3846,56	3783,74	4020,69	3871,59
	2	3731,04	3972,36	3790,95	3790,78	4042,96	3869,80
	3	3808,85	4016,71	3787,47	3846,32	4058,29	3812,94
	4	3845,14	4035,20	3789,98	3861,79	3936,21	3802,78
3 - 15 días	1	3901,17	3894,69	3886,90	3940,58	3889,81	3981,29
	2	3841,23	3888,49	3873,93	3825,56	3934,47	3965,83
	3	3790,39	3910,45	3908,70	3793,69	4010,96	3986,06
	4	3744,97	3819,46	3869,46	3771,40	3953,81	3922,72
7 - 45 días	1	4017,51	3922,63	3944,03	3950,98	3913,80	3896,36
	2	3976,56	4020,36	4030,53	3933,05	3930,98	4004,65
	3	3951,75	4017,14	4029,16	3930,01	3950,17	4052,61
	4	3913,45	3937,14	4011,92	3837,21	3853,71	3917,08
8 - 45 días	1	3888,79	3893,79	3917,67	3831,62	3799,01	3796,99
	2	3889,17	3889,50	3970,23	3788,90	3846,02	3833,52
	3	3859,80	3888,63	3972,56	3801,35	3810,60	3861,96
	4	3818,27	3875,92	3851,71	3762,20	3782,45	3775,26
9 - 45 días	1	4012,93	4043,16	4029,17	3968,39	4015,29	3940,35
	2	3989,84	4009,40	4036,17	3977,65	3960,39	3757,27
	3	4047,44	4021,70	4039,66	3983,57	3919,35	3852,04
	4	3937,77	3927,94	3903,50	3888,70	3801,12	3840,88
10 - 75 días	1	4062,65	4127,33	4151,00	4017,36	4088,38	4111,82
	2	3982,86	4082,13	4045,44	3930,75	4046,03	4016,88
	3	4019,13	4097,81	4045,72	3972,52	4076,11	3996,59
	4	3946,86	4033,93	4018,34	3913,29	4009,60	3989,82
11 - 75 días	1	4081,97	4017,35	4062,88	3996,50	3996,29	4018,72
	2	3960,89	4069,05	4009,36	3925,44	4021,74	3959,54

	3	4016,74	4055,21	4015,54	3974,12	4018,25	3977,53
	4	3917,39	3886,97	4045,79	3889,39	3836,77	4011,10
12 - 75 días	1	3997,98	4032,02	4169,56	3961,43	4001,85	4127,94
	2	3970,15	4010,63	4069,49	3939,69	3981,89	4037,76
	3	3967,95	4016,48	4043,87	3923,92	3985,28	4002,60
	4	3939,57	3951,19	3924,49	3904,91	3923,45	3899,76

Fuente: Autores

Tabla No. 38 Valores de velocidad promedio para las probetas con relación a/c 0.45 después de la inmersión y cinco días de secado

	FILA	Después de la inmersión			Después de 5 días de secado		
		Cara A	Cara B	Cara C	Cara A	Cara B	Cara C
33 - 3 días	1	4042,67	4169,21	3953,07	4017,15	4005,92	3899,88
	2	4079,18	4112,90	3955,14	4057,19	3979,69	3858,70
	3	4052,12	4138,62	3948,01	4060,01	3966,64	3888,90
	4	3959,69	4094,07	4002,64	4012,55	3951,97	3920,57
35 - 3 días	1	4115,80	4183,34	4094,65	4018,58	4021,64	3926,90
	2	4104,99	4166,11	4043,29	4045,54	3970,87	3936,30
	3	4095,52	4142,80	4095,41	4049,53	3992,27	3961,95
	4	4062,11	4136,45	4066,32	3975,30	3971,40	3947,01
37 - 3 días	1	3968,10	3904,41	3842,85	3896,95	3812,90	3757,44
	2	3929,45	3972,31	3868,72	3851,23	3819,11	3756,51
	3	3878,86	4015,64	3851,86	3835,25	3899,53	3741,25
	4	3918,37	3947,59	3917,78	3773,51	3846,02	3787,02
24 - 7 días	1	4034,12	4119,33	4123,95	3993,07	4022,81	4015,77
	2	4028,22	4112,64	4061,55	3949,58	4025,77	4030,67
	3	3981,92	4111,53	4083,77	3933,41	4026,01	4059,57
	4	3959,82	4046,85	4083,46	3806,33	3921,36	3958,76
25 - 7 días	1	4018,30	4204,44	4189,19	4021,77	4169,11	4138,58
	2	4041,48	4119,14	4116,42	3977,54	4058,91	4107,78
	3	3970,92	4073,82	4044,07	3968,92	3999,33	4110,93

	4	3942,11	3943,79	3916,86	3934,51	3863,40	4028,66
26 - 7 días	1	4105,03	4095,78	4097,36	4040,72	3992,93	3985,49
	2	3982,95	4172,37	4096,12	3969,96	4001,85	3951,31
	3	3882,19	4167,86	4085,58	3945,88	3962,44	3959,28
	4	3799,96	4097,20	4098,20	3911,82	3965,18	3986,38
21 - 15 días	1	4047,00	4144,85	4064,25	4121,63	4143,81	4156,93
	2	4057,40	4076,36	4090,63	4079,95	4116,25	4192,63
	3	4062,18	4072,15	4117,93	4128,78	4151,53	4187,15
	4	4079,02	4055,64	4123,41	4119,64	4102,93	4164,18
22 - 15 días	1	4028,78	4102,49	3976,00	4075,03	4147,51	4007,78
	2	3996,19	4092,18	3969,46	3978,90	4116,16	4017,73
	3	4001,96	4113,88	4028,91	3987,97	4135,90	4053,55
	4	4016,15	4088,12	4009,11	4022,57	4044,20	4008,92
23 - 15 días	1	4580,12	3895,69	3908,13	3873,43	4040,18	4003,89
	2	3727,45	3878,33	3863,86	3851,79	3961,65	3973,45
	3	3752,04	3845,81	3843,91	3827,92	3944,82	3970,56
	4	3771,96	3770,19	3773,73	3826,25	3838,53	3849,97
27 - 45 días	1	4172,18	4082,02	4360,18	4160,58	3986,93	4349,90
	2	4273,60	4095,82	4371,91	4137,58	3926,18	4313,89
	3	4270,99	4104,18	4382,95	4140,80	4026,14	4373,19
	4	4182,77	4097,82	4373,94	4129,29	3926,48	4374,47
28 - 45 días	1	4207,83	4316,68	4063,48	4141,38	4214,87	4050,68
	2	4192,12	4355,00	4084,88	4038,58	4268,86	3962,32
	3	4160,27	4283,56	4077,68	4100,77	4232,13	4011,72
	4	4071,56	4338,83	3987,22	4065,32	4131,31	3926,71
29 - 45 días	1	4183,06	4190,83	4305,64	4083,37	4096,68	4244,46
	2	4113,73	4101,96	4327,22	4021,92	4099,75	4189,22
	3	4134,26	4127,77	4375,28	4077,63	4139,04	4209,72
	4	4073,98	4047,78	4230,99	4083,69	4061,47	4080,72
30 - 75 días	1	4307,02	4230,42	4148,63	4298,12	4145,61	4097,69
	2	4129,52	4226,46	4077,05	4108,34	4185,35	4041,08
	3	4200,04	4220,44	4083,90	4174,40	4176,16	4052,05
	4	4121,89	4285,18	4056,17	4069,79	4241,80	4034,14
31	1	4378,06	4211,21	4328,96	4336,23	4179,75	4277,06

- 75 días	2	4288,54	4173,92	4201,76	4257,42	4133,10	4161,25
	3	4339,86	4162,57	4212,71	4302,11	4124,23	4174,54
	4	4245,40	4166,26	4131,98	4223,94	4130,04	4106,52
32 - 75 días	1	4263,10	4253,59	4386,61	4216,03	4213,25	4351,73
	2	4155,08	4272,46	4389,06	4119,84	4242,27	4348,26
	3	4128,95	4263,98	4377,20	4090,91	4210,23	4309,70
	4	4095,22	4201,87	4358,82	4060,90	4167,79	4315,33

Fuente: Autores