

## MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA TRATADA

HÉCTOR YEPES, HENRY BLANCO Y CÉSAR PEÑUELA  
Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.  
e-mail: h.yepes.ing@gmail.com; henryalbertob@gmail.com

Recibido: enero 2015

Recibido en forma final revisado: febrero 2016

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de mezclas de concreto elaboradas con agua residual doméstica tratada. Se ensayaron cincuenta (50) probetas con mezclas de concreto y seis (6) con pasta de cemento, elaboradas con agua residual doméstica tratada y agua potable como patrón. Se les realizaron ensayos para determinar la resistencia a compresión, la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas y se midió el tiempo de fraguado. Se utilizó cemento Portland Tipo I y un diseño de mezcla de 260 kgf/cm<sup>2</sup> a los 28 días. La velocidad de onda de ultrasonido mostró un material de buena calidad y la diferencia en el tiempo de fraguado inicial y final fue de 8 y 25 minutos respectivamente. El desarrollo de resistencia fue similar, con diferencias menores al 5 %. Se concluye que el agua residual tratada no afecta el comportamiento del concreto en sus principales propiedades bajo las condiciones de este trabajo.

*Palabras clave:* reúso del agua, agua residual, agua de mezclado, concreto, resistencia a compresión

## CONCRETE MIXTURE MADE WITH TREATED DOMESTIC WASTEWATER

### ABSTRACT

This paper aims to analyze the performance of concrete mixtures made with treated domestic wastewater. Fifty (50) trials with concrete mixtures were tested and six (6) cement paste prepared with treated domestic wastewater using drinking water as a standard. Tests were performed to determine the compressive strength and the propagation velocity of ultrasonic waves, and the setting time was measured. Portland cement, type I with a design made with a mixture of 260 kgf/cm<sup>2</sup> after 28 days was used. The ultrasonic wave velocity proved it was a good quality material, and the difference in initial and final setting time was 8 and 25 minutes, respectively. Resistance development was similar, with differences of less than 5%. It is concluded that the treated wastewater does not affect the behavior of concrete as to its main properties under the conditions of this work.

*Keywords:* reuse of water, wastewater, mixing water, concrete, compressive strength

### INTRODUCCIÓN

“El concreto es el segundo producto de mayor consumo en la Tierra, después del agua”, comenta en entrevista con Obras el doctor (Koji Sakai), quien lleva treinta y siete (37) años dedicado a la investigación y difusión de temas relacionados con la producción y el uso del concreto, así como sus repercusiones en el medio ambiente. Cada año se producen en el mundo alrededor de 25.000 millones de toneladas de concreto, que se suman a los más de 85.000 millones de metros cuadrados (m<sup>2</sup>) de edificios ya

construidos en el planeta, según establece la Iniciativa para el Cemento Sustentable. Es por esta razón que el doctor Koji Sakai considera que todos los expertos en concreto deben cambiar las tecnologías actuales de producción y uso de este material, con miras a ofrecer diseños estructurales integrales y construcciones más duraderas, que a la vez sean más amigables con el medio ambiente.

En las mezclas de concreto, el agua representa entre un 15 y un 20 % del volumen total (Porrero *et al.*, 2004). En general, tanto el agua de mezclado como la de curado provienen de los

sistemas de abastecimiento de las ciudades (agua potable). Considerando las limitaciones en la disponibilidad del agua potable y su costo, se vienen desarrollando experiencias del uso de agua no potable, reciclada e inclusive agua residual tratada, como alternativa para contribuir al uso racional del agua como materia prima en la industria de producción del concreto.

En Venezuela, como en otros países, existe una normativa que permite utilizar agua de diferente calidad a la del agua potable para realizar concreto. La norma Covenin 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”, establece que para que un agua distinta al agua potable sea aceptada, las resistencias promedio de tres (3) mezclas preparadas con ella, no deben diferir con las de agua potable en más de un 10 %. De igual forma, presenta que los promedios entre los tiempos de fraguado inicial y final, no deben diferir entre sí en más de 15 y 45 minutos respectivamente.

El uso de agua no potable en la preparación del concreto, ha llamado la atención de investigadores e instituciones de algunos países, quienes han tratado de conseguir alternativas para reemplazar el agua potable de las mezclas de concreto por aguas de menor utilidad y demanda, tal como el agua residual. Evidencia de esto son los estudios realizados en Pakistán, México y Kuwait; muchos de los cuales han arrojado resultados satisfactorios (Yepes, 2013).

En Venezuela, Diéguez (2011) realizó los primeros trabajos en esta área, analizando algunas de las propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual doméstica tratada, procedente de una planta municipal de lodos activados, usando su efluente como reemplazo del agua potable en mezclas de concreto. En este tipo de plantas de tratamiento, comúnmente usadas para aguas residuales domésticas y municipales, se remueven los sólidos suspendidos y gran parte del material orgánico biodegradable disuelto. A este nivel de tratamiento en el agua residual suele llamarse secundario o tratamiento biológico.

A pesar de que las características químicas del agua residual tratada cumplieran la norma COVENIN 2385-2000, la resistencia a compresión del concreto presentó una diferencia mayor al 10 % permitido por esta norma. Diéguez (2011) atribuyó este comportamiento a la presencia de nitratos en el agua de mezclado (11,5 mg/l N) y a un diseño de mezcla de alta resistencia con un cemento Tipo III. Recomendó caracterizar los otros componentes de la mezcla (cemento y agregados) para analizarla en forma integral.

Con base en estos resultados y los obtenidos por otros investigadores, se planteó el siguiente trabajo, cuyo objetivo es analizar integralmente el comportamiento de mezclas de concreto elaboradas con agua residual doméstica tratada en sustitución del agua potable.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

La selección del agua residual doméstica tratada fue realizada con base al tipo de sistemas para el tratamiento de aguas residuales domésticas más común en Venezuela, lodos activados, y de acuerdo a una evaluación previa de las condiciones de operación y su cumplimiento con la calidad del efluente establecido por la normativa, Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5021. “Normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”.

Con el fin de tener mayor precisión en la comparación del agua residual doméstica tratada con el agua potable, se utilizó agua potable procedente del acueducto de abastecimiento de la comunidad de la residencia Vista Daymar, ubicada en la población de Parque Caiza del Estado Miranda, cuyas aguas residuales posteriormente eran tratadas en el sistema de lodos activados seleccionado. De esta manera, el agua potable usada en las mezclas de concreto era el origen del agua residual doméstica tratada.

Previo a la realización de los ensayos con las mezclas de concreto, se registraron las condiciones del funcionamiento de la planta de lodos activados y se verificó que el efluente cumpliera con los requerimientos de calidad del agua establecidos en la normativa referida anteriormente.

Para realizar los ensayos del concreto en estado fresco y endurecido, se utilizó un diseño de mezcla según método de Porrero *et al.* (2004), con un asentamiento de 6,35 cm (2,5”), una relación agua cemento ( $\alpha$ ) de 0,43, relación entre agregados ( $\beta$ ) de 0,494 y una resistencia a compresión a los 28 días de 260 kgf/cm<sup>2</sup>.

Los agregados utilizados en este trabajo fueron canto rodado de río triturado con tamaño máximo de 1” y arena lavada de río con tamaño máximo 3/8”. Estos agregados fueron caracterizados por la empresa que los suministró, mediante los ensayos de granulometría, peso específico, peso unitario, porcentaje de absorción, colorimetría y disgregabilidad a los sulfatos.

Se utilizó cemento Portland gris Tipo I, cuyas características físicas y químicas fueron suministradas por el fabricante, Empresa Venezolana de Cementos S.A.C.A.

Algunas de estas características son: tiempo de fraguado, finura, porcentajes de los distintos componentes y resistencia a la compresión.

La caracterización del agua de mezclado, tanto potable como agua residual doméstica tratada, fue realizada por el laboratorio de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela, mediante las determinaciones analíticas típicas para aguas y aguas residuales (APHA-AWWA-WEF, 2000). Entre estas características están el pH, sólidos disueltos, cloruros, sulfatos, nitratos y DQO. Una vez caracterizados los componentes de la mezcla de concreto (cemento, agua y agregados), se procedió a realizar los ensayos del concreto en estado fresco y endurecido.

El tiempo de fraguado fue determinado por resistencia a la penetración, de seis (6) probetas de una pasta de 500 g de cemento y 125 ml de agua; tres (3) elaboradas con el agua residual doméstica tratada y tres (3) con agua potable, según la Norma Covenin 493:1992 “Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de vicat”.

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron a los 7, 14, 28, 90 y 365 días; se utilizaron cinco (5) probetas cilíndricas por edad y por mezcla, lo que implicó un total de cincuenta (50) probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto. Este ensayo se ejecutó según lo establecido en la norma Covenin 338:2002 “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”.

A tres (3) cilindros de cada mezcla por edad, seleccionados al azar, se les realizó el ensayo de ultrasonido según norma Covenin 1681:1980 “Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto”.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presenta un resumen de las características del cemento utilizado. Después de compararlas con los requisitos de la Norma COVENIN 28:93 “Cemento Portland. Especificaciones”, se puede concluir que las características del cemento utilizado corresponden con las de un cemento Portland Tipo I, además comercializado como tal para la construcción.

**Tabla 1.** Características del cemento Portland Tipo I utilizado en las mezclas

<b>Cemento Portland Gris Tipo I Planta de Pertigalete, Venezolana de Cementos</b>		<b>Norma COVENIN 28:93</b>
Fineza (Blaine) m <sup>2</sup> /kg	350	Valor promedio mínimo 280
Fraguado de Vicat (minutos) Inicial	115	> 45
Fraguado de Vicat (minutos) Final	195	< 480
Resistencia. Compresión (kgf/cm <sup>2</sup> ) 28 d	390	> 280
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A)	7,2	-
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)	55	-

En la tabla 2 se presenta un resumen de las características principales de los agregados utilizados en este trabajo.

La arena presentó una caracterización típica de un agregado fino. Por su parte, el agregado grueso tiene poca absorción, alta densidad y buena resistencia al desgaste y a la abrasión. Al analizar esta caracterización se puede decir que los agregados utilizados fueron de buena calidad.

Adicionalmente, según los resultados de ensayos de colorimetría, disgregabilidad a los sulfatos y curvas granulométricas que fueron suministrados por la empresa Premezcladora Ávila que suministró este material, la arena presentó una granulometría bien gradada, con ligera tendencia hacia la fracción gruesa, con bajo contenido de materia orgánica y resistente a la disgregabilidad.

Estas condiciones y características de los agregados garantizan una mezcla adecuada del concreto, debido a que pueden ser considerados como típicos de los utilizados para la elaboración de concreto.

La tabla 3 contiene algunos de los parámetros que caracterizan el agua de mezclado: agua potable y agua residual doméstica tratada. Al igual que en los otros componentes de la mezcla, el agua cumple con los requerimientos establecidos en la Norma COVENIN 2385-2000.

**Tabla 2.** Características de los agregados utilizados en las mezclas de concreto

Característica	Agregado fino	Agregado grueso
Tipo	Arena lavada 3/8"	Canto rodado triturado 1"
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,88
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1530	1500
% de absorción	1,50	0,6
Módulo de finura	3,86	--
Desgaste los Ángeles	--	10,9

**Tabla 3.** Caracterización del agua de mezclado utilizada en las mezclas

Parámetro	Agua potable	Agua residual tratada	Norma COVENIN 2385:2000
Sólidos disueltos (mg/l)	144	324	5000
Cloruro (mg/l)	13	40	500*
Materia orgánica – DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	Inapreciable	100	250**
pH	6,9	7,1	5,0 – 7,5
Nitrato (mg/l N)	0,1	1,12	No se regula

\*Son limitados por su posible efecto corrosivo de las armaduras cuando la obra está situada en un ambiente agresivo o en cualquier ambiente cuando se trata de armaduras tensadas. Si no se dan estas circunstancias son aceptables hasta 2000 mg/l en el agua de mezclado.

\*\* Es limitada por la posibilidad de que esté constituida por azúcares que pueden alterar los tiempos de fraguado de la mezcla. Si se comprueba químicamente que no se trata de azúcares, son aceptables hasta 5000 mg/l.

La calidad del agua residual doméstica tratada cumplió con los valores de los parámetros establecidos en la norma como requisitos mínimos, razón por la cual, desde el punto de vista químico, esta agua puede ser usada como agua de mezclado para concretos y morteros.

Con respecto a los resultados presentados en las tablas anteriores, correspondientes a los componentes de la mezcla de concreto, todos ellos cumplen con las respectivas normas, por lo cual pueden ser utilizados para la elaboración de concreto.

A continuación, se presentarán algunos de los resultados en términos de las propiedades físicas de este concreto, elaborado con los materiales descritos anteriormente.

En la tabla 4 se presentan los resultados que se obtuvieron del tiempo de fraguado. En términos generales, se pudo constatar que el tiempo de fraguado de una pasta de cemento

elaborada con agua residual doméstica tratada fragua más lento que una pasta elaborada con agua potable. Esto se debe a que el agua residual tratada aún contiene materia orgánica, que al participar en el proceso de hidratación del cemento, por lo general, produce retardos del tiempo de fraguado, tal como se reporta en todas las referencias consultadas.

Sin embargo, las diferencias entre los tiempos de fraguado de las pastas elaboradas con agua residual tratada y con agua potable no son importantes (8 minutos en el fraguado inicial y 25 en el final). Inclusive si se consideran como referenciales los valores establecidos en la mencionada Norma COVENIN 2385-2000, se puede decir que están dentro de los valores límites establecidos (ver tabla 4).

**Tabla 4.** Tiempo de fraguado promedio de las pastas de cemento elaboradas con agua residual doméstica tratada y agua potable

	Tipo de agua	Promedio (minutos)	Diferencia (minutos)	COVENIN 2385-2000
<b>Tiempo inicial (min)</b>	Potable	99	8	< 15
	Residual Doméstica Tratada	107		
<b>Tiempo final (min)</b>	Potable	175	25	< 45
	Residual Doméstica Tratada	200		

A continuación, se presenta en la tabla 5 el promedio de las velocidades de pulso ultrasónico obtenidas para cada edad de ensayo y para cada mezcla ensayada.

**Tabla 5.** Velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros de concreto elaborados con agua residual doméstica tratada y con agua potable

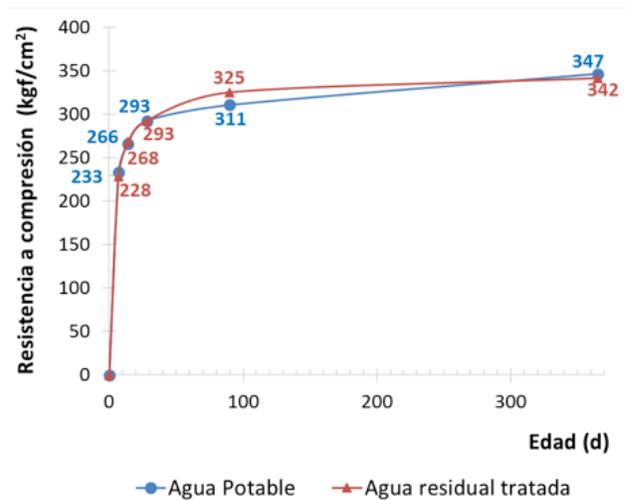
Velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el concreto (m/s)		
Edad (d)	Agua residual tratada	Agua potable
7	4121	3926
14	3973	3944
28	4188	4232
90	4353	4302
365	4259	4250

Al analizar el conjunto de los resultados que se obtuvieron en este ensayo, se puede decir que la diferencia de velocidades de pulso fue pequeña, razón por la cual las resistencias en las probetas deben ser similares.

También se puede apreciar en la tabla 5, para las edades de 7, 14 y 90 días, que la velocidad de pulso fue ligeramente mayor en las probetas elaboradas con agua residual tratada. Este comportamiento permite afirmar que las probetas elaboradas con agua residual tratada fueron ligeramente menos porosas.

Otro de los aspectos importantes a destacar, de acuerdo a los valores obtenidos, es que se califica el concreto de ambas mezclas como “Bueno”, ya que las velocidades de pulso ultrasónico se encontraron entre 3660 y 4575 m/s (Malhotra, 1985).

En la figura 1 se presenta la resistencia promedio a la compresión de las probetas cilíndricas del concreto elaborado con agua residual tratada y con el agua potable a las edades de 7, 14, 28, 90 y 365 días.



**Figura 1.** Resistencia a la compresión de concreto elaborado con agua residual doméstica tratada y agua potable

Analizando los resultados obtenidos para ambas mezclas, se observa que, en los ensayos correspondientes a la edad de 7 días, los cilindros producidos con el agua potable obtuvieron una resistencia a la compresión que superó en apenas un 2,1 % a la resistencia generada por las probetas elaboradas con agua residual tratada.

Es solo a la edad de 7 días, donde se supera la resistencia a la compresión, ya que en el resto de las edades se igualan estos valores e inclusive, el concreto elaborado con el

agua residual tratada, supera ligeramente la resistencia a compresión alcanzada con el agua potable a medida que transcurre el tiempo, siendo más apreciable a los 90 días, donde la diferencia alcanzó un 5 % aproximadamente.

Al año, esta diferencia se acortó y las resistencias difieren apenas en 1,5 % a favor del agua potable. Por tanto, se puede concluir que no existen diferencias apreciables en las resistencias a compresión obtenidas con el agua residual doméstica tratada y agua potable.

Este comportamiento se puede atribuir a que como el agua residual tratada genera un leve retraso en el tiempo de fraguado de la mezcla, a edades tempranas, el concreto producido con el agua potable toma una ligera ventaja en el desarrollo de las resistencias. En el concreto producido con el agua residual doméstica tratada, al terminar de activarse su proceso de hidratación, comienza a generar resistencias de manera más acelerada que el agua potable para alcanzarla en el proceso típico de desarrollo de resistencias.

En el tiempo tienden a estabilizarse e ir en un proceso similar en este desarrollo, en el cual una puede estar en algún momento por encima de la otra, pero siempre con resistencias similares.

En la tabla 6, se puede observar que en términos generales la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (V) de los cilindros de concreto producidos con agua potable fueron menores que la obtenida para los cilindros de concreto elaborados con agua residual tratada; siendo las probetas elaboradas con agua potable más estables en su comportamiento.

**Tabla 6.** Desviación estándar y coeficiente de variación de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas de concreto elaboradas con agua residual tratada y agua potable

Edad(d)	Estadístico	Agua potable	Agua residual tratada
7	S (kgf/cm²)	18,2	24,8
	V	7,8	10,9
14	S (kgf/cm²)	1,8	18,83
	V	0,7	7,02
28	S (kgf/cm²)	16,19	28,5
	V	5,53	9,73
90	S (kgf/cm²)	20,1	24,8
	V	6,5	7,6

S: Desviación estándar

V: Coeficiente de Variación

## CONCLUSIONES

-El tiempo de fraguado de la mezcla elaborada con agua residual doméstica tratada fue ligeramente mayor que el de la mezcla elaborada con agua potable, debido fundamentalmente al contenido de materia orgánica.

- Las diferencias promedio en los tiempos de fraguado inicial y final de las mezclas preparadas con agua residual doméstica tratada y agua potable fueron 8 y 25 minutos, respectivamente.

- Los ensayos de ultrasonido reflejan una buena calidad del concreto y no presentan diferencias importantes entre las mezclas de concreto preparadas con agua potable y agua residual doméstica tratada.

- El agua residual doméstica tratada puede ser utilizada como agua de mezclado, ya que cumple con los requisitos físicos y químicos establecidos en la norma Covenin 2385-2000 "Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos".

Finalmente se puede concluir que es posible utilizar agua residual doméstica tratada para la elaboración de concreto, sin afectar sus propiedades básicas, utilizando agregados convencionales de buena calidad y cemento Portland tipo I. Sin embargo, siempre será necesario caracterizar los componentes de la mezcla de concreto: agua-cemento-agregados, así como hacer los ensayos del concreto en estado fresco y endurecido para verificar que efectivamente no se modifica su comportamiento.

## REFERENCIAS

APHA, AWWA, WEF (2000). Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20th edition.

COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). "Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat". 493-1992.

COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. 2da Revisión 338-2002.

COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Método de ensayo para determinar la propagación de ondas en el concreto. 1681-1980.COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES (COVENIN). Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos. 1era Revisión. 2385-2000.

DIÉGUEZ, V. (2011). Propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual tratada. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

GACETA OFICIAL EXTRAORDINARIA DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA N° 5.021 (1995): Normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos, Decreto N° 883. Caracas.

MALHOTRA, 1985; CP SOLÍS, R.; MORENO, I. Y CASTILLO, W. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica. Universidad de Yucatán. México. Extraído el 4 de noviembre de 2013 desde <http://www.redalyc.org/articulo.oa>

PORRERO, J; RAMOS, C; GRASES, J. Y VELAZCO, G. (2004): Manual de Concreto Estructural. Siderur, Excelencia Siderúrgica, Caracas.

YEPES, G. HÉCTOR, D. (2013). Comportamiento de Mezclas de Concreto Elaboradas con Agua Residual Tratada. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.