

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO EN PRESENCIA DE NITRATOS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Velezmoro C, Ana C.
Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO EN PRESENCIA DE NITRATOS

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. Henry Blanco

Prof. Cesar Peñuela

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Br. Velezmoro C, Ana C.

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2013

DEDICATORIA

A mi mamá.

“La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo.”

Nelson Mandela

Velezmoro C, Ana C.
PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO EN PRESENCIA DE
NITRATOS

Tutores Académicos: Prof. Henry Blanco

Prof. Cesar Peñuela

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2013.

Palabras claves: Agua de mezclado, Nitratos, Potasio, Propiedades físicas del concreto.

RESUMEN

El reuso del agua residual tratada para la elaboración de concreto ha sido estudiado en varios países, concluyendo que es posible obtener concreto de buena calidad. En Venezuela, los resultados no fueron los esperados, ya que la resistencia a compresión entre la mezcla utilizando agua residual tratada y agua potable no cumplió con la norma COVENIN 2385-00. Al comparar los parámetros del agua en los distintos trabajos, se detectó que el nitrato era el constituyente diferente que contenía el agua de mezclado.

Por esta razón se planteó este trabajo dirigido a verificar si el comportamiento del concreto se modifica por la presencia de nitratos en el agua de mezclado. Para ello se agregó nitrato de potasio al agua potable, reproduciendo la concentración de nitratos que se encontraban en el agua residual tratada. Vale destacar que también se incrementó el contenido de potasio en esta agua de mezclado.

A las 2 mezclas y 40 probetas de concreto preparadas con nitratos en el agua y con agua potable, le fueron realizados ensayos de: tiempo de fraguado, absorción, erosión, peso unitario, ultrasonido y resistencia a la compresión a 7, 14, 28 y 90 días; con el fin de caracterizar las propiedades físicas del concreto.

Se concluye que la única propiedad del concreto que se modifica por la presencia de nitratos y/o potasio en el agua de mezclado es la resistencia a la compresión, con una diferencia del 15% aproximadamente, superior al 10% establecido en la Norma. La trabajabilidad, durabilidad y homogeneidad del concreto no presentaron diferencias relevantes, por lo que se recomienda realizar ajustes en el diseño de mezcla cuando se esté en presencia de nitratos y potasio en el agua de mezclado, en concentraciones superiores a 10 y 18 mg/l respectivamente, para asegurar la resistencia a la compresión deseada en el concreto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Justificación	5
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Agregados	7
2.2 El cemento Portland	8
2.3 Agua para concreto	11
2.4 Hidratación del cemento	15
2.5 Propiedades del Concreto	18
2.6 Ataque químico al concreto	19
2.7 Los nitratos y el concreto	26
MÉTODO	31
3.1 Ensayos de agregados	31
3.1.1 Granulometría	32
3.1.2 Peso unitario	33
3.1.3 Densidad y absorción	34
3.2 Diseño de mezcla y probetas	35

3.3 Incorporación de nitratos al agua de mezclado	37
3.4 Preparación de las mezclas y realización de probetas	39
3.5 Ensayo a la pasta de cemento	42
3.6 Ensayos al concreto endurecido	43
3.6.1 Durabilidad del concreto	44
3.6.2 Ensayo de ultrasonido	45
3.6.3 Peso unitario	47
3.6.4 Ensayo de Resistencia a compresión	47
3.7 Comparación de los resultados obtenidos para ambas mezclas	49
RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
4.1 Características de los agregados	51
4.2 Diseño de mezcla	57
4.3 Análisis del agua utilizada para la realización de concreto	58
4.4 Ensayos realizados al concreto	59
4.4.1 Ensayo de tiempo de fraguado de la pasta de cemento	60
4.4.2 Ensayo de absorción en las probetas de concreto	63
4.4.3 Ensayo de erosión en las probetas elaboradas con agua potable y agua con nitratos	64
4.4.4 Ensayo de ultrasonido en las probetas de concreto	65
4.4.5 Peso unitario de las probetas de concreto	66
4.4.6 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Recomendaciones	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Compuestos principales del cemento.....	8
Tabla 2.2. Tipos de Cemento Portland.....	9
Tabla 2.3. Resumen de los parámetros y los límites adecuados al momento de utilizar un agua para la elaboración de mezclas de concreto.....	13
Tabla 3.1. Ensayos a los agregados	31
Tabla 3.2. Método analítico de las propiedades físicas y químicas del agua.	37
Tabla 3.3. Método analítico de los metales del agua.	37
Tabla 3.4. Método analítico de los constituyentes inorgánicos no metálicos del agua.	38
Tabla 3.5. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica	45
Tabla 3.6 Norma para el control del concreto, desviación estándar.....	49
Tabla 4.1. Granulometría del agregado grueso.....	51
Tabla 4.2. Granulometría del agregado fino.....	52
Tabla 4.3. Peso unitario de los agregados.....	54
Tabla 4.4. Peso Específico y Absorción de los agregados.....	55
Tabla 4.5. Dosificación de la mezcla de concreto.	56
Tabla 4.6. Caracterización del agua de mezclado.	57

Tabla 4.7. Tiempo de fraguado de mezcla con agua potable y agua en presencia de nitratos.	61
Tabla 4.8. Promedio de Absorción en las probetas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado.	62
Tabla 4.9. Promedio de erosión de las probetas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado.	63
Tabla 4.10. Velocidades de pulso ultrasónico en las probetas con agua potable y agua con nitratos.....	64
Tabla 4.11. Peso Unitario de las probetas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado	65
Tabla 4.12. Resistencia a la compresión promedio para cada mezcla de concreto.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Velocidad de calor desarrollado durante la hidratación del C3S	15
Figura 2.2. Representación esquemática del mecanismo disolución-precipitación de hidratación del C3S	16
Figura 2.3. Ciclo del Nitrógeno	26
Figura 3.1. Tamizado del agregado fino.	32
Figura 3.2. Tamizado del agregado grueso.	32
Figura 3.3. Peso específico del agregado fino	33
Figura 3.4. Peso específico del agregado grueso	33
Figura 3.5. Elaboración de probetas	40
Figura 3.6. Mezcladora de cemento	42
Figura 3.7. Aparato de Vicat.....	42
Figura 3.8. Ensayo de resistencia a compresión	48
Figura 4.1. Curva granulométrica del agregado grueso	51
Figura 4.2. Curva granulométrica del agregado fino	53
Figura 4.3. Curva granulométrica del agregado combinado.....	54
Figura 4.4. Tiempo de fraguado inicial de la pasta de cemento realizada con agua potable	59

Figura 4.5. Tiempo de fraguado inicial de la pasta de cemento realizada con nitratos en el agua de mezclado.....	59
Figura 4.6. Desarrollo de la resistencia a la compresión.....	67
Figura 4.7. Vista de falla general de las probetas de concreto ensayadas a compresión.....	70

INTRODUCCIÓN

El reuso del agua residual tratada para la elaboración de concreto ha sido estudiado en varios países, concluyendo que es posible obtener concreto de buena calidad. En Venezuela, los resultados no fueron los esperados, ya que la resistencia a compresión entre la mezcla utilizando agua residual tratada y agua potable no cumplió con la norma COVENIN 2385-00. Al comparar los parámetros del agua en los distintos trabajos, se detectó que el nitrato era el constituyente diferente que contenía el agua de mezclado.

El presente trabajo especial de grado está dirigido a verificar si el comportamiento del concreto se modifica por la presencia de nitratos en el agua de mezclado. Para ello se agregó nitrato de potasio al agua potable, reproduciendo la concentración de nitratos que se encontraban en el agua residual tratada. Vale destacar que también se incrementó el contenido de potasio en esta agua de mezclado.

A las 2 mezclas y 40 probetas de concreto preparadas con nitratos en el agua y con agua potable, le fueron realizados ensayos de: tiempo de fraguado, absorción, erosión, peso unitario, ultrasonido y resistencia a la compresión a 7, 14, 28 y 90 días; con el fin de caracterizar las propiedades físicas del concreto.

Es de gran importancia para la industria de la construcción, comprender las características físicas y mecánicas que tendrá el concreto en presencia de elementos que pudieran estar afectándolo al utilizar agua residual tratada para su elaboración, ya que su uso está relacionado con estructuras seguras y efectivas que mejoran la calidad de vida de la población.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El Planeta tiene una superficie de 510 millones de km² aproximadamente. De esta extensión el 71,6% está compuesta por agua, pero la mayor parte de esta cantidad no es adecuada para el consumo humano. Solo el 1% del agua existente en el planeta se puede aprovechar. Debido al crecimiento de la población mundial el agua potable se ha vuelto escasa (LeChevallier, 2012). En pro de su conservación existe el tratamiento de aguas residuales que a través de un proceso físico, químico y biológico, elimina contaminantes que se encuentran en el agua después de su uso para luego ser descargada a otros cuerpos de aguas o reutilizada en labores que no requieran la calidad para el consumo humano directo.

Uno de los sectores que consume mayor cantidad de agua potable es el de la construcción, específicamente en la elaboración de concreto, ya que por metro cúbico fabricado se necesitan aproximadamente 165 litros de agua. En algunas normas internacionales se ha considerado el uso de agua no potable para la elaboración de concreto, incluyendo el agua residual tratada, a pesar de ser un área muy delicada, ya que el concreto debe tener unas propiedades y características específicas para que se pueda utilizar en las distintas estructuras de manera segura y efectiva. (Vázquez, 2001)

Existen trabajos de investigación sobre esta temática realizados en varios países, tales como Kuwait (Al-Ghusain y Terro, 2001), Pakistan (Haque, Baig y Mi, 2005) y México (Vázquez, 2001), los cuales concluyen que es posible obtener concreto de buena calidad con un efluente de aguas residuales en lugar de agua

potable, ya que en muchos de los casos las resistencias fueron superiores que las obtenidas en las mezclas realizadas con agua potable (Melo, 2008).

Recientemente en Venezuela, (Dieguez, 2011) realizó un estudio llamado “Propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual tratada”, que buscaba como objetivo evaluar el comportamiento de la mezcla de concreto elaborada con agua residual tratada para ver la factibilidad de utilizar estas aguas en la fabricación del concreto. Se realizó con agua procedente de la planta de tratamiento “El Chorrillo”, ubicada en el Edo. Miranda, dando como resultado una diferencia de la resistencia a la compresión entre las dos mezclas preparada con agua residual tratada y agua potable superior al 10% establecido en la norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”. Siendo así, esta agua no podría considerarse apta para la preparación de concreto, a pesar que el efluente cumplía con todos los parámetros regulados en las diferentes normas para ser usado como agua de mezclado para la realización del concreto. Al comparar los parámetros de las aguas utilizadas en los diferentes estudios se detectó variabilidad de algunos compuestos presentes como el sodio, cloruros y nitratos, siendo este último el de mayor concentración y discrepancia.

Los nitratos pueden estar presentes dentro de las aguas residuales tratadas en mayor o menor cantidad dependiendo del tipo de tratamiento al cual es sometida esta agua residual. Estos hallazgos de Dieguez no son concluyentes, razón por la cual se requiere establecer con mayor precisión el comportamiento del concreto ante la presencia de nitratos en el agua de mezclado.

En vista de lo anterior, el propósito planteado en este proyecto de Trabajo Especial de Grado es comprobar si el nitrato es un componente de las aguas residuales tratadas que altera las características físicas y mecánicas del concreto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Verificar si el comportamiento del concreto se modifica por la presencia de nitratos en el agua de mezclado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comprobar si el tiempo de fraguado de la pasta de cemento realizada con nitratos en el agua de mezclado cumple con el establecido con la norma COVENIN 2385-2000.
- Comparar la durabilidad del concreto elaborado con nitratos en el agua de mezclado y con agua potable.
- Comparar la homogeneidad del concreto realizado con nitratos en el agua de mezclado y con agua potable.
- Comparar la resistencia a compresión del concreto elaborado con nitratos en el agua de mezclado y con agua potable.

1.3 Justificación

Este trabajo sigue con la línea de investigación iniciada en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Central de Venezuela, sobre el uso del agua residual tratada para la preparación de concreto. Siendo esto relevante para la industria de la construcción, así como para las Normas Sanitarias para la Vigilancia y Control del Reúso de las Aguas Residuales Tratadas, actualmente en consulta pública.

Este estudio se origina como consecuencia de un Trabajo Especial de Grado previo sobre las propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual tratada, donde se concluyó que uno de los principales constituyentes del agua que pudo haber causado deterioro en la mezcla de concreto es el nitrato, ya que fue el que estuvo en mayor discordancia con investigaciones similares (Dieguez, 2011).

El trabajo describirá el comportamiento del concreto realizado con nitratos en el agua de mezclado, lo cual permitirá verificar si este compuesto afecta las propiedades físicas del concreto. De ser así, limitaría el uso de las aguas residuales tratadas cuando existe nitrificación en el proceso de tratamiento.

Es de gran importancia para la industria de la construcción, comprender las características físicas y mecánicas que tendrá el concreto en presencia de elementos que pudieran estar afectándolo al utilizar agua residual tratada para su elaboración, ya que su uso está relacionado con estructuras seguras y efectivas que mejoran la calidad de vida de la población. Por otra parte puede constituir una posible alternativa que implicaría reducir el consumo de agua potable en la preparación del concreto, con lo cual se estaría contribuyendo a la preservación de uno de los recursos más valiosos para la sociedad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico de este trabajo estará dirigido a presentar las interacciones entre los principales componentes del concreto y la posible interferencia del nitrato en la mezcla.

El concreto es la mezcla de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, en proporciones adecuadas para asegurar sus propiedades físicas, especialmente la resistencia requerida y durabilidad en el tiempo. Es un material que posee gran versatilidad, ya que es posible obtener plasticidad, resistencias y apariencia, logrando así satisfacer los particulares requerimientos de la industria, y por ello la creciente expansión de su uso. (Porrero, 2009)

Las propiedades del concreto están determinadas por sus características o cualidades básicas entre las que se encuentran la trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad. Estas propiedades pueden variar considerablemente dependiendo de los constituyentes de la mezcla y su control.

Los elementos activos del concreto son el agua y el cemento, ya que la mayoría de las reacciones químicas ocurren con ellos, y los elementos inertes, son la arena y la grava, cuya función es formar el esqueleto de la mezcla, ocupando un gran porcentaje del volumen final. (IMCYC)

A continuación se describen los componentes o elementos de la mezcla que conforma el concreto, con énfasis en el papel del agua de mezclado y el posible comportamiento en sus propiedades cuando tiene algunos constituyentes como los nitratos.

2.1 Agregados

Los agregados son fragmentos, usualmente pétreos, cuya finalidad principal es abaratar la mezcla. Constituye la mayor parte de la masa del concreto, ya que representa entre el 70% y el 85% de su peso. (Porrero, 2009)

Los agregados están conformados por dos fracciones granulares. El agregado fino, generalmente es arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. El agregado grueso es aquel conformado por grava o piedra triturada con partículas predominantemente mayores que 5 mm. Generalmente el tamaño máximo que se emplea esta entre 9,5 mm y 25 mm (3/8" y 1"). (González, 2004)

La influencia de estos materiales en las propiedades del concreto tiene efectos importantes, no sólo en el acabado y calidad final del concreto, sino también sobre la trabajabilidad y consistencia en estado plástico, así como sobre la durabilidad, resistencia, propiedades elásticas, cambios volumétricos y peso unitario del concreto endurecido. Por esta razón, en los áridos, son más importantes sus propiedades físicas, como, por ejemplo, volumen, tamaño y distribución de los poros, que sus propiedades químicas o mineralógicas que, aunque influyen, pasan a un segundo plano. (Blanco, 2011)

Una de las características más influyentes en la calidad de los agregados para su uso como componente del concreto es la granulometría, que no es más que la distribución del tamaño de los granos que lo integran. La finalidad principal de una granulometría adecuada, es obtener mezclas trabajables y con pocos espacios vacíos.

Otra de las propiedades decisiva para la calidad y economía de la mezcla de concreto es el tamaño máximo del agregado, medido como la abertura del cedazo de menor tamaño que deje pasar el 95% o más del

material. Los tamaños máximos grandes son favorables al mecanismo de lubricación, además de ser mezclas más económicas, pero son desfavorables a la resistencia del concreto y tienden a producir segregación. Además el tamaño máximo modifica los valores de las constantes de la curva “Resistencia vs. Relación agua/cemento”, debido a su influencia sobre el mecanismo de fractura del concreto. (González, 2004)

A los agregados los pueden acompañar impurezas perjudiciales, la mayoría de origen natural, las cuales menoscaban la hidratación del cemento y el desarrollo consecuente de la resistencia del concreto. Normalmente esas impurezas se evitan por medio del despejado adecuado del depósito, para eliminar por completo la tierra vegetal, y un enérgico lavado en la arena. (Waddell, 1997)

Algunos agregados pueden reaccionar con los álcalis que lleva el cemento, ésta es llamada reactividad potencial alcalina, la cual genera productos con mayor volumen que el de los componentes, con una fuerza expansiva tal que puede originar agrietamiento en el concreto. El grado de daño dependerá de la reactividad de los agregados y del contenido de álcalis en el cemento. Este tipo de problema suele presentarse a edades tardías del concreto. (Porrero, 2009)

2.2 El cemento Portland

El cemento Portland, según la Norma COVENIN 28-2003, “*Cemento Portland. Requisitos*” es el producto obtenido por la pulverización de Clinker, el cual es silicatos de calcio hidráulico, con la adición de agua y sulfato de calcio.

La composición química del Clinker Portland se define convenientemente mediante la identificación de cuatro compuestos principales, cuyas variaciones

relativas determinan los diferentes tipos de cemento Portland, presentados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Compuestos principales del cemento

Compuesto	Fórmula del óxido	Notación abreviada
Silicato tricálcico	$\text{Ca}_3\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	(C ₃ S)
Silicato dicálcico	$\text{Ca}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	(C ₂ S)
Aluminato tricálcico	$\text{Ca}_3\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	(C ₃ A)
Aluminoferrito tetracálcico	$\text{Ca}_4\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	(C ₄ AF)

Fuente: Elaboración propia

Vale destacar que estos compuestos se agrupan en pares, de modo que si uno de los componentes del par aumenta, el otro disminuye para mantener la proporción aproximada de la pareja en el Clinker. De esta manera el par integrado por los silicatos de calcio (C₃S y C₂S) suman alrededor del 75% del total del Clinker, en tanto que los aluminatos (C₃A y C₄AF) están alrededor del 20% y el 5% restante son residuos solubles en agua y pérdidas por fuego. (Zanni, 2008)

En términos prácticos se concede que los silicatos de calcio son los compuestos más deseables, porque al hidratarse forman los silicatos hidratados de calcio (C-S-H) que son responsables de la resistencia mecánica y otras propiedades del concreto. Normalmente, el C₃S aporta resistencia a corto y mediano plazo, y el C₂S a mediano y largo plazo, es decir, se complementan bien para que la adquisición de resistencia se realice en forma sostenida.

El aluminato tricálcico (C₃A) es tal vez el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, y por ello propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo de calor de hidratación en el concreto. Asimismo, su presencia en el

cemento hace al concreto más susceptible de sufrir daño por efecto del ataque de sulfatos. Por todo ello, se tiende a limitarlo en la medida que es compatible con el uso del cemento. Finalmente, el aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) es un compuesto relativamente inactivo pues contribuye poco a la resistencia del concreto, y su presencia más bien es útil como fundente durante la calcinación del Clinker y porque favorece la hidratación de los otros compuestos. (García, 2011)

La norma Venezolana COVENIN 28 “Cemento Portland. Especificaciones” y la C-150 de la A.S.T.M., clasifica al cemento Portland común en cinco tipos diferentes, de acuerdo a las proporciones relativas de los cuatro componentes mineralógicos principales y a las condiciones de uso. En la tabla 2.2 se presenta las variaciones en porcentaje de los compuestos principales que definen estos diferentes tipos de cemento.

Tabla 2.2 Tipos de Cementos Portland

Tipo	Características	Compuestos en %			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	Uso general	50	24	11	8
II	Resistente a los sulfatos y bajo calor de hidratación	42	33	5	13
III	Altas resistencias iniciales	60	15	9	9
IV	Muy bajo calor de hidratación	26	50	5	12
V	Muy alta resistencia a los sulfatos	40	40	4	9

Fuente: Elaboración propia

En tal sentido podemos decir que el cemento tipo I se utiliza cuando no se requiere propiedades especiales y su composición es la típica. El tipo II desprende moderado calor de hidratación y posee resistencia a los sulfatos, ya que tiene mayor concentración de C_4AF .

El cemento tipo III permite obtener con rapidez elevadas resistencias, usualmente en una semana o menos. A los 28 días, la diferencia de resistencia con el cemento Tipo I, tiende a desaparecer. La alta resistencia inicial alcanzada con el cemento tipo III puede lograrse por modificaciones en la dosificación de crudos de la composición química, a fin de obtener un porcentaje más alto de C_3S ; o por un incremento en la finura del cemento, dado que se obtiene una mayor área superficial, la cual expuesta a la acción del agua dará lugar a una hidratación y endurecimiento más rápido. Esta principalmente expuesto a procesos de agrietamiento por contracción por secado, ya que genera alto calor de hidratación.

El cemento Tipo IV tiene altos porcentajes de C_2S y C_4AF ; por lo que genera bajo calor de hidratación, buena resistencia a la acción de los sulfatos, lento desarrollo de resistencia a la compresión, aunque a edades avanzadas alcanza los mismos valores de los otros tipos de cemento y buena resistencia al agrietamiento.

Finalmente, el cemento tipo V se emplea en aquellos casos en que se requiera alta resistencia a la acción de los sulfatos, la cual se obtiene por un bajo contenido de C_3A (menor del 5%). El contenido de silicatos cálcicos hace que este tipo de cemento tenga alta resistencia a compresión, aunque su desarrollo de resistencia aumenta más lentamente que en el cemento Tipo I. (García, 2011)

2.3 Agua para concreto

Una vez que el agua y el cemento se mezclan para formar la pasta cementante, se inicia una serie de reacciones químicas que en forma global se designan como hidratación del cemento. Estas reacciones se manifiestan

inicialmente por la rigidización gradual de la mezcla, que culmina con su fraguado, y continúan para dar lugar al endurecimiento y adquisición de resistencia mecánica en el producto. (IECA)

Es por ello que el agua es uno de los componentes esenciales en las mezclas de concreto, debido a que es la que está en contacto con el cemento para proporcionar propiedades de fraguado a fin de formar un sólido compacto con los agregados. Dentro de la elaboración de un concreto existen dos clasificaciones para el agua, de mezclado y la de curado.

El agua de mezclado es la cantidad de agua que requiere el concreto por unidad de volumen para hidratar el cemento y proporcionar fluidez y lubricación al concreto. El agua de hidratación representa el 25% del peso del cemento y es la estrictamente necesaria para activar las reacciones químicas del ligante. Cualquier exceso de este porcentaje causa retracción en el secado y formación de conductos capilares que interconectan poros, que al evaporarse se llenan parcialmente de aire y producen concretos menos resistentes y menos durables. (Porrero, 2009)

Si bien el proceso de hidratación continua por varios meses siempre que exista la humedad suficiente, el agua de curado es la cantidad de agua adicional que requiere el concreto una vez endurecido a fin de que alcance los niveles de resistencia para los cuales fue diseñado. Este proceso adicional es muy importante en vista de que, una vez colocado, el concreto pierde agua por diversas situaciones como:

- ✓ Altas temperaturas por estar expuesto al sol o por el calor reinante en los alrededores.
- ✓ Alta absorción de la base donde se encuentra colocado el concreto.
- ✓ Fuertes vientos que incrementan la velocidad de evaporación.

Usualmente, los requerimientos para el agua de curado son menos exigentes que para el agua de mezclado porque permanece en contacto superficial por un tiempo relativamente corto, lo que impide que sus constituyentes penetren en el concreto. (Porrero, 2009)

Los requisitos de calidad para el agua de mezclado no tiene ninguna relación con el aspecto bacteriológico, básicamente se refiere a las características fisicoquímicas y sus efectos que podría tener en las propiedades del concreto. Normalmente se recomienda agua potable para la mezcla de concreto pero esto no es limitante, ya que también se puede emplear para la elaboración del concreto agua que no se considera potable, tomando la precaución con algunos de los constituyentes que podrían ser dañinos para el concreto. (Vázquez, 2001)

Si se va a emplear un agua de dudosa procedencia en el concreto, se deben verificar ciertos parámetros, ya que si existe un exceso de impurezas en el agua de mezclado puede causar reacciones perjudiciales al concreto o alteraciones en sus propiedades. (Kosmatka, 2009)

Cada país tiene una norma que rige cuáles son los parámetros que hay que prestarle atención al momento de utilizar un agua que no sea potable para la mezcla de concreto. En la tabla 2.3 se presenta un resumen de algunos de los parámetros y sus límites adecuados que se deben considerar para el agua de mezclado del concreto.

Se observa que en la mayoría de las normas hay diferencias en los constituyentes regulados, como por ejemplo el hierro, nitratos y sólidos disueltos; Por otra parte en todos los casos las concentraciones límites son

similares y relativamente altas si se comparan con los requerimientos para agua potable.

Tabla 2.3 Resumen de los parámetros y los límites adecuado al momento de utilizar un agua para elaboración de mezclas de concreto

Parámetro	Límites máximos adecuados					
	Venezuela	USA	Mercosur	Colombia	México	Europa
	COVENIN 2385-2000	ASTM C-94/C	NM 137:97	NTC 3459	NOM C-122	EN- 1008
Cloruros (mg/l)	500	500	500	500	400	500
Sulfatos (mg/l)	--	3000	2000	3000	3000	2000
Hierro (mg/l)	--	--	1	--	--	--
Nitratos (mg/l)	--	--	--	--	--	500
pH	5,0 a 7,5	--	5,5 a 9,0	--	≥ 6,0	6,0 a 8,0
DQO (mg/l)	250	--	--	--	150	--
Sólidos disueltos (mg/l)	5000	--	--	2000	--	--
Sólidos totales (mg/l)	--	5000	5000	5000	5000	5000

Fuente: Adaptada de Dieguez, 2011

Cabe destacar que la COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”, establece que cuando el agua es dudosa la procedencia debe cumplir con algunos ensayos físicos además de los químicos antes mencionados en la tabla 2.3 para que esta pueda ser utilizada para la realización de concreto. El tiempo inicial de fraguado no puede discrepar en más de 15 min en tres mezclas de muestras y la resistencia a compresión no puede diferir en más de 10% entre las muestras realizadas con el agua potable y el agua de estudio.

En otros países como Colombia, se considera que el agua es aceptable si la relación entre las resistencias a compresión de especímenes preparados con el agua de calidad desconocida y la potable es mayor del 90% ensayada en 7 días. Si la resistencia es menor que el 90% pero superior al 80% se debe contemplar la modificación de las proporciones de la mezcla. Si la resistencia es menor que el 80% esta agua es rechazada para la elaboración de concreto. (NTC 3459, 2001)

2.4 Hidratación del cemento

La hidratación es el resultado de procesos químicos y físicos entre el cemento portland y el agua que llevan al fraguado y endurecimiento del concreto. Las reacciones químicas que describen la hidratación del cemento son muy complejas. Para poder entenderlo es necesario estudiar la hidratación de cada uno de los compuestos del Clinker por separado y esto supone que la hidratación de cada compuesto es un proceso independiente de los otros que tienen lugar durante la hidratación del cemento. Esta suposición no siempre es válida, ya que las reacciones entre los compuestos de hidratación pueden tener consecuencias importantes; sin embargo con respecto a la hidratación de los silicatos, la suposición es bastante representativa. (Blanco, 2011)

Tal como se presentó anteriormente, los dos compuestos de silicato cálcico suman alrededor del 75% del Clinker, razón por la cual se enfocaran las explicaciones del proceso de hidratación a estos compuestos, cuyo proceso de hidratación es casi el mismo, ya que su diferencia fundamental es la cantidad de hidróxido de calcio que se forma y el calor liberado en este proceso de hidratación.

La velocidad de reacción en este proceso aumenta con la temperatura, razón por cual la hidratación de C_2S es mucho más lenta porque es un compuesto menos reactivo que el C_3S , tal como se observa en las siguientes ecuaciones abreviadas:



El producto principal de esta hidratación es un hidrato de silicato cálcico, simbolizado en la terminología cementera como C-S-H, caracterizado como una materia no cristalina de composición variable (geliforme), que forma partículas muy pequeñas (menos de 1 micra en cualquier dimensión) y es el principal responsable de la resistencia del concreto. Posteriormente se forma hidróxido de calcio, simbolizada como CH, materia cristalina con una composición fija. (Blanco, 2011)

La cinética de la reacción es bastante compleja e incluye varios procesos; sin embargo, la secuencia de reacción del C_3S se puede seguir más fácilmente tomando como referencia la curva calorimétrica de la figura 2.1, que muestra la velocidad de evolución de calor en función del tiempo, la cual se puede dividir en cinco etapas, diferenciadas por la generación de calor y el tiempo transcurrido en cada caso.

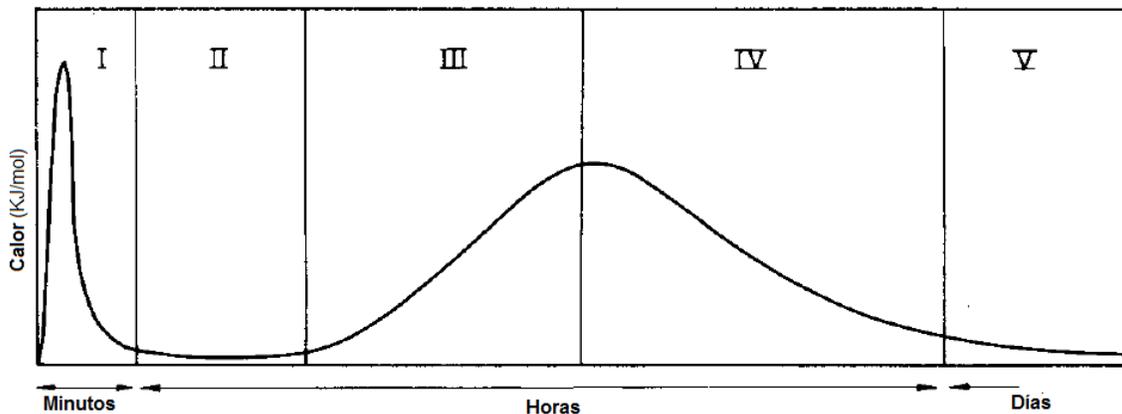


Fig. 2.1 Velocidad de calor desarrollado durante la hidratación del C_3S

Fuente: Adaptado de Blanco, 2011.

La primera etapa I es llamada periodo inicial, representada como (a) en la figura 2.2, ocurre en los primeros segundos donde el agua se pone en contacto superficialmente con el silicato tricálcico y al cabo de unos minutos (b) se disuelve para formar H_2SiO_4^- , Ca^{2+} y OH^- , que se sobresatura con respecto al silicato de calcio hidratado (C-H-S) que precipita rápidamente. Después de aproximadamente 1 hora (c) las concentraciones de Ca^{2+} y OH^- alcanzan unos valores críticos, entonces el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ empieza a cristalizar con la consiguiente formación de C-S-H y la reacción de C_3S continúa de nuevo con rapidez.

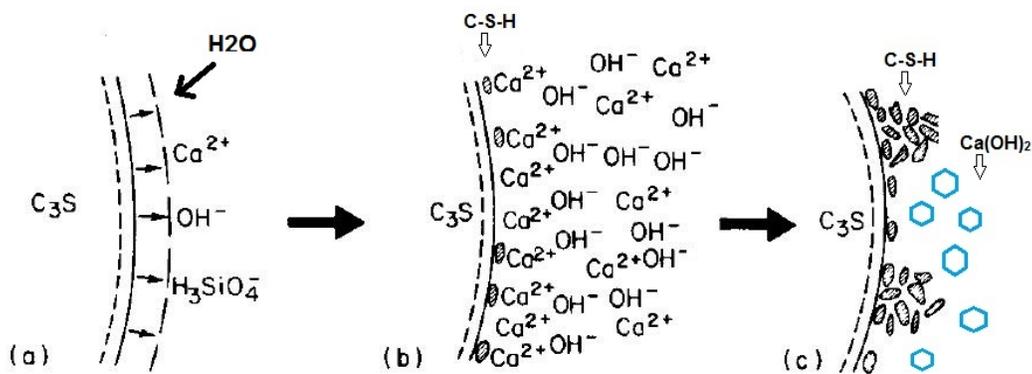


Fig. 2.2 Representación esquemática del mecanismo disolución-precipitación de hidratación del C_3S

Fuente: Adaptado de Blanco, 2011.

Se puede observar en la curva de flujo térmico (Fig. 2.1), que la velocidad de disolución disminuye rápidamente en los primeros instantes, debido a la rápida elevación del pH ($\approx 12,8$), producida por la liberación de los iones OH^- .

Luego de la etapa I, sigue un período de inactividad relativa, denominado período de inducción (etapa II), en el cual el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados son muy pequeños, lo que explica porque el concreto queda manejable y trabajable, es decir, en un estado plástico durante un determinado tiempo, lo que se puede visualizar en (b) de la figura 2.2.

Después de 1 a 3 horas, es decir, al final del período de inducción, empieza la solidificación o fraguado inicial (etapa III), donde el C_3S empieza a hidratarse rápidamente otra vez, ya que el $Ca(OH)_2$ empiece a cristalizar y así se mueve el equilibrio de la reacción hacia la derecha en la ecuación 2.1. La velocidad de hidratación alcanza un máximo al final del período de aceleración, donde comienza la etapa IV. Esto corresponde con el máximo de la evolución de calor. A este tiempo (2-8 horas) el fraguado final ha ocurrido y comienza el endurecimiento inicial.

El espesor de la capa C-S-H va creciendo, por consiguiente, llega un momento en que la velocidad de reacción es igual a la velocidad de difusión. A partir de este momento, el espesor de la capa sigue creciendo y el movimiento a través de la capa C-S-H determina la velocidad de la reacción y la hidratación queda controlada por la velocidad de difusión dentro de la capa. Luego la velocidad de reacción empieza a disminuir hasta que llegue un estado estable (etapa V) después de 12 a 24 horas.

Las reacciones controladas por difusión son generalmente bastante lentas y la velocidad disminuye cuando aumenta el espesor de la barrera de difusión hasta que no haya más C_3S a hidratar, motivo por el cual la hidratación tiene la tendencia a acercarse al 100 % de forma asintótica. (Blanco, 2011)

2.5 Propiedades del Concreto

Las características del concreto pueden variar en un grado considerable, mediante el control de sus componentes y como se ha mencionado la interacción agua-cemento define muchas de las propiedades del mismo.

Es por ello que una de las formas de verificar la influencia de los constituyentes que pueda tener el agua en estas características del concreto es a través de la caracterización de sus principales propiedades, entre la que se encuentran:

Trabajabilidad: Es una propiedad importante para muchas aplicaciones del concreto. En esencia, es la facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad. El ensayo típico para evaluar esta propiedad es la prueba de asentamiento.

Durabilidad: El concreto debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido en el servicio. La erosión es uno de los ensayos que permite explorar esta propiedad del concreto.

Impermeabilidad: Es una importante propiedad del concreto que puede mejorarse, con frecuencia, reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. El ensayo de absorción es uno de los que permite determinar esta propiedad en el concreto.

Resistencia: Es una propiedad del concreto que, casi siempre, es motivo de preocupación. Por lo general se determina por la resistencia final de una probeta en compresión. Como el concreto suele aumentar su resistencia en un periodo largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad. (IVIFRANCMOORE)

2.6 Ataque químico al concreto

La resistencia que presenta el concreto al ataque químico por determinadas sustancias, e incluso por el agua pura, depende de su permeabilidad y de la

distribución, tamaño y grado de conectividad de los poros, dando lugar a los mecanismos de absorción capilar, permeabilidad y difusión. Por otro lado, resulta necesario que la composición química y mineralógica del cemento Portland, su grado de hidratación y las características de la interface pasta-agregado-agua resulten adecuadas para resistir el ataque químico. (Blanco, 2011)

En la mayor parte de los casos, el ataque de los agentes agresivos químicos se produce sobre el cemento; y en menores ocasiones el ataque se producirá sobre los áridos. (Pablovilla, 2010)

Para producir un ataque significativo sobre el concreto, los compuestos químicos agresivos deben estar en solución y presentes en una concentración superior a una cierta concentración mínima normalizadas en cada país. (ACI, 1991)

La agresividad de un determinado compuesto químico se incrementa, cuando: la temperatura del mismo aumenta, la velocidad del fluido agresivo en contacto con el concreto crece, cuando hay una compactación deficiente, ha tenido un mal curado, hay alternancias de humedad y sequedad y las armaduras se encuentran corroídas. Esta agresividad disminuye, cuando se ha empleado en el concreto una relación agua/cemento baja y un tipo de cemento adecuado al medio. (Medina, 2008)

La alteración química del concreto puede ser de carácter intrínseco o extrínseco, según se deba a la reacción de sus componentes o se origine por agentes externos.

Entre los factores internos generalmente se consideran las reacciones de los agregados y conjunto agregados-cemento. Sin embargo también existen aquellos que se originan entre el agua-cemento y que generalmente se

relacionan con el proceso de hidratación; pero que para algunos de los constituyentes contenidos en el agua no hay desarrollados muchos estudios, tal es el caso de los nitratos.

Reacción de los agregados: El ataque químico más importante que se produce en el concreto por acción de los agregados, lo ocasiona el ácido sulfúrico que se forma por oxidación de los sulfuros de hierro, ocasionando tensiones internas que llevan a la rotura del material. Los minerales de sulfuro de hierro se encuentran frecuentemente en los agregados en forma de pirita, marcasita y pirratina. La pirita se puede presentar en todo tipo de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, su coloración es amarilla, generalmente forma cristales cúbicos. La marcasita es poco común se le encuentra en rocas sedimentarias, tiene brillo metálico; se oxida fácilmente con liberación de ácido sulfúrico y formación de óxidos e hidróxidos de hierro. La pirratina es la menos común y puede encontrarse en rocas ígneas y metamórficas. (ACI, 1991)

Una prueba rápida, para evaluar la capacidad expansiva del agregado, consiste en colocar una muestra en una solución saturada de cal. En el caso de que aparezca un precipitado de color verde azulado, de forma gelatinosa, se puede considerar los agregados como potencialmente expansivos.

Reacción álcalis-agregados: La reacción álcali-agregado (RAA) es una reacción lenta que ocurre internamente en la masa de concreto, formada por la reacción entre algunos minerales de los agregados e hidróxidos alcalinos normalmente naturales del cemento, pudiendo comprometer el funcionamiento de las estructuras afectadas. La RAA comprende los siguientes sistemas:

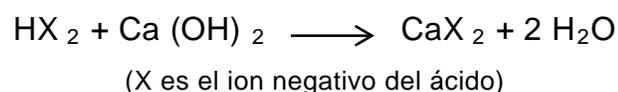
- Reacción álcali-sílice: producida entre los álcalis y la sílice amorfa presentes en algunos agregados que resulta bastante lenta ya que generalmente se manifiesta luego de 5 a 15 años.

- Reacción álcali-carbonato: producida entre los álcalis presentes en la solución de poros y algunos compuestos carbónicos que forman parte de ciertos agregados calizos o dolomíticos. En este caso la reacción suele ser bastante más rápida manifestándose luego de unos cuantos meses. (Cavalcante, 2011)

Los factores externos del medio ambiente pueden iniciar las reacciones químicas destructivas en el concreto con mayor vulnerabilidad en aquel con porosidad elevada. Sin embargo, mucho de estos ataques asociados con factores externos también pueden actuar intrínsecamente. Entre los ataques más comunes, se encuentran:

Ácidos: El concreto no posee buena resistencia frente a los ácidos, debido a su naturaleza alcalina. Desde el punto de vista de su naturaleza se pueden considerar los ácidos inorgánicos y los orgánicos. De acuerdo con el pH de la disolución se puede considerar como débilmente agresiva si el pH está comprendido entre 6,5 y 5,5, fuertemente agresiva si lo está entre 5,5 y 4,5 y altamente agresiva si es menor de 4,5.

En general el ataque ácido se produce sobre el hidróxido cálcico procedente de la hidratación del cemento dando lugar a sales solubles que se eliminan produciendo oquedades en la masa del concreto. Se produce de acuerdo con la siguiente reacción:



La descomposición del concreto depende de la porosidad de la pasta de cemento, de la concentración del ácido, la solubilidad de las sales de calcio de ácido (CaX_2) y en el transporte de fluidos a través del concreto. (Blanco, 2011)

Sulfatos: es una de las causas de agresión química más peligrosas, produciendo la desagregación de este material. Las reacciones químicas que incluyen la formación de productos expansivos en el concreto ya endurecido pueden dar lugar a efectos perjudiciales, ya que la expansión puede producir tensiones mecánicas internas que, eventualmente, se traducen en deformaciones y desplazamientos en diferentes partes de la estructura, en la aparición de grietas y fisuras, desconchados, etc.

El ion sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas subterráneas. El contenido de ion sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes sustratos de los vegetales.

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetracálcico, produciendo sulfo aluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.

La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el pH de la pasta de cemento.

Para que la reacción de ataque de los sulfatos sobre el hormigón tenga lugar es preciso que:

1.- Existan iones de sulfato, lo cual es frecuente en aguas naturales e industriales así como en las que atraviesan terrenos ricos en yesos.

2.- Que el hormigón sea suficientemente permeable para que exista acceso de las aguas sulfatadas al mismo.

3.- Que el contenido de aluminato tricálcico del cemento supere determinados límites. (Menéndez, 2000)

Cloruros: Independientemente de sus efectos nocivos sobre el acero del concreto armado, los cloruros pueden ser el origen de alteraciones del conglomerante cuando están presentes en proporciones elevadas. Una parte de los cloruros se fija por los silicatos de calcio hidratados u otra parte se combina con el aluminato tricálcico bajo la forma de monocloroaluminato de calcio.

Los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla de concreto fresco (disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua) o penetrar posteriormente en el interior del concreto por difusión desde el exterior, en cuyo caso el riesgo de corrosión se incrementa grandemente. Este es un caso donde el ataque químico puede ser intrínseco o por agentes externos.

Los cloruros totales en el concreto se pueden subdividir químicamente en ligados y libres. Los cloruros ligados son los que están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión; por lo tanto, los límites en las especificaciones deben aplicarse al contenido de cloruros libres en lugar del contenido total.

Los niveles de cloruros solubles en ácido pueden resultar más adecuados para evaluar el riesgo extremo de corrosión a largo plazo si el concreto ha sufrido procesos adicionales de carbonatación o sulfatación. La carbonatación libera cloruro ligado, mientras que la presencia de sulfatos la impide hasta cierto punto; la reacción entre el cloruro y el aluminato tricálcico incrementa así los cloruros libres.

El efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de concreto endurecido está constituido por la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el concreto que no está permanentemente en contacto directo con el agua. No obstante, debido a que la sal en solución penetra y asciende por capilaridad, el ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en el concreto, de tal suerte que la permeabilidad de este material es un factor de gran importancia, y el clima tropical propio de nuestras franjas costeras actúa como catalizador del proceso. (IMCYC)

Potasio: Es otro de los constituyentes del agua que puede afectar el concreto desde su condición en estado fresco o ya como material endurecido. En las formas conocidas que el potasio podría afectar las propiedades del concreto se encuentran:

- Los carbonatos y los bicarbonatos de potasio pueden causar efectos sobre el tiempo de fraguado en el concreto. Por lo general el carbonato de potasio puede causar un fraguado rápido, mientras que el bicarbonato puede tanto acelerar como retardar el fraguado en el concreto. Cuando la suma de las sales disueltas excede a 1000 mg/l, podrían causar estos tipos de cambios en el concreto. (ACI, 1991)

- El óxido de potasio ha sido objeto de estudios por su afectación en la RAA, que se origina entre determinados agregados activos y el óxido de potasio del cemento. La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interfase con la pasta de cemento formando un gel que toma agua y se dilata creando presiones internas que llevan a la rotura del material a largo plazo. (ACI, 1991)

- Hidróxido de potasio en concentraciones por encima de 1,2 por ciento de peso del cemento (18,000 a 24,000 ppm) tiene efectos sobre el desarrollo de la resistencia que la puede reducir sustancialmente. (Vázquez, 2001)

2.7 Los nitratos y el concreto

Es uno de los constituyentes presentes en el agua que han sido poco investigados en términos de su influencia en las propiedades del concreto; razón por la cual es el objeto principal de este trabajo.

El nitrato (NO_3^-) es un ión inorgánico que combina un átomo de nitrógeno (N) rodeado por tres átomos de oxígeno (O) unidos de forma idéntica en una disposición plana trigonal. El ion nitrato tiene una carga formal de -1 y un peso molecular de 62 g/mol (Lenntech, 2011).

Está presente de forma natural en el medio ambiente como consecuencia del ciclo del nitrógeno representado en la figura 2.3, que puede ser alterado por diversas actividades agrícolas e industriales. Entre éstas cabe destacar la utilización de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, debido a su alta solubilidad y la biodegradabilidad, o los vertidos orgánicos de origen doméstico e industrial no sometidos a tratamientos adecuados de saneamiento (Sawyer, 2011).

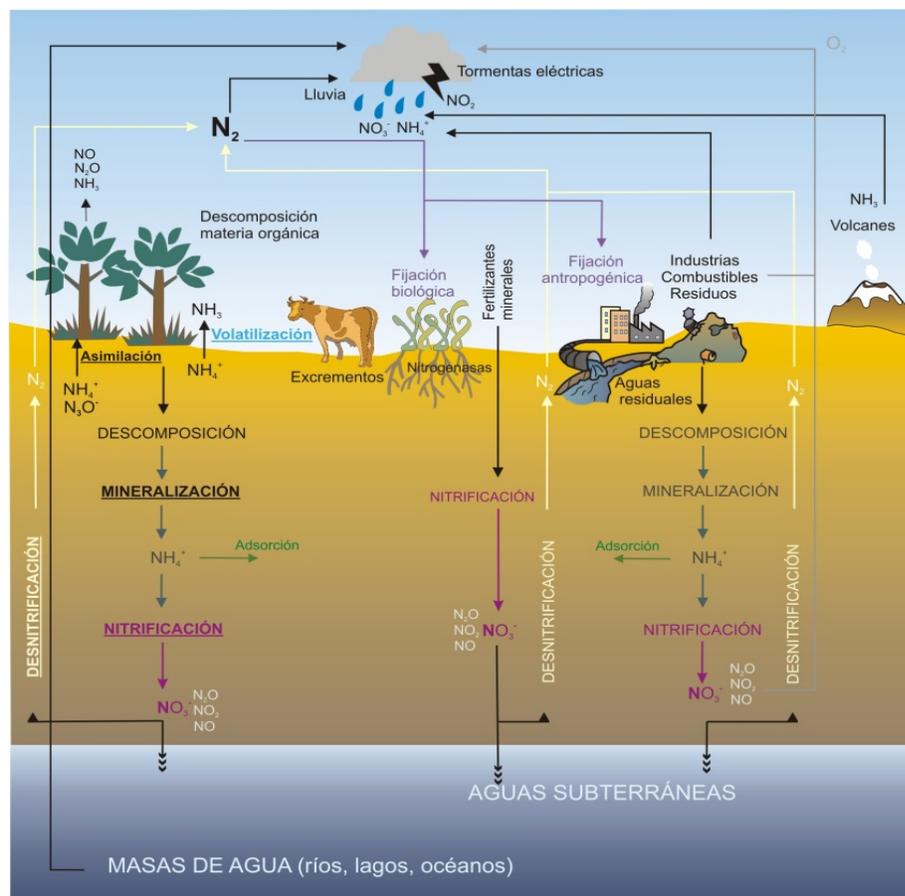


Fig. 2.3 Ciclo del Nitrógeno

Fuente: Tomado de Rodríguez, 2009.

El ciclo del nitrógeno comienza por la fijación físico-química o biológica del nitrógeno, que no es más que la reducción del nitrógeno atmosférico a compuestos nitrogenados como el amoníaco.

Luego llega la etapa de descomposición donde los animales obtienen nitrógeno al ingerir vegetales, en forma de proteínas. En cada nivel trófico se libera al ambiente nitrógeno en las excreciones, que son utilizadas por los organismos descomponedores para realizar sus funciones vitales. Continúa el proceso con la nitrificación donde se producen los nitratos, por la oxidación biológica del amonio (NH_4^+), primero a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-), con la intervención de las bacterias nitrificantes del suelo.

Normalmente, en los suelos y el agua los niveles de nitritos suelen ser muy bajos en comparación con los de nitratos, ya que el nitrito se transforma en nitrato con mayor rapidez de la que se produce. Finalmente la desnitrificación es el proceso por el cual los nitratos son reducidos a nitrógeno, e incorporado nuevamente a la atmósfera por acción de bacterias heterótrofas en condiciones anaerobias y en presencia de carbono asimilable.

Con la nitrificación se alcanza el mayor nivel de oxidación del nitrógeno, siendo una parte aprovechado por las plantas, mientras que la otra que circula por el suelo va a parar a las aguas subterráneas por procesos de lixiviación (Miliarium, 2004).

Estas transformaciones son las que justifican la presencia de nitratos en el agua natural, pero también las que explican los procesos que pueden darse en el tratamiento de las aguas residuales y que originan su presencia en el agua tratada, específicamente cuando se lleva a cabo el proceso de nitrificación en estas plantas de tratamiento. Situación presentada en la planta utilizada en el trabajo de Dieguez (2012) que originó esta investigación.

Una práctica bastante común consiste en utilizar el agua potable para fabricar concretos sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar concretos; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque hay aguas potables con contenido de nitratos que no afectan su potabilidad (hasta 10 mg N/l), pero pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de concretos. (Vázquez, 2001)

Aunque los nitratos no son unos de los constituyentes más significativos presentes en el agua y quizá esa sea la razón por la cual ha sido poco investigado en su influencia sobre la afectación en el comportamiento del concreto, en la literatura existen algunas consideraciones importantes a presentar en este trabajo.

Se sabe que los nitratos actúan como combinaciones que intercambian iones, transformando los compuestos cálcicos en sales solubles, éstas llegan a un equilibrio higrotérmico (presión, humedad relativa, temperatura), el agua se evapora y las sales se cristalizan, aumentando su volumen, que pueden producir la destrucción de la estructura del concreto como consecuencia de la presión ejercida en los poros de la pasta de cemento. Cuando este fenómeno tiene lugar en la superficie, el producto se denomina eflorescencia, por acción de los nitratos se forman costras de color oscuro. Cuando la cristalización se produce en el interior del concreto, el daño es mayor, ya que produce fractura y disgregación del mortero, esta lesión se conoce con el nombre de criptoflorescencia.

Aún en pequeñas cantidades, su sola presencia es suficiente para combinarse con algunos compuestos cálcicos del cemento, dando lugar a procesos de lixiviación. Razón por la cual el contenido máximo de nitratos deberá oscilar entre 200 y 500 mg/l, de acuerdo con los umbrales admitidos

para las aguas clase V, caracterizadas como muy fuerte agresividad según las Normas Europeas. (Zanni, 2008)

La lixiviación es una forma de desarreglo que ocurre cuando el agua disuelve componentes del concreto. Puede remover suficiente hidróxido de calcio para reducir su resistencia. (IMCYC)

En el caso del nitrato amónico se produce desintegración de la masa del concreto, por expansión de las sales solubilizadas, y la descalcificación en el caso de nitrato de potasio y sodio. (Zanni, 2008)

Por otra parte, en la industria de la construcción, el nitrato de calcio ha sido investigado como posible aditivo del concreto que puede funcionar como acelerador de fraguado, y que el resultado puede depender fuertemente de la composición del cemento Portland utilizado. Son los iones de calcio quienes dominan este efecto de aceleración del fraguado ya que conducen a la formación de hidróxido de calcio por lo que la hidratación se completa en menor tiempo. (Justnes, 2003)

Tal como se observa en los diferentes referencias encontradas las sales de nitratos pueden actuar como ataque químico al concreto por procesos de formación de cristales o lixiviación, dependiendo del tipo de sal; o como aditivos aceleradores de fraguado en el caso del nitrato de calcio, asociados no al ión nitrato sino más bien a los iones calcio que son incorporados a la mezcla. También es importante considerar que estos nitratos presentes en el agua pueden combinarse con el calcio, propiciando la denominada descalcificación del concreto, en el caso de sales de potasio y sodio.

CAPÍTULO III

MÉTODO

En este capítulo se presenta de manera explícita las acciones llevadas a cabo en la ejecución del trabajo especial de grado, las cuales hacen referencia un conjunto de ensayos y actividades complementarias para el análisis completo de la mezcla patrón y la realizada con nitratos en el agua de mezclado, con la finalidad de describir su comportamiento y establecer comparaciones entre ellas.

Los procesos necesarios para alcanzar los objetivos propuestos fueron definidos en siete etapas:

- I.** Ensayos de agregados.
- II.** Diseño de mezcla y probetas.
- III.** Incorporación de NO_3^- al agua potable.
- IV.** Preparación de las mezclas y probetas.
- V.** Ensayo de la pasta de cemento.
- VI.** Ensayos al concreto endurecido.
- VII.** Comparación de los resultados obtenidos de ambas mezclas.

3.1 Ensayos de agregados

Los agregados constituyen entre el 70% y 85% de la masa del concreto, por lo cual sus propiedades resultan esenciales para garantizar la calidad del concreto. Para conocer sus características existen ciertos ensayos establecidos en la norma COVENIN para certificar si estos inertes cumplen con los límites para su utilización.

El fin de estos ensayos en este trabajo fue verificar la calidad de los agregados, de tal manera que no fuesen ellos quienes afectaran las propiedades de la mezcla y concreto.

En esta ocasión se realizaron cuatro (4) ensayos fundamentales para obtener los datos que fueron usados en el diseño de mezcla. A continuación se presenta en la tabla 3.1 estos ensayos con su respectiva norma COVENIN.

Estos ensayos se realizaron en tres días, desde el 7 hasta el 9 de noviembre de 2012; ya que la mayoría de ellos necesitan 24 horas de secado del agregado antes de realizar la actividad.

Tabla 3.1 Ensayos de agregados

Ensayo	COVENIN	
	Número	Nombre
Granulometría	255	Agregados. Determinación de la composición granulométrica.
Pesos unitarios	263	Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado
Densidad y absorción del agregado fino	268	Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción
Densidad y absorción del agregado grueso	269	Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Granulometría

Consiste en la distribución del tamaño de las partículas que lo integran. Para ello se emplearon los distintos tamices que permiten separar el material. En consecuencia hay factores que se derivan de un análisis granulométrico como son:

- Tamaño máximo nominal: es el menor tamaño de tamiz que retiene de 5% o menos del agregado.
- Relación agregado grueso-fino (β)

En las figuras 3.1 y 3.2 se puede observar los tamices utilizados para realizar el ensayo tanto para el agregado fino como para el agregado grueso.



**Fig. 3.1 Tamizado
Agregado fino**



**Fig. 3.2 Tamizado.
Agregado grueso**

3.1.2 Peso unitario

Este ensayo presenta la relación peso/volumen, para determinar como se van a seleccionar y manejar los agregados.

Peso Unitario Suelto: Es aquel en el que se establece la relación peso/volumen dejando caer libremente desde cierta altura el agregado (5 cm aproximadamente), en un recipiente de volumen conocido y estable. Este dato es importante porque permite convertir pesos en volúmenes y viceversa, cuando se trabaja con agregados.

Peso Unitario compacto: Este proceso es parecido al del peso unitario suelto, pero compactando el material dentro del molde; se usa en algunos métodos de diseño de mezcla como lo es el de American Concrete Institute.

3.1.3 Densidad y absorción

La absorción es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie de las partículas (agregado saturado y de superficie seca), expresado como un porcentaje de la masa seca.

La densidad específica es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo la masa del agua dentro de los poros saturables, después de la inmersión en agua durante 24 ± 4 horas, pero sin incluir los vacíos entre las partículas, comparado con la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida. A continuación se presentan las figuras 3.3 y 3.4 con los equipos necesarios para realizar este ensayo.



Fig. 3.3 Peso específico.
Agregado fino



Fig. 3.4 Peso específico.
Agregado grueso

3.2 Diseño de mezcla y probetas

Se realizaron 20 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura y 2 vigas de 30x10x10 cm con agua potable y otro lote igual para el agua con nitratos, dando un total de 40 probetas y 4 vigas, necesarias para realizar los distintos ensayos explicados posteriormente a las edades de 7, 14, 28 y 90 días. Esto da un volumen de 140 litros de concreto aproximadamente para cada una de las mezclas.

Para el diseño de mezcla se empleó el método descrito en el Manual del Concreto Estructural de Joaquín Porrero (2009), por ser este un procedimiento que ha tenido excelentes resultados tanto en laboratorios como en plantas de preparación comercial de concreto. Es un método organizado y sistemático que admite la utilización de agregados poco controlados y puede ser aplicado por profesionales con poca experiencia.

Para determinar la dosificación de los distintos componentes de las mezclas de concreto fue necesario llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Se programó una hoja de cálculo haciendo uso de la herramienta Excel para el diseño de una mezcla patrón.
2. Se establecieron los parámetros de entrada con los resultados obtenidos en los ensayos de agregados, los cuales constituyen la información básica para llegar a la dosificación de las mezclas deseadas, estos parámetros son:
 - Tipo de agregado fino y grueso: Arena y piedra triturada.
 - Peso específico del agregado fino: $2,64 \text{ kgf/m}^3$
 - Peso específico del agregado grueso: $2,59 \text{ kgf/m}^3$
 - Absorción del agregado fino: 1,17%
 - Absorción del agregado grueso: 1,08%

- Resistencia media a la compresión a los 28 días: 300 kgf/cm²
 - Tamaño máximo del agregado grueso: 3/4" (19,1 mm)
 - Asentamiento esperado: 8 cm
 - β : relación de la arena con relación al agregado total: 45%
3. Se verificó la resistencia promedio requerida (F_{cr}) para concretos con $f'_c \leq 350$ kgf/cm² según la Norma COVENIN 1753 "Proyecto y construcción de obras en concreto estructural"
 4. Se calculó la relación agua/cemento (α) mediante la ecuación:

$$\alpha = 3,147 - 1,065 * \log R_{28} \quad (3.1)$$

5. Esta relación fue corregida en función del tamaño máximo (K_R : 1,05) y el tipo de agregados (K_A : 1,14) empleados, obteniéndose la relación agua/ cemento corregida (α_c) mediante la ecuación:

$$\alpha_c = \alpha * K_r * K_a \quad (3.2)$$

6. Se calculó la cantidad de cemento (C) a incorporar en la mezcla tomando en cuenta la relación triangular, seguidamente ésta relación fue corregida por tamaño máximo (C_1 : 1,05) y por tipo de agregados (C_2 : 1,28):

$$C = \left(117,2 * \frac{T^{0,16}}{\alpha_c} \right) * C_1 * C_2 \quad (3.3)$$

7. Los volúmenes de aire y de agua presentes en la mezcla fueron estimados con las fórmulas:

$$V = \frac{C}{P} \quad (3.4)$$

$$a = C * \alpha_c \quad (3.5)$$

8. Se procedió a estimar la cantidad de los agregados:

- Cantidad total de agregados

$$A + G = \gamma_{(a+g)} * (1000 - 0,3 * C - a - V) \quad (3.6)$$

- Cantidad de agregado fino y grueso

$$A = (A + G) * \beta \quad (3.7)$$

$$G = (A + G) * (1 - \beta) \quad (3.8)$$

- Corrección por humedad. Peso de agregado saturado con superficie seca

$$A_{SSS} = \frac{A * (100 + A b_a)}{100 + W a} \quad (3.9)$$

$$G_{SSS} = \frac{G * (100 + A b_g)}{100 + W g} \quad (3.10)$$

3.3 Incorporación de nitratos al agua de mezclado

El agua potable para hacer las mezcla de concreto fue captada en el kilómetro 11 de la carretera panamericana, procedente de la planta de tratamiento “La Mariposa”, ya que fue el agua utilizada por (Dieguez, 2011) en su investigación. Esta actividad se realizó el día 12 de noviembre de 2012 y se invirtió aproximadamente dos horas.

Se realizaron dos mezclas, una utilizando agua potable y otra agregando 18 gramos de Nitrato de Potasio (KNO_3) a 30 litros de agua potable con el objetivo de reproducir las concentraciones de nitratos ($11,5 \text{ mg NO}_3^- \text{ N/l}$) que se encontraban en el agua residual tratada procedente de la planta de tratamiento de agua residual “El Chorrillo”, lugar donde se captó el agua del estudio de

Dieguez sobre las “Propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual tratada”, origen del presente trabajo.

Los parámetros determinados en cada una de las aguas se realizaron siguiendo los métodos estándares establecidos por *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, APHA-AWWA-WEF, edición 20, 1998. A continuación se presentan las tablas 3.2, 3.3 y 3.4, donde se indica el método utilizado y el código establecido en este manual para cada uno de los análisis. Estas determinaciones analíticas fueron realizadas por el personal técnico de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la UCV (PETA-UCV).

Tabla 3.2 Método analítico de las propiedades físicas y químicas del agua

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	CÓDIGO SM 19*
Color	Comparación Visual	2120 B
Turbiedad	Nefelométrico	2130 B
Alcalinidad	Título métrico	2320 B
Conductividad Específica	Conductímetro	2510 B
Sólidos Totales	Gravimétrico	2540 B
Sólidos Disueltos	Gravimétrico	2540 C
Sólidos Suspendidos	Diferencia	--

Fuente: Tomada de Dieguez, 2011

Tabla 3.3 Método analítico de los metales del agua

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	CÓDIGO SM 19*
Aluminio	Espectrofotometría de Absorción Atómica	3500-Al B
Calcio		3500-Ca B
Cobre		3500-Cu B
Hierro		3500-Fe B
Magnesio		3500-Mg B
Manganeso		3500-Mn B
Sodio		3500-Na B
Potasio		3500-K B
Plomo		3500-Pb-B
Zinc		3500-Zn B

Fuente: Adaptada de Dieguez, 2011

Tabla 3.4 Método analítico de los constituyentes inorgánicos no metálicos del agua

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	CÓDIGO SM 19*
Boro	Colorimétrico	4500-B C
Cloro Residual	Colorimétrico	4500-CI G
Cloruros	Cromatografía Iónica	4500-CI F
Fluoruro	Cromatografía Iónica	4500-F F
pH	Electrométrico	4500-H ⁺ B
Nitritos	Espectrofotometría	4500-NO ₂ C
Nitratos	Espectrofotometría	4500-NO ₃ C
Oxígeno Disuelto	Iodométrico	4500-O B

Fuente: Tomada de Dieguez, 2011

3.4 Preparación de las mezclas y realización de probetas

Para la elaboración de las probetas se siguió el procedimiento que establece la Norma Venezolana COVENIN 338-2002 “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”.

1. Se pesaron cada una de las cantidades de los materiales especificados en el diseño de mezcla y fueron colocados en el trompo de mezclado. Primero los agregados, piedra triturada y la arena, seguido por el cemento Portland tipo III y por último el agua; mezclándolo hasta formar una pasta uniforme.
2. Se determinó el asentamiento de la mezcla por el método del Cono de Abrams tomando en cuenta lo especificado en la Norma Venezolana COVENIN 339:2003 “Concreto. Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams”. Inicialmente se humedeció el cono de Abrams y se colocó en una superficie horizontal rígida, plana y no adsorbente. El molde se sujetó firmemente por las aletas con los pies y se llenó con la mezcla de concreto, vaciando ésta en tres capas cuyos espesores poseían aproximadamente un tercio del volumen. Se compactó cada capa dando 25 golpes distribuidos en su sección transversal haciendo uso de una barra compactadora normalizada.

Luego de haber colocado y compactado la última capa, se engrasó utilizando la misma barra compactadora. Inmediatamente se retiró el molde alzándolo cuidadosamente en dirección vertical. El asentamiento se midió después de alzar el molde tomando la diferencia de altura del molde y la altura promedio de la base superior del cono deformado.

3. Se armaron cada uno de los cilindros normativos con dimensiones de 15 cm o 6” de diámetro y 30 cm o 12” de altura, y se engrasaron cada uno de ellos con aceite para motor SAE 15W/40.

4. Se llenaron cada uno de los moldes con tres capas de igual volumen. Cada capa fue compactada con 25 golpes distribuidos uniformemente en toda la sección transversal del molde, para lo cual se utilizó una barra compactadora.

5. Se almacenaron las probetas bajo techo.

6. Luego de transcurridas 24 horas se procedió a desencofrar cada probeta que luego fueron identificadas con un marcador en su parte superior, para diferenciar las probetas con nitratos en el agua de mezclado y las de agua potable.

7. Se procedió al curado de las probetas; este proceso previene la pérdida de agua por evaporación superficial en la masa de concreto evitando la aparición de grietas por retracción plástica. Se colocaron en una “piscina” con agua potable donde se le agregó cal semanalmente para evitar el crecimiento de algas. Se dejaron allí hasta el momento de realizar los ensayos.

A continuación se presenta la figura 3.5 donde se muestran cuatro fotografías del proceso de la realización de las probetas.



A: Mezcladora



B: Cono de Abrams



C: Preparación de molde



D: Curado

Fig. 3.5 Elaboración de probetas

Esta actividad se realizó el día 14 de noviembre de 2012 para las probetas elaboradas con agua potable y el día 15 de noviembre de 2012 para las probetas elaboradas con nitratos en el agua de mezclado. Se invirtió aproximadamente 4 horas cada uno de los días. Esta actividad, así como las

siguientes fueron realizadas en las instalaciones del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales- IMME de la UCV.

3.5 Ensayo a la pasta de cemento

Este ensayo estuvo dirigido a obtener el tiempo de fraguado de la pasta de cemento. Para esto se siguen los pasos establecidos en el capítulo 11 del Comité Conjunto de Concreto Armado “Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de cementos hidráulicos por la aguja de Vicat”, el cual está basado en la norma estadounidense ASTM: C305-64T. Para esto se utilizó una mezcla de 500 g de cemento con 125 ml de agua, inmediatamente después de mezclar la pasta de cemento, se colocó en el recipiente cónico truncado hasta llenar todo su volumen. Por último se enrazó la cara del cono con menor superficie con una espátula.

Después del moldeado se colocó la aguja en contacto con la superficie de la pasta de cemento y se mantuvo la probeta durante 30 min sin perturbarla; transcurrido este tiempo se determinó la penetración en ese momento, luego se tomaron mediciones cada 15 minutos, teniendo en cuenta que la separación entre puntos de penetración no fuese menor de 6 mm y que la distancia de los puntos de penetración cercanos al borde interior no fuese menor que 10 mm.

Esto se realizó con una muestra con nitratos en el agua de mezclado y una con agua potable para así poder comprobar si los resultados obtenidos cumplen lo establecido en la norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”. Allí se establece que la diferencia entre los tiempos de fraguado de ambas mezclas no debe ser superior a 15 min y 45 min como tiempo inicial y final respectivamente.

Es importante destacar que este ensayo no fue realizado el mismo día que se elaboraron las probetas, sino 15 días después.

A continuación se presentan las figuras 3.6 y 3.7 con fotografías de la realización del ensayo.



Fig. 3.6 Mezcladora de cemento



Fig. 3.7 Aparato de Vicat

3.6 Ensayos al concreto endurecido

Los ensayos a las probetas estuvieron dirigidos a describir el comportamiento mecánico y físico de las mezclas de concreto con nitratos en el agua de mezclado y compararlas con la mezcla realizada con agua potable. Esto fue logrado por medio de la determinación de su resistencia y durabilidad a través de los ensayos de absorción, erosión, ensayo de ultrasonido, peso unitario y resistencia a la compresión, los cuales se explican a continuación.

3.6.1 Durabilidad del concreto

Estos ensayos son realizados para verificar si existe una reacción adversa de los nitratos sobre la calidad del concreto en su tiempo de vida útil. Para lo cual se utilizaron las probetas de 30x10x10 cm, dos (2) con nitratos en el agua de mezclado y dos (2) con agua potable, la cuales se ensayaron a los veintiocho (28) días de elaboradas siguiendo los pasos establecidos en los trabajos de Rodríguez y Simonpietri, 2002:

3.6.1.1 Ensayo de absorción

- Se secaron las probetas al horno a una temperatura de 105°C durante 24 horas.
- Se extrajeron del horno y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para luego pesarlas.
- Se sumergieron completamente en agua por 24 horas a temperaturas entre 15°C y 30°C.
- Luego se sacaron del agua y se secaron con un paño húmedo.
- Se pesaron inmediatamente en los cinco minutos después que fueron retiradas del agua.
- La absorción de agua de las probetas se calcularon con el uso de la siguiente expresión:

$$A_b = \frac{(P_2 - P_1)}{P_2} * 100 \quad (3.11)$$

Donde:

A_b : Absorción de agua en la muestra. [%]

P_1 : Peso seco de la muestra. [g]

P_2 : Peso de la muestra después de haber sido sumergida en el agua. [g]

3.6.1.2 Ensayo de erosión

- Se secaron las probetas al horno a una temperatura de 105°C durante 24 horas.
- Se sumergieron cada una de ellas en la cámara húmeda durante 24 horas y se cercioró de que las probetas se encontraban cubiertas por el agua.
- Se sacaron del agua.
- Con un movimiento suave se cepilló la probeta con un cepillo de cerdas duras, noventa veces hacia arriba y noventa veces hacia abajo, cuidando de no llegar a las orillas.
- El material resultante se dispuso en un envase y se dejó reposar hasta el siguiente día.
- Se extrajo el agua excedente del envase asegurando que el material que estaba en el fondo estuviera desprendido.
- Se colocó el material en el horno a 105°C durante 24 horas y luego se pesó.

3.6.2 Ensayo de ultrasonido

La realización de este ensayo puede suministrar información muy valiosa sobre la calidad del concreto que se tiene, debido a que permite evaluar la homogeneidad de concreto y detectar grietas y otros defectos en el concreto, a través de una variación de la velocidad, además la velocidad de propagación ultrasónica que está relacionada directamente con la resistencia del concreto, ya que una mayor velocidad indica mayor resistencia del concreto.

Este ensayo se realizó cuando las probetas ya contaban con los 28 días de elaboradas, considerando lo establecido en la norma COVENIN 1681-1980

“Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto”.

1. Se calibró el equipo de acuerdo a las especificaciones del fabricante, luego se verificó que las zonas de aplicación de los transductores estuviesen limpias, lisas, secas y libres de revestimiento.
2. Se aplicó vaselina en las superficies de contacto, luego se presionaron los transductores contra dichas superficies y se tomó la lectura del tiempo de paso de la onda que permaneció por más tiempo en la pantalla del equipo.
3. Finalmente se calculó la velocidad de propagación de la onda, mediante la ecuación y se clasificó según la tabla 3.5:

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.12)$$

Donde:

V= velocidad de propagación de la onda [m/s]

L= base de medición. [m]

t= tiempo de paso de la onda. [s]

Tabla 3.5 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

Velocidad ultrasónica (m/s)	Clasificación del concreto
V>4575	Excelente
4575>V>3660	Bueno
3660>V>3050	Cuestionable
3050>V>2135	Pobre
V<2135	Muy pobre

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que las lecturas de tiempo del generador de pulsos fueron dadas en microsegundos (μs), por tanto se realizaron las transformaciones pertinentes para la obtención de las velocidades en m/s.

3.6.3 Peso unitario

Con las probetas ya realizadas se procedió a obtener los pesos y dimensiones de cada cilindro, y a calcular la densidad de cada uno de ellos para obtener los pesos unitarios. Esto permitió saber si en el interior de las probetas se encuentran espacios vacíos. Se calculó el peso unitario (ρ) según la fórmula de densidad:

$$\rho = \frac{P}{V} \quad (3.13)$$

Donde:

P: peso de la probeta. [kg]

V: volumen de la probeta calculado con la altura y el diámetro promedio del cilindro

Se tomó como peso unitario el promedio de los pesos unitarios de todos los cilindros ensayados a compresión.

3.6.4 Ensayo de Resistencia a compresión

Este ensayo se realizó siguiendo los pasos establecidos en la Norma Venezolana COVENIN 338-2002: “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”. Fue realizado para medir cuan resistente es el concreto y verificar si no existe diferencias significativas entre las dos muestras. Además este ensayo es uno de los parámetros exigidos por la norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”, donde establece que la diferencia de las

resistencias no debe ser mayor a 10% entre las dos mezclas para calificar el agua como adecuada para la mezcla.

Se tomaron tres medidas de altura y diámetro, utilizando un vernier. Con el promedio de esas medidas se obtuvo el diámetro y la altura de cálculo. A continuación se tomó el peso de cada probeta con una balanza. Luego se colocó cada probeta en la máquina de ensayos teniendo cuidado de centrarlas sobre un disco confinante, cara inferior de la probeta y otro en la cara superior, para así alinear verticalmente con el vástago de aplicación de carga y seguidamente comprimirlas mecánicamente hasta que falla el cilindro, dando como resultados la carga máxima aplicada.

Para calcular el esfuerzo del concreto se utilizó la siguiente ecuación:

$$Rc = \frac{P}{A} \quad (3.15)$$

Donde:

Rc: resistencia a compresión. [Kgf/cm²]

P: carga máxima aplicada. [kgf]

A: área de la sección transversal del cilindro. [cm²]

Los cilindros fueron ensayados a las edades de: 7, 14, 28 Y 90 días luego de haberse vaciado.



Fig. 3.8 Ensayo de resistencia a compresión

3.7 Comparación de los resultados obtenidos para ambas mezclas

Se realizaron gráficos y tablas comparativas de las propiedades obtenidas a través de los distintos ensayos realizados a la pasta de cemento y al concreto endurecido, para determinar semejanzas o diferencias presentadas en las mezclas con nitratos en el agua de mezclado y con agua potable. Adicionalmente fueron comparados con los resultados obtenidos por Dieguez (2011) cuando se utilizó agua residual tratada como agua de mezclado.

Para conocer con mayor precisión las muestras, los resultados se dan a través de promedios y desviaciones estándares, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos. El ACI 704 establece valores típicos (tabla 3.6) de acuerdo con el grado de control que se tenga para la elaboración y ensayo a compresión de las probetas.

Tabla 3.6 Norma para el control del concreto sometido al ensayo de compresión. Desviación estándar

Desviación Estándar (Kgf/cm ²)				
Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
≤ 15	15-17	17-20	20-25	≥ 25

Fuente: Adaptado de López y Montejo, 2001.

Finalmente es importante mencionar, que debido a los resultados obtenidos, en términos del incremento de la concentración de potasio en el agua de mezclado, se quiso verificar si al agregar ácido nítrico al agua, se reproducían las concentraciones de nitratos deseadas sin alterar ningún otro compuesto. Sin embargo no fue posible ya que afectaba significativamente la conductividad, alcalinidad y pH, propiedades conocidas por afectar las propiedades del concreto.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados que se muestran a continuación constituyen una parte vital de este trabajo especial de grado. Su análisis está enfocado a describir las propiedades físicas y mecánicas del concreto a través de los distintos ensayos realizados, con la finalidad de comparar aquel elaborado con nitratos en el agua de mezclado y la muestra patrón con agua potable. Esto permitirá verificar si el comportamiento del concreto se modifica por la presencia de nitratos en el agua de mezclado.

Dentro de este capítulo se presentan los resultados y análisis de los ensayos experimentales realizados para determinar las principales propiedades del concreto, por medio de tablas y gráficos obtenidos en cada uno de ellos, siguiendo un orden cronológico establecido en el método anteriormente descrito y dando cumplimiento a cada objetivo planteado.

4.1 Características de los agregados

- Granulometría

Se considera que una buena granulometría es aquella que está constituida por partículas de todos los tamaños, de tal manera que los vacíos dejados por las de mayor tamaño sean ocupados por otras de menor tamaño y así sucesivamente. A continuación se presentan en la tabla y el gráfico 4.1 la granulometría del agregado grueso utilizado en las mezclas de concreto.

Tabla 4.1 Granulometría del agregado grueso

Piedra picada triturada		Peso (g):10000			
Cedazo	Tamaño de partícula (mm)	Retenido (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	% Pasante
3/4"	19,10	50	0,5	0,5	99,5
1/2"	12,70	2106	21,1	21,6	78,4
3/8"	9,53	3778	37,8	59,3	40,7
1/4"	6,35	3366	33,7	93,0	7,0
Fondo	-	700	7,0	100,0	-

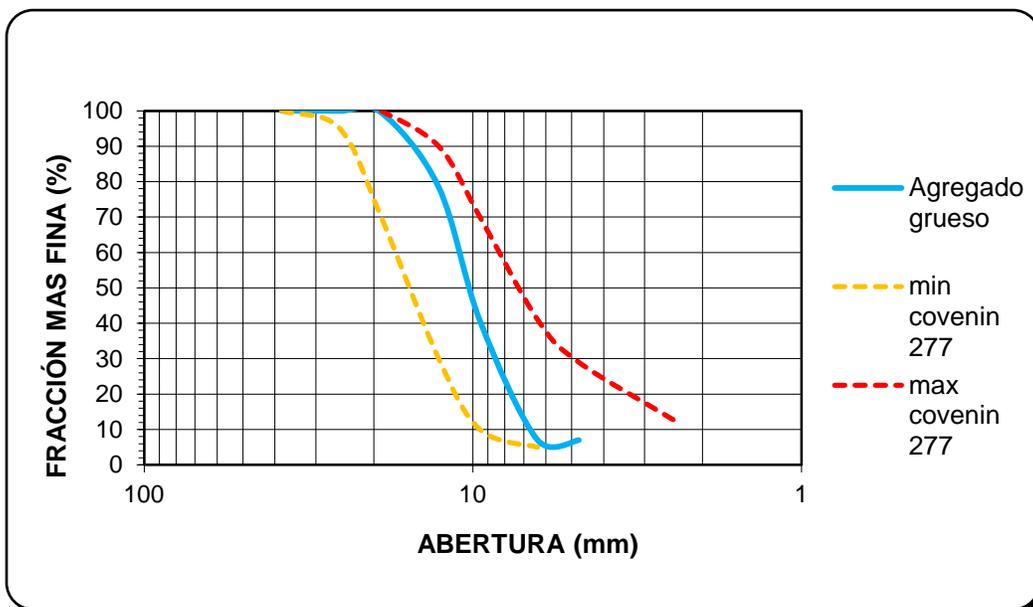


Figura 4.1 Curva granulométrica del agregado grueso

Se observa que en el tamiz de 3/8" (9,53 mm) se retuvo el mayor peso para el agregado grueso (37,8%). El tamaño máximo nominal obtenido fue de 3/4", este tamaño permitirá que los esfuerzos de adherencia debido al aumento

de la superficie específica de las partículas sean bajos. Sin embargo se necesitará mayor cantidad de cemento para obtener la resistencia deseada.

Por otro lado la gráfica 4.1 representa el porcentaje de pasante total de cada cedazo, donde se observa que la granulometría se encuentra dentro de los límites establecidos por la Norma COVENIN 277.

De igual forma se presentan en la tabla y el gráfico 4.2, la granulometría del agregado fino utilizado en la mezcla de concreto.

Tabla 4.2 Granulometría del agregado fino

Arena triturada					
Peso (g):3000					
Cedazo	Tamaño de partícula (mm)	Retenido (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	% Pasante
3/8"	9,530	6,5	0,2	0,2	99,8
1/4"	6,350	277,2	9,2	9,5	90,5
#4	4,760	292	9,7	19,2	80,8
#8	2,380	609,6	20,3	39,5	60,5
#16	1,190	517,6	17,3	56,8	43,2
#30	0,595	565,5	18,9	75,6	24,4
#50	0,298	526,4	17,6	93,2	6,8
#100	0,149	116,2	3,9	97,0	3,0
#200	0,075	64	2,1	99,2	0,8
Fondo	-	25	0,8	100,0	-

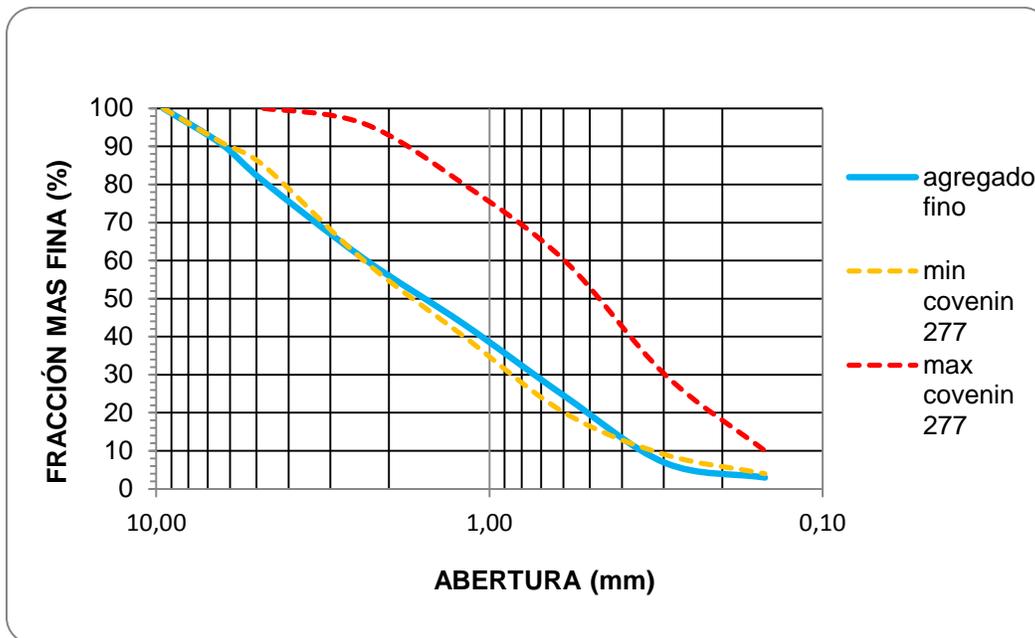


Figura 4.2 Curva granulométrica del agregado fino

Se observa que en el agregado fino se retuvo el mayor peso (20,3%) para el tamiz #8 (2,38 mm). Al realizar el cálculo del módulo de finura se obtuvo un resultado de 2,9. Esto indica que se utilizó una arena que se encuentra entre los intervalos especificados en la norma que son 2,3 y 3,1; concluyendo de esta manera que es una arena adecuada para diseñar una buena mezcla para concreto. Además se observó que hay gran variedad de tamaños. Si se tienen arenas muy finas se obtienen mezclas segregadas y costosas, mientras que con arenas gruesas se producen mezclas ásperas.

En la gráfica 4.2 podemos observar que el agregado fino se encuentra en el límite inferior del rango establecido por COVENIN 277, sin embargo se considera aceptable para ser usada para la mezcla de concreto.

La granulometría de estos agregados grueso y fino se utilizan para producir un agregado combinado que es el que, en realidad, actuará en la

mezcla de concreto. El gráfico 4.3 muestra la granulometría combinada de este trabajo, utilizando una relación entre agregados (β) de 45%, el cual satisface los requisitos establecidos en la norma COVENIN 277, haciendo este material continuo y aceptable para producir un concreto de buena calidad.

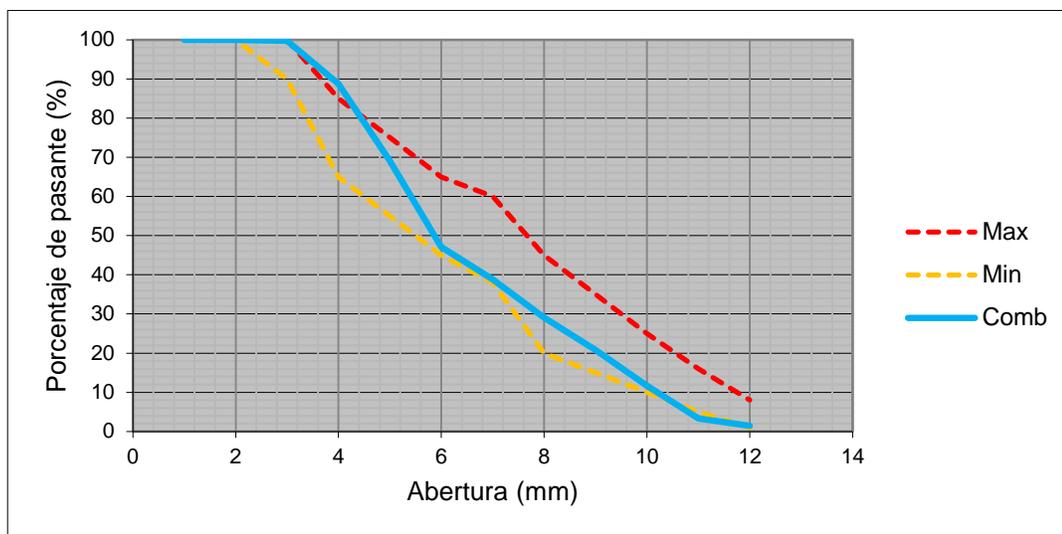


Fig. 4.3 Agregados combinados

- Peso Unitario

El peso unitario es una propiedad física de gran importancia en la dosificación de los agregados dentro del concreto. En la tabla 4.3 se presenta el peso unitario suelto y compactado de los agregados, así como los valores normativos.

Tabla 4.3 Peso Unitario de los agregados

	Grueso	Fino	COVENIN 263	
			Grueso	Fino
Peso unitario suelto (kgf/l)	1,47	1,60	1,4 - 1,5	1,5 - 1,6
Peso unitario compactado (kgf/l)	1,50	1,80	1,5 - 1,7	1,6 - 1,9

Tanto la piedra picada como la arena se encuentran dentro del rango recomendado en la norma COVENIN 263 de peso unitario suelto y compactado. A pesar que el peso unitario no determina la calidad de los agregados, este ensayo es importante para la determinar el porcentaje de vacíos, que en este caso resultó adecuado.

- **Peso Específico y Absorción**

En la tabla 4.4 se presentan los valores obtenidos del peso específico y del porcentaje de absorción de los agregados grueso y fino.

Tabla 4.4 Peso Específico y Absorción de los agregados

	Agregado Grueso	Agregado Fino
Peso Específico	2,59	2,64
Absorción (%)	1,08	1,17

El peso específico es un índice de calidad que nos permite separar el material en bueno o malo. Se utiliza para establecer la condición de volumen en el diseño de mezcla. El rango que la norma COVENIN 268 y 269 establece que el peso específico de los agregados sea de 2,5 a 2,7. Se observa que los agregados utilizados se encuentran dentro de los valores recomendados.

Por su parte, la absorción que estima la porosidad de las partículas del agregado, permitiendo conocer la cantidad de agua que puede ser alojada por el agregado, siempre resulta de mucha utilidad. En ocasiones se emplea como un valor que se especifica para aprobar o rechazar el agregado. Un agregado con baja absorción es aquel con un porcentaje menor que 5%.

La absorción que se presentó en los agregados utilizados, indica que en el diseño de mezcla, estos agregados aportarán agua en una mínima dosis y que se deberá tener en cuenta.

Estos ensayos realizados a los agregados permiten clasificarlos como adecuados para la mezcla de concreto, razón por la cual se descarta que los mismos influyan significativamente y desfavorezcan las propiedades del concreto.

4.2 Diseño de mezcla

Se diseñó para un concreto de $F'c = 300 \text{ kgf/cm}^2$. A continuación se presentan en la tabla 4.5 los componentes y sus cantidades utilizados en la mezcla.

Tabla 4.5 Dosificación de la mezcla de concreto

Componente	Cantidad para 1m³	Cantidad para 20 probetas
Cemento Portland tipo III (kg)	405	50
Agua (l)	202	25
Arena triturada (kg)	755	95
Piedra triturada (kg)	835	115

Es importante mencionar que con la relación agua-cemento utilizada se obtuvo un asentamiento de 8 cm para ambas muestras de concreto como se había esperado en el diseño de mezcla.

4.3 Análisis del agua utilizada para la realización de concreto

En la tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos en los análisis del agua potable y del agua potable con nitrato de potasio, que fueron utilizadas para realizar la mezcla de concreto. Además se incluyen los parámetros del agua residual tratada (efluente de la planta de tratamiento El Chorrito) con la cual trabajó Dieguez (2011), con la finalidad de establecer una comparación entre este Trabajo Especial de Grado y el que fuese su origen.

Tabla 4.6 Caracterización del agua de mezclado

Parámetro \ Tipo de Agua	Potable	Potable + KNO ₃	Agua Residual Tratada (Dieguez, 2011)
Turbiedad (UNT)	3	3	14
Conductividad Especifica (μS/cm)	302	341	584
Oxígeno Disuelto (mg/l)	7,1	7,2	4,2
pH	7,2	7,2	7,4
Alcalinidad a pH 4,5 (mg CaCO ₃ /l)	80	76	146
Cloruros (mg/l)	20	19	60
Sulfatos (mg/l)	39	37	41
Nitratos (mg N/l)	0,3	12,1	11,5
Calcio (mg/l)	26	27	26
Magnesio (mg/l)	13	13	13
Sodio (mg/l)	12	12	66
Potasio (mg/l)	9	18	12
Hierro (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Manganeso (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Boro (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Cinc (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Cobre (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Plomo (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Aluminio (mg/l)	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
Sólidos Totales (mg/l)	194	228	420
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	192	224	389
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	2	4	31
Cloro libre (ml/l)	0,09	N/D	N/D
Cloro total (mg/l)	0,31	N/D	N/D

Como se puede observar los parámetros del agua potable y el agua potable con nitrato de potasio se mantuvieron iguales, con excepción del nitrato (NO_3^-) que pasó de 0,3 mg/l a 12,1 mg/l y el potasio (K^+) de 9 mg/l a 18 mg/l. Como era de esperarse los sólidos disueltos aumentaron y por ende los sólidos totales, así como la conductividad específica, todo ello consecuencia de la sal añadida (KNO_3). Estos resultados permiten afirmar que la diferencia entre ambas aguas de mezclado es solo la presencia de NO_3^- y K^+ .

Cuando se compara las aguas de este trabajo con el agua residual tratada utilizada por Dieguez, se puede apreciar que los parámetros como Hierro, Manganeso, Boro, Cinc, Cobre, Plomo y Aluminio son inapreciables; y otros como el Calcio, Magnesio y Sulfatos no presentan variaciones significativas. Todos los demás parámetros presentan variaciones significativas, lo que hace suponer que el agua de mezclado con NO_3^- y K^+ sea menos propensa a producir efectos adversos en las propiedades del concreto elaborado, en comparación con el agua residual tratada.

Sin embargo lo más importante a considerar de la calidad del agua de mezclado es que el nitrato, compuesto cuyas concentraciones se quería reproducir de la investigación de Dieguez, está en la misma concentración y mayor que en el agua potable utilizada para la mezcla patrón. También es importante destacar que como era de esperarse, el agua potable utilizada en este trabajo y en el de Dieguez tuvo la misma calidad y que en todos los casos el agua cumple con los límites máximos establecidos en las normas (Ver tabla 2.3 del Capítulo II)

4.4 Ensayos realizados al concreto

Tal como se presentó en el método, fueron realizados varios ensayos a la pasta de cemento y a probetas elaboradas con concreto. Los resultados de

cada uno de estos se presentan a continuación a través de gráficas y tablas con los valores promedios.

4.4.1 Ensayo de tiempo de fraguado de la pasta de cemento

A continuación se muestran las figuras 4.4 y 4.5, las cuales presentan el desarrollo del tiempo de fraguado de las pastas de cemento realizadas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado. En el anexo A-1.1 se encuentra una tabla con todos los valores correspondientes del ensayo.

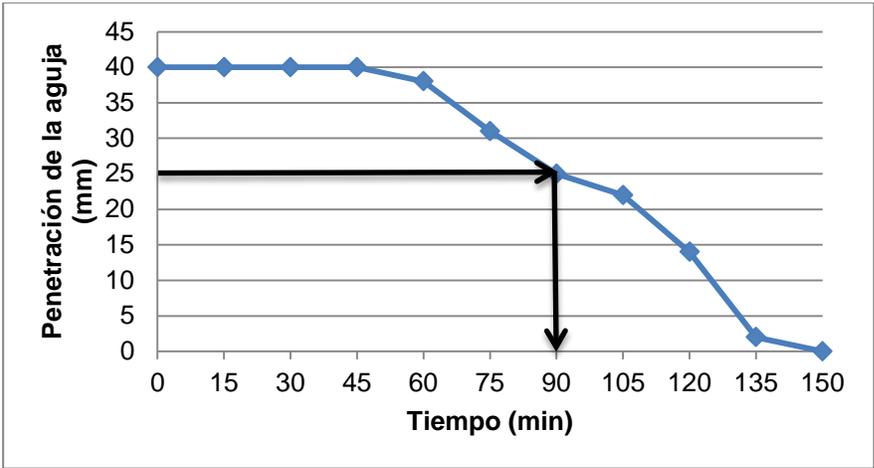


Fig. 4.4 Tiempo de fraguado de la pasta de cemento realizada con agua potable

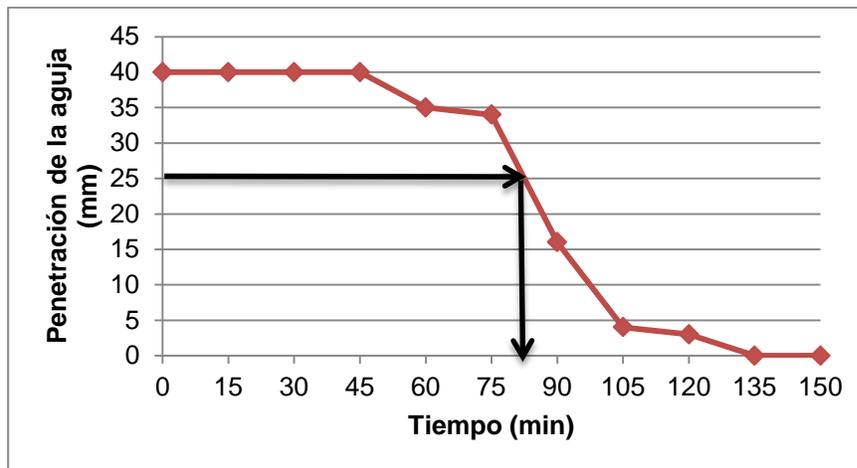


Fig. 4.5 Tiempo de fraguado de la pasta de cemento realizada con nitratos en el agua de mezclado

Como se puede observar, las dos pastas de cemento (la realizada con agua potable y la de nitratos en el agua de mezclado), comienzan a desarrollar su fraguado a partir de los 45 minutos luego de iniciado el ensayo.

Se aprecia que el fraguado de la pasta de cemento con agua potable (Figura 4.4) se desarrolló de una forma uniforme, ya que se puede notar que la penetración va disminuyendo regularmente al paso del tiempo. La muestra con nitratos en el agua de mezclado (Figura 4.5), a pesar que la penetración siempre disminuyó al paso del tiempo, se presentan pendientes irregulares y se visualiza un proceso de fraguado menos uniforme que la pasta elaborada con agua potable. Esta situación fue similar a lo ocurrido en las pastas de cemento ensayado por Dieguez, y definitivamente se puede afirmar que el proceso de hidratación se está viendo modificado cuando el agua de mezclado no es la potable.

Según lo establecido en el capítulo 11 del Comité Conjunto de Concreto Armado “Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de cementos hidráulicos por la aguja de Vicat”, se considera que el tiempo de

fraguado inicial es cuando la aguja consigue una penetración de 25 mm y el tiempo final es cuando la aguja no consigue penetrar más a la pasta de cemento.

La norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos” exige que no deba existir una diferencia mayor a los 15 y 45 min para el tiempo inicial y final respectivamente entre las dos mezclas. En este caso se obtuvo una diferencia de 5 min en el tiempo de fraguado inicial entre la pasta realizada con agua potable y agua con nitratos. Y se obtiene una diferencia de 15 min entre ambas mezclas para el tiempo de fraguado final.

En este sentido, en la tabla 4.7 se presenta los tiempos de fraguado para ambas pastas de cemento; así como el obtenido por Dieguez cuando el agua de mezclado fue agua residual tratada.

Tabla 4.7 Tiempo de fraguado de mezcla con agua potable y agua en presencia de nitratos

	Tiempo de fraguado (min)	
	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>
Cemento con agua potable	90	150
Cemento con nitratos en el agua	85	135
<i>Cemento con agua residual tratada (Dieguez, 2011)</i>	110	180

Estos resultados permiten afirmar que aún cuando hubo un efecto acelerador de fraguado en la mezcla con nitratos en el agua, su variación con respecto a la pasta realizada con agua potable no es significativa, ya que está en el límite que establece la norma COVENIN.

Cabe destacar que el nitrato de calcio y el carbonato de potasio se utilizan como aditivos aceleradores de fraguado, aunque depende de la concentración en que son usados (Harmsen, 2005). Es posible que estos compuestos se encuentren en la mezcla, con lo que se podría asociar esta disminución en el tiempo de fraguado de la pasta realizada con el agua que se le añadió nitrato de potasio, a la formación de carbonato de potasio; ya que cuando se usa el nitrato de calcio, la aceleración del fraguado es debida a la saturación con los iones Ca^+

Las diferencias obtenidas en los tiempos de fraguados en el trabajo de Dieguez se encuentra también entre los límites aptos establecidos por la norma COVENIN 2385-2000, aunque en ese caso el fraguado fue más lento en la pasta de cemento preparada con agua residual tratada, probablemente por la presencia de materia orgánica.

4.4.2 Ensayo de absorción en las probetas de concreto

Los valores promedio obtenidos al realizar los ensayos de absorción, presentan muy poca diferencia entre ambas mezclas, tal como se aprecia en la tabla 4.8 que se presenta a continuación y en el anexo A-1.2.

Tabla 4.8 Promedio de absorción en las probetas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado

	Porcentaje de absorción (%)
Agua Potable	4,37
Agua con Nitratos	4,45
<i>Agua Residual Tratada (Dieguez, 2011)</i>	6,49

No existen diferencias relevantes en la absorción de las probetas preparadas con ambas aguas de mezclado, sin y con nitratos; lo que permite afirmar que los espacios vacíos son muy similares en ambos concretos. Los valores típicos de absorción en concreto están entre 4 y 12 %, aunque no existen normativas que lo regulen.

El aumento de la absorción en las probetas realizadas con mezcla de concreto utilizando agua residual tratada del trabajo de Dieguez (2011), puede estar relacionada con la cantidad de materia orgánica que contiene esta mezcla, lo cual pudo aumentar la porosidad y los espacios vacíos en su interior.

4.4.3 Ensayo de erosión en las probetas elaboradas con agua potable y agua con nitratos

En la tabla 4.9 se presentan los porcentajes promedio obtenidos del ensayo de erosión en las vigas elaboradas con ambas mezclas y en el anexo A-1.3 los valores para cada probeta.

Tabla 4.9 Promedio de erosión de las probetas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado

	Porcentaje de erosión (%)
Agua Potable	0,26
Agua con Nitratos	0,27
<i>Agua Residual Tratada (Dieguez, 2011)</i>	<i>0,84</i>

Se puede apreciar que entre ambas mezclas se mantiene un porcentaje de erosión muy similar. Tomando en cuenta las especificaciones para este ensayo, se consideran las muestras aceptables, ya que los valores de pérdida de material se encuentran por debajo del 1% de material desprendido.

La mayor pérdida de partículas del concreto realizada con agua residual tratada en la investigación de Dieguez (2011), puede estar causada fundamentalmente por la presencia de aceites y grasas, la cual es superior a la que se puede encontrar en el agua potable, y esto causa una disminución de la adherencia del cemento con los agregados, aunque sigue siendo menor del 1%.

Tal como era de esperarse, cuando estamos en presencia de un agua residual tratada se evidencian ciertas diferencias con respecto al agua potable, incluso para aquella agua de mezclado con contenido de nitratos.

4.4.4 Ensayo de ultrasonido en las probetas de concreto

A continuación en la tabla 4.10 se presenta el promedio de las velocidades de pulso ultrasónico obtenido para cada una de las mezclas. Así mismo en el anexo A-1.4 se presentan los valores obtenidos para los diferentes cilindros preparados con agua de mezclado con nitratos y agua potable.

Tabla 4.10 Velocidades de pulso ultrasónico en las probetas con agua potable y agua con nitratos

	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)
Agua Potable	3951
Agua con Nitratos	3877
<i>Agua Residual Tratada (Dieguez, 2011)</i>	4235

Como se puede observar en los resultados, la velocidad de pulso ultrasónico del concreto realizado con nitratos en el agua de mezclado es un poco menor que el obtenido con el concreto realizado con agua potable, lo que nos

indica que el concreto con nitratos en el agua es un concreto con mayor cantidad de espacios vacíos que podría tener menor resistencia, a pesar que las dos mezclas se encuentran en la categoría de “Bueno” en la clasificación del concreto según la velocidad de pulso ultrasónico del ACI.

En todas las probetas se presentó pulso ultrasónico, lo que indica que ninguna mezcla produjo grietas en el interior de los cilindros.

En las mezclas con agua residual tratada de la investigación de Dieguez (2011) el pulso ultrasónico fue mayor, incluso del agua potable; sin embargo sigue estando en la misma categoría de “Bueno”.

4.4.5 Peso unitario de las probetas de concreto

En la tabla 4.11 se presenta los pesos unitarios promedio para las mezclas de concreto con agua potable y agua con nitratos. En el anexo A-1.5 los valores correspondientes a cada cilindro ensayado.

Tabla 4.11 Pesos Unitarios de las probetas con agua potable y con nitratos en el agua de mezclado

	Peso Unitario (Kg/m³)
Agua Potable	2287
Agua con Nitratos	2289
<i>Agua Residual Tratada (Dieguez, 2011)</i>	2300

Como se puede apreciar en ambas mezclas los pesos unitarios son prácticamente iguales y se mantuvieron entre los rangos que normalmente se encuentra el concreto (2200 y 2350 Kg/m³).

Con el análisis de los resultados obtenidos en términos del fraguado, durabilidad y homogeneidad, se puede concluir que no existen diferencias importantes entre las mezclas, pues en todos los ensayos hay cumplimiento de las Normas y criterios establecidos para el concreto, por lo cual no se podría decir que los nitratos ni el potasio desfavorezcan estas propiedades asociadas a la estructura y conformación del concreto.

4.4.6 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros

En la tabla 4.12 se presentan los valores promedios de la resistencia a la compresión obtenidos de las mezclas de concreto realizadas en este trabajo. Asimismo en el anexo A-1.6 y A-1.7 se presentan las tablas correspondientes para cada cilindro ensayado a los 7, 14, 28 y 90 días, tanto para los que se prepararon con agua potable como aquellas con agua con nitratos. Es importante recordar que la resistencia del diseño de mezcla es 300 kgf/cm².

Tabla 4.12 Resistencia a la compresión promedio para cada mezcla de concreto

Días	Agua Potable		Agua Potable + KNO ₃		Diferencia porcentual (%)
	F'c (kgf/cm ²)	Desviación Estándar	F'c (kgf/cm ²)	Desviación Estándar	
7	260	22,96	221	21,57	15
14	323	9,17	280	8,06	13
28	348	21,64	294	21,66	15
90	373	13,30	310	13,05	17

En primer lugar, al observar los resultados presentados en la tabla 4.12, se puede observar que las resistencias obtenidas se encuentran por encima respecto al valor teórico esperado en el diseño de mezcla a los 28 días, situación que podría ser atribuida al diseño de mezcla y el tipo de cemento.

De acuerdo a la desviación estándar de las probetas para cada una de las edades, el grado de control en la elaboración y ensayo de las probetas puede ser calificado como aceptables a excelentes según lo estipulado por el ACI 704, ya que la desviación estándar es menor a 25 kgf/cm^2 . (Ver tabla 3.6 en el capítulo III)

Es importante mencionar que esta desviación al ser usada como grado de control de la elaboración y ensayos de las probetas, y siendo similares en las mezclas con agua potable y con nitratos, se puede decir que el concreto elaborado y los ensayos de compresión fueron realizados en igualdad de condiciones, por lo cual las diferencias obtenidas no pueden atribuirse a las técnicas experimentales utilizadas, aún cuando ambas mezclas fueron preparadas y ensayadas en momentos diferentes.

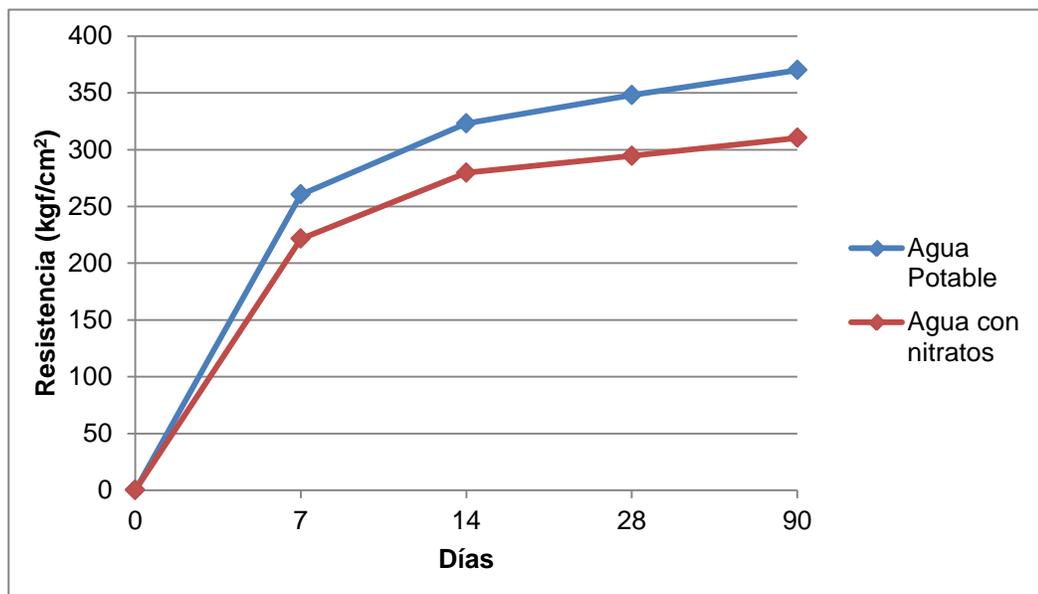


Fig. 4.6 Desarrollo de la resistencia a la compresión.

Como se puede observar en la tabla 4.12 y figura 4.6, existe una diferencia en la resistencia a compresión del concreto preparado con agua potable y con

nitratos. Esta diferencia porcentual de la resistencia entre ambas mezclas se mantuvo más o menos constante en 15% para las distintas edades. Sin embargo, tal como se ha presentado anteriormente, la norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos” solo admite hasta un 10% de diferencia en la resistencia a compresión a los 28 días, cuando se utiliza agua de dudosa procedencia.

Siendo esta la única propiedad del concreto que resultó no ajustada a lo establecido en la normativa nacional, es necesario con base en lo presentado en el marco teórico, explicar los posibles motivos de este comportamiento.

Esta discrepancia en la resistencia, necesariamente debe ser atribuida al potasio y nitratos, ya que son los únicos constituyentes que difieren en las dos aguas de mezclado utilizadas. Es importante considerar que al diluir el nitrato de potasio en agua, se disocian estos dos compuestos con nuevas posibilidades de agruparse según su compatibilidad, concentraciones de los otros compuestos contenidos en la mezcla de concreto y hasta velocidades de las reacciones, entre otras.

Si bien es cierto que es muy difícil comprobar la formación de otros compuestos a partir de la presencia de NO_3^- y K^+ en el agua de mezclado, especialmente por las reacciones de hidratación que sucede con el cemento Portland tipo III, con el uso de los conceptos y mecanismos registrados en la literatura, se ha pretendido explicar este comportamiento en la pérdida del 15% de la resistencia a compresión entre el agua con nitratos y la potable.

En el caso del potasio, se presenta que es el hidróxido de potasio al que se atribuye disminución de la resistencia en el concreto, además en una concentración que debe superar el 1,2% del peso del cemento. Cuando se hacen combinaciones hipotéticas que supone que todo el potasio se convierte en

hidróxido, se tiene que su porcentaje en peso es mucho menor que ese 1,2% establecido en la literatura; razón por lo cual se podría establecer que no pareciera ser el potasio el principal responsable en la disminución de la resistencia. Otro de los compuestos de potasio asociadas a la disminución de la resistencia son los óxidos de potasio, pero con un comportamiento en el largo plazo que no es posible medir con la pruebas realizadas en este trabajo.

Adicionalmente, es importante mencionar que en trabajos anteriores, como el de México (Vázquez, 2001), cuando se usó agua residual tratada proveniente de Azcapotzalco, la concentración de potasio en el agua de mezcla era de 19 mg/l, mayor a la obtenida en este trabajo (18 mg/l), y sin embargo la resistencia a la compresión se incrementó en 7% a los 28 días para una resistencia de 300 kgf/cm².

Este análisis no es concluyente para descartar el potasio como el elemento que afectó la resistencia a la compresión del concreto, las posibilidades de que así sea son bajas, si se considera lo presentado en la literatura.

Por otro lado, el nitrato, como se ha mencionado antes, es un ión poco estudiado en cuanto a las afectaciones en el concreto, posiblemente porque no se encuentra comúnmente en concentraciones importantes en el agua potable, que generalmente es la que se utiliza como agua de mezclado.

Con base en el marco teórico, uno de los procesos que podría estar ocurriendo es la expansión de sales solubles de nitratos, generando una criptofluorescencia, aunque incipiente, pues la fractura y disgregación del concreto no se evidenció en los ensayos de ultrasonido.

Resulta más probable que se produzca una lixiviación que conduce a la pérdida de capacidad aglutinante por parte de los ligantes del mortero,

específicamente en la posible combinación del nitrato con el calcio. Esto obedece que se puede remover suficiente calcio, en la hidratación de los silicatos del cemento, reduciendo así la resistencia del concreto. Si bien es cierto las concentraciones de nitratos parecieran no significativas para que ocurra una lixiviación, también lo es, que en la literatura se establece que este fenómeno solo requiere pequeñas cantidades de nitratos para combinarse con los compuestos cálcicos del cemento. (Zanni, 2008)

En todo caso estos efectos descritos son suposiciones basadas en los resultados obtenidos y las posibles reacciones del potasio y los nitratos en la mezcla de concreto.

Por otro lado, la falla que se obtuvo en la mayoría de las probetas fue vertical en ambas mezclas, tal como se observa en la figura 4.7. Este tipo de falla corresponde a las que se producen por convexidad en la cara superior del cilindro dando lugar a una mayor concentración de líneas de fallas verticales. En cuanto al agregado este se fracturó y la matriz de cemento se mantuvo unida al agregado grueso como un solo elemento, por tanto se evidenció la homogeneidad en dicha mezcla para todos los cilindros.



A- Probeta con agua potable.



B- Probeta con nitratos.

Fig. 4.7 Vista de falla general de las probetas de concreto ensayadas a compresión

Por último, es importante destacar, que aún cuando la resistencia a compresión con el agua con nitratos no cumple con las especificaciones de la norma COVENIN, su porcentaje, 15%, es menor al que se obtuvo en el trabajo de Dieguez (19%) como era de esperarse, ya que los únicos constituyentes que difieren con el agua potable de mezclado son el nitrato y el potasio, a diferencia del agua residual tratada que contiene mayor cantidad de impurezas que el agua potable.

También es relevante acotar que en ambos casos se utilizó cemento Portland tipo III, que suele ser más susceptible al ataque químico de los constituyentes presentes en el agua, por la mayor cantidad de cal liberada en la hidratación del silicato tricálcico; lo cual hace necesario realizar nuevos trabajos utilizando cemento portland tipo I.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con los resultados obtenidos en este trabajo y su posterior análisis se presentan las siguientes conclusiones, dirigidas a la comparación entre las principales propiedades del concreto preparado con agua potable y el que contenía nitrato de potasio en el agua de mezclado, para verificar la influencia de los nitratos en el comportamiento del concreto.

- Los ensayos realizados a los agregados permiten clasificarlos como adecuados para la mezcla de concreto. Utilizando una relación β de 45% que los hace continuo y aceptable, descartando así que desfavorezcan las propiedades del concreto.
- El agua de mezclado de ambos concretos no sólo varió en la concentración de nitratos, según lo establecido, de 0,3 mg/l (agua potable) a 12 mg/l, sino también en el contenido de potasio de 9 mg/l (agua potable) a 18 mg/l; consecuencia de que la sal agregada al agua potable fue nitrato de potasio.
- La calidad del agua de mezclado en ambos casos (agua potable y agua con nitrato de potasio) cumple con los límites máximos establecidos en las normas nacionales e internacionales del agua que se utiliza para la elaboración de mezclas de concreto.

- Las diferencias obtenidas en los tiempos de fraguados inicial y final entre las dos mezclas fueron 5 y 15 minutos respectivamente, menor a los límites establecidos por la norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos” de 15 y 45 minutos.
- El tiempo de fraguado inicial y final se aceleró en la pasta de cemento preparada con el agua con nitrato de potasio con respecto a la realizada con agua potable, posiblemente por la formación de carbonato de potasio.
- El asentamiento del concreto fue de 8 cm para ambas mezclas, de acuerdo a lo contemplado en el diseño; razón por la cual se concluye que la presencia de nitratos y potasio en el agua en concentraciones de 12 y 18 mg/l respectivamente, no afecta la trabajabilidad de la mezcla.
- La absorción en ambas mezclas de concreto fue de 4,4% aproximadamente, lo que permite afirmar que existe una impermeabilidad adecuada y que la presencia de nitratos y potasio tampoco afecta esta propiedad del concreto.
- La erosión resultó en un 0,3% en ambas mezclas, lo cual nuevamente permite afirmar que la presencia de nitratos y potasio no influye en la durabilidad del concreto, específicamente en lo que se refiere al desgaste.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de ultrasonido y peso unitario permiten ratificar que las mezclas realizadas con nitratos en el agua de mezclado no presentan diferencias relevantes en su homogeneidad en comparación de las mezclas con agua potable.

- La desviación estándar obtenida en los ensayos de resistencia a compresión de las 40 probetas ensayadas estuvo entre 8 y 23 kgf/cm², similar entre ambas mezclas, lo cual califica el grado de control en la elaboración y ensayo entre aceptable y excelente de acuerdo al Comité ACI 704.
- El porcentaje de diferencia de la resistencia a compresión entre las dos mezclas (15%) fue superior al 10% establecido en la norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”.
- La disminución en la resistencia a la compresión, necesariamente debe ser atribuida al potasio y/o nitratos, ya que son los únicos constituyentes que difieren en las dos aguas de mezclado utilizadas. En el caso del potasio se podría estar formando hidróxido de potasio; mientras que con los nitratos el efecto más probable podría ser la descalcificación por lixiviación.
- La presencia de nitratos y/o potasio en el concreto modifica únicamente la propiedad de resistencia a la compresión, no así la trabajabilidad, durabilidad y homogeneidad.
- Realizar ajustes en el diseño de mezcla cuando se esté en presencia de nitratos y potasio en el agua de mezclado en concentraciones superiores a 10 y 18 mg/l respectivamente, por su efecto sobre la resistencia a compresión, para no descartar un agua con estas características.

5.2 Recomendaciones

- Realizar un nuevo estudio utilizando cemento Portland tipo I, ya que el cemento tipo III suele ser más susceptible al ataque químico de los constituyentes presentes en el agua.
- Buscar otras opciones de sales a agregar al agua de mezclado, que permitan incrementar la concentración de uno de los compuestos sin alterar significativamente otro.
- Enfocar los ensayos a realizar en la mezcla de concreto más al comportamiento químico de la mezcla, principalmente dirigidas a estudiar las interacciones agua-cemento.
- Continuar con la línea de investigación del reuso de aguas residuales tratadas en la industria de la construcción, realizando trabajos con efluentes provenientes de diferentes plantas de tratamientos de aguas residuales de nuestro país, para verificar la factibilidad técnica de su utilización para la elaboración de concreto.
- Iniciar trabajos dirigidos a comprobar la factibilidad real del reuso de agua residual tratada en la industria de la construcción, en particular explorando el aspecto económico y de aceptación en las principales concreteras del país en usar esta agua en sus diferentes actividades.
- Revisar la consistencia entre las normativas que establecen los límites máximos de la calidad del agua para la elaboración de concreto con aquellas que establecen un límite del 10% de diferencia en la resistencia a compresión cuando se usa agua de otra procedencia distinta al agua potable.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Concrete Institute (ACI). Manual of concrete practice. Parte 1 Materials and general Properties of concrete. 1991.
2. American Concrete Institute (ACI). Guía para la durabilidad del hormigón. [Documento en línea]. Disponible:http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_201_2R_01.pdf [Consulta: 2013, Enero 02].
3. American Concrete Institute (ACI). Control de Calidad del Concreto. ACI-704.
4. APHA-AWWA-EWF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Edición 20, 1998.
5. Al-Ghusain, I. and Terro, M. (2003). Use of treated wastewater for concrete mixing in Kuwait. [Documento en línea]. Disponible: http://pubcouncil.kuniv.edu.kw/kjse/english/wordfile/Volume_30_2003/v29-n1-2003/use.pdf [Consulta: 2012, Febrero 09].
6. Blanco, F. (2011). Materiales de construcción. [Documento en línea]. Disponible:<http://www6.uniovie.es/usr/fblanco/Tema8.Materiales.Construccion.Hormigon.pdf> [Consulta: 2012, Diciembre 02].
7. Brown, T. (2004). *Química. La ciencia central*. Editorial Pearson Educación. México.

8. Cavalcante Da Silva (2011). Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen15/analisis.pdf> [Consulta: 2013, Febrero 20].
9. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Cemento Portland. Requisitos. 7ma Revisión 28-2003.
10. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. 2da Revisión 338-2002.
11. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams. 2da Revisión 339:1994.
12. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de mezcla de concreto por resistencia a la penetración. 352-79.
13. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto. 1681-1980.
14. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos. 1^{era} Revisión 2385-2000.

15. Dieguez, V. (2011). Propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual tratada. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
16. García, B. (2011). Norma del Concreto y Componentes Químicos del cemento. [Documento en línea]. Disponible: <http://boagarciazaira.blogspot.com/2011/09/norma-del-concreto-y-componentes.html> [Consulta: 2012, Diciembre 21].
17. González, F. (2004). Manual de supervisión de obras de concreto. [Documento en línea]. Disponible: http://books.google.co.ve/books?id=d_ufCPVAYtIC&pg=PA40&dq=tamano+maximo+del+agregado&hl=es&sa=X&ei=6fM1UcbHM4X48wSPw4GYDQ&ved=0CCsQ6AEwAA#v=onepage&q=tamano%20maximo%20del%20agregado&f=false [Consulta: 2013, Febrero 17].
18. Haque, I. (2005) USE OF MUNICIPAL WASTEWATER FOR PLAIN CEMENT CONCRETE CONSTRUCTIONS. Institute of Environmental Science & Engineering, National University of Sciences & Technology. Pakistan.
19. Harmsen, T. (2005) Diseño de Estructuras de Concreto Armado. Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial, 2002.
20. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). [Documento en línea]. Disponible: http://www.ieca.es/gloCementos.asp?id_rep=179 [Consulta: 2013, Enero 18].

21. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC). [Documento en línea]. Disponible: <http://www.imcyc.com/> [Consulta: 2013, Marzo 03].
22. IVIFRANCMOORE. [Documento en línea]. Disponible: <http://construestruconcreto.webpin.com> [Consulta: 2013, Marzo 18].
23. Justnes, H. (2003) Calcium Nitrate as a Multifunctional Concrete Admixture. [Documento en línea]. Disponible: <https://www.tekna.no/arkiv/NB/Norwegian%20Concrete/calcium%20nitrate%20as%20a%20multifunctional.pdf> [Consulta: 2013, Febrero 11].
24. Kosmatka, S.; Kerkhoff, B; Panarese, W.; Tanesi, J. (2009). *Diseño y control de mezcla de concreto*. Portland Cement Association (PCA).
25. Lopez, H. y Montejo, L. (2001). Determinación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido usadas en el diseño estructural para los concretos elaborados en la ciudad de Cali con materiales de la región. Trabajo Especial de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali.
26. Medina, E. (2008). Construcción de estructuras de hormigón armado: edificación. España. [Documento en línea]. Disponible: http://books.google.co.ve/books?id=YOcpsolSVBoC&pg=PA16&dq=ataque+quimico+al+concreto&hl=es&sa=X&ei=_MI0UZmgMIT89gSFzIGIBw&ved=0CFQQ6AEwCA#v=onepage&q=ataque%20quimico%20al%20concreto&f=false [Consulta: 2012, Diciembre 05].
27. Melo, J. (2008). Uso del Sistema de las aguas residuales tratadas, Lagunas de Estabilización para agua de amasado y curado de concreto. Brasil [Documento en línea]. Disponible:

http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/utiliza%C3%A7%C3%A3o-esgoto-tratado-em-sistema-lagoas-estabiliza%C3%A7%C3%A3o-como-agua-amassamento/id/37330867.html [Consulta: 2012, Febrero 20].

28. Menéndez, E. (2000). Trabajos de Rilem sobre el ataque químico al hormigón. [Documento en línea]. Disponible: www.ibracon.org.br/eventos/53cbc/pdfs/Esperanza_Menendez.pdf [Consulta: 2013, Enero 14].
29. Norma oficial Mexicana (NOM). Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en agua y bienes nacionales. NOM-001-ECOL-1999.
30. Norma Técnica Colombiana. (NTC-3459) Agua para la elaboración de concreto. 2001
31. Norma Mercosur MN 137:97 "Morteros y hormigón- Agua para el mezclado y curado de mortero y hormigón de cemento portland.
32. LeChevallier, M. (2012). Water Reuse: Restoring Confidence in Our Future. [Documento en línea]. Disponible: <http://eonline.com/articles/2012/06/12/water-reuse-restoring-confidence-in-our-future.aspx> [Consulta: 2012, Junio 23]
33. Pablovilla, M (2010) Patología de la edificación/Estructuras de hormigón/Lesiones. [Documento en línea]. Disponible: http://es.wikibooks.org/wiki/Patolog%C3%ADa_de_la_edificaci%C3%B3n/Estructuras_de_hormig%C3%B3n/Lesiones [Consulta: 2013, Enero 02]

34. Porrero, J.; Ramos, C.; Grases, J. y Velazco, G. (2009). *Manual del Concreto Estructural*. Sidetur, Excelencia Siderúrgica, Caracas.
35. Rodríguez, L. y Simonpietri, M (2002). Diseño de Mezcla para su Uso en la Elaboración de Bloques Aligerados de Suelo-Cemento. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
36. Rodríguez, M (2009). Espectrofotometría ultravioleta. Análisis de nitratos de agua. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú. [Documento en línea]. Disponible: <http://es.scribd.com/doc/42384759/ANALISIS-DE-NITRATOS> [Consulta: 2012, Noviembre 11]
37. Sawyer, Clair, McCarty, Perry. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. Editorial McGraw-Hill. 4 ed. p 556-565. Colombia.
38. Vázquez A. e Ingenieros González F., Rocha L. y Flores J. (2001). *Elaboración de concretos con Agua Tratadas*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.imcyc.com/revista/2001/abril2001/concretos.htm> [Consulta: 2012, Febrero 05].
39. Waddell, J. Manual de la Construcción con Concreto I, Mc Graw Hill, 3a edición, 1997.
40. Zanni, E. (2008). *Patología de la construcción y restauración de obras de arquitectura*. [Documento en línea]. Disponible: http://books.google.co.ve/books?id=5wbqw8YGIC4C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false [Consulta: 2013, Febrero 20].

ANEXOS

A-1. Ensayos a las probetas

A-1.1. Tiempo de fraguado

Tiempo (min)	Penetración de la aguja (mm)	
	Agua Potable	Agua con NO ₃
0	40	40
15	40	40
30	40	40
45	40	40
60	38	35
75	31	34
90	25	16
105	22	4
120	14	3
135	2	0
150	0	-

A-1.2. Ensayos de absorción

Tipo de agua	Probeta	Peso Seco (kg)	Peso Húmedo (kg)	Coefficiente de Absorción (%)	Promedio de Absorción (%)
Agua potable	1	6,554	6,845	4,44	4,37
	2	6,741	7,030	4,29	
Agua con nitratos	1	6,569	6,860	4,43	4,45
	2	6,719	7,021	4,48	

A-1.3. Ensayos de erosión

Tipo de agua	Probeta	Peso Inicial (kg)	Perdida de Material (kg)	Perdida de Material (%)	Perdida de Material Promedio (%)
Agua potable	1	6,554	0,016	0,25	0,26
	2	6,741	0,017	0,26	
Agua con nitratos	1	6,569	0,020	0,31	0,27
	2	6,719	0,015	0,24	

A-1.4. Ensayo de ultrasonido

Agua Potable			
N° Cilindro	Altura (cm)	Tiempo de propagación de la onda (microsegundo)	Velocidad ultrasónica (km/s)
1	30,0	74,8	4011
2	30,1	75,5	3987
3	30,0	76,2	3937
4	30,0	76,6	3916
5	30,0	76,8	3906

Agua con Nitratos			
N° Cilindro	Altura (cm)	Tiempo de propagación de la onda (microsegundo)	Velocidad ultrasónica (km/s)
1	30,2	76,5	3948
2	30,0	78,9	3802
3	30,0	78,0	3846
4	30,1	77,4	3889
5	30,0	77,9	3851

A-1.5. Peso Unitario

Agua Potable				
N° Cilindro	Diámetro promedio (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Peso Unitario (kg/m3)
Día 7				
1	15.2	30.0	12.447	2286
2	15.1	30.0	12.360	2301
3	15.1	30.2	12.358	2285
4	15.3	30.1	12.416	2244
5	15.3	30.0	12.371	2243
Día 14				
1	15.1	30.0	12.442	2316
2	15.0	30.0	12.285	2317
3	15.1	30.0	12.243	2279
4	15.0	30.1	12.222	2298
5	15.2	30.2	12.554	2291
Día 28				
1	15.0	30.0	12.398	2339
2	15.2	30.1	12.275	2247
3	15.2	30.0	12.311	2261
4	15.2	30.0	12.297	2259
5	15.1	30.0	12.539	2334
Día 90				
1	15.2	30.1	12.272	2247
2	15.3	30.0	12.482	2263
3	15.2	30.1	12.363	2263
4	15.0	30.0	12.366	2333
5	15.1	30.0	12.523	2331

Agua con Nitratos				
N° Cilindro	Diámetro promedio (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Peso Unitario (kg/m3)
Día 7				
1	15.0	30.0	12.216	2304
2	15.1	30.2	12.298	2274
3	15.1	30.3	12.401	2285
4	15.1	30.2	12.265	2268
5	15.0	30.1	12.191	2292
Día 14				
1	15.2	30.0	12.423	2282
2	15.0	30.0	12.088	2280
3	15.1	30.1	12.278	2278
4	15.1	30.0	12.344	2298
5	15.0	30.2	12.286	2302
Día 28				
1	15.1	30.2	12.324	2279
2	15.2	30.0	12.437	2285
3	15.1	30.0	12.228	2276
4	15.1	30.1	12.260	2274
5	15.0	30.0	12.390	2337
Día 90				
1	15.0	29.9	12.369	2341
2	15.3	30.0	12.425	2253
3	15.1	30.1	12.419	2304
4	15.1	30.0	12.319	2293
5	15.2	30.0	12.370	2272

A-1.6. Ensayos de resistencia a la compresión de las mezclas realizadas con agua potable

Día 7					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
1	12.447	15.2	30.0	50446	278.00
2	12.360	15.1	30.0	50518	282.10
3	12.358	15.1	30.2	42344	236.45
4	12.416	15.3	30.1	43207	235.01
5	12.371	15.3	30.0	49799	270.86

Día 14					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
1	12.442	15.1	30.0	58526	326.82
2	12.285	15.0	30.0	58422	330.60
3	12.243	15.1	30.0	57238	319.62
4	12.222	15.0	30.1	54532	308.59
5	12.554	15.2	30.2	59831	329.72

Día 28					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
1	12.398	15.0	30.0	59343	335.81
2	12.275	15.2	30.1	66193	364.78
3	12.311	15.2	30.0	67816	373.73
4	12.297	15.2	30.0	58071	320.02
5	12.539	15.1	30.0	62303	347.91

Día 90					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
1	12.272	15.2	30.1	65243	359.55
2	12.482	15.3	30.0	71463	388.69
3	12.363	15.2	30.1	69759	384.43
4	12.366	15.0	30.0	63806	361.07
5	12.523	15.1	30.0	66324	370.36

A-1.7. Ensayos de resistencia a la compresión de las mezclas realizadas con agua con nitratos

Día 7					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
1	12.216	15.0	30.0	41779	236.42
2	12.298	15.1	30.2	43228	241.39
3	12.401	15.1	30.3	41649	232.57
4	12.265	15.1	30.2	36501	203.83
5	12.191	15.0	30.1	34122	193.09

Día 14					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
1	12.423	15.2	30.0	48873	269.33
2	12.088	15.0	30.0	50000	282.94
3	12.278	15.1	30.1	48859	272.83
4	12.344	15.1	30.0	51517	287.68
5	12.286	15.0	30.2	50410	285.26

Día 28					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm2)
1	12.324	15.1	30.2	56963	318.09
2	12.437	15.2	30.0	56072	309.01
3	12.228	15.1	30.0	49081	274.07
4	12.260	15.1	30.1	54074	301.96
5	12.390	15.0	30.0	47581	269.25

Día 90					
N° Cilindro	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm2)
1	12.369	15.0	29.9	55020	311.35
2	12.425	15.3	30.0	60899	331.24
3	12.419	15.1	30.1	52952	295.69
4	12.319	15.1	30.0	54694	305.42
5	12.370	15.2	30.0	55898	308.05