



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

VALENCIA, G.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; BARRERA, J.; DELVASTO, S.  
Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de  
bagazo de caña de azúcar  
Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 2, agosto, 2012, pp. 112-122  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127625512005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Durability and Corrosion  
Study of reinforced blended  
mortars with tuff and sugar  
cane bagasse ash*

# **Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña de azúcar**



## **Autores**

**VALENCIA, G.** Universidad del Valle,  
williams8611@univalle.edu.co  
Cali, Colombia

**MEJÍA DE GUTIÉRREZ R.** Universidad del Valle,  
ruby.mejia@correo.univalle.edu.co  
Cali, Colombia

**BARRERA J.** Universidad del Valle  
material@univalle.edu.co  
Cali, Colombia

**DELVASTO S.** Universidad del Valle,  
silvio.delvasto@correo.univalle.edu.co  
Cali, Colombia

**Fecha de recepción** 24/03/2012

**Fecha de aceptación** 24/07/2012

## Resumen

En este artículo se presenta la evaluación de las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros adicionados con una toba volcánica (TV) y una ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC), incorporadas en proporción del 10 y 20%, en sustitución al cemento. Los materiales de partida fueron caracterizados mediante las técnicas de Fluorescencia de Rayos X, Granulometría Láser, Difracción de Rayos X (DRX), y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB y EDS). En los morteros adicionados se realizaron ensayos de resistencia mecánica a la compresión y de durabilidad (absorción y porosidad, succión capilar, permeabilidad a cloruros y susceptibilidad a la carbona-

tación). Adicionalmente, se estudió el comportamiento frente a la corrosión del acero estructural embebido, expuestos a tres diferentes medios: agua potable, cloruro de sodio (NaCl al 3,5%) y presencia de CO<sub>2</sub>; este último se realizó en cámara ambiental a condiciones aceleradas (1% CO<sub>2</sub>, 100% CO<sub>2</sub>, 65 H.R. % y 25 °C). Se comprueba que las características de la adición (composición química, morfología y tamaño de partícula) son determinantes para el adecuado desempeño del material, y que la resistencia mecánica no es un parámetro que permita concluir acerca de la durabilidad de un material en un determinado ambiente de exposición.

**Palabras clave:** Ceniza de bagazo de caña de azúcar, toba volcánica, cementos adicionados, propiedades mecánicas y corrosión.

## Abstract

*This article presents the evaluation of mechanical and durability properties of blended mortars. A volcanic tuff (TV) and an ash of sugar cane bagasse (CBC), in proportion of 10 to 20% cement replacement, were used as additions. The raw materials were characterized using the techniques of X-Ray Fluorescence, laser granulometry, X-ray diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM and EDS). In blended mortars were performed compressive strength and durability tests (absorption and porosity, capillary suction, chloride permeability and susceptibility to carbonation). Additionally, the corrosion behavior of*

*embedded structural steel exposed to three different media: water, sodium chloride (NaCl 3,5%) and presence of CO<sub>2</sub>, was studied. The susceptibility to carbonation was realized in an environmental chamber at accelerated conditions (1 % CO<sub>2</sub>, 100% CO<sub>2</sub>, 65% RH and 25 °C). It is found that the characteristics of the addition (chemical composition, morphology and particle size), are crucial for a good performance of the blended mortars, and the mechanical strength is not a definitive parameter to conclude about the durability of a material in a given environment exposure.*

**Keywords:** Ash of sugar cane bagasse, volcanic tuff, blended mortars, mechanical properties and corrosion.

## 1. Introducción

En el sector de la construcción civil, los materiales compuestos más utilizados son los concretos reforzados con acero estructural, estos materiales deben tener un desempeño óptimo para evitar daños catastróficos como la falla de una estructura, por ejemplo, debido al debilitamiento de sus refuerzos de acero por la acción corrosiva de un ambiente fuertemente agresivo como el marino y el industrial que presentan agentes nocivos tales como el ion cloruro y el dióxido de carbono. Al respecto, los diferentes países han desarrollado normativas que, con base en la clasificación del ambiente de exposición, sirven de guías orientativas para la adecuada selección de los materiales y diseño del concreto. En particular, la norma colombiana NTC 5551, de forma similar a la norma europea EN 206-1, subdivide los ambientes en las siguientes clases: Tipo 1, Ningún riesgo de corrosión o ataque; Tipo 2, Corrosión inducida por carbonatación; Tipo 3, Corrosión inducida por cloruros del agua de mar; Tipo 4, Corrosión inducida por cloruros diferentes a los que provienen del agua de mar; Tipo 5, Ataque por hielo y deshielo; Tipo 6, Ataque químico; y Tipo 7, Desgaste. Acorde al tipo de ambiente, la acción sobre el material será de tipo físico o de naturaleza química y podrá causar desde aparición de manchas y eflorescencias, agrietamiento, delaminación hasta el colapso final de la estructura.

Una característica del concreto que controla el ingreso de los agentes agresivos es su permeabilidad, en este sentido la incorporación de las adiciones puzolánicas al cemento han sido una estrategia exitosa para combatir el problema de la corrosión en materiales cementicios, debido particularmente a las modificaciones microestructurales que generan y la disminución de la permeabilidad, como consecuencia del refinamiento de poro y el incremento en la tortuosidad del sistema (Almeraya et al., 1998; López y Castro, 2010). En este sentido, en el presente trabajo se estudia el desempeño de dos materiales: una ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) y una toba volcánica (TV), con el fin de determinar el potencial de utilizarlas como adiciones puzolánicas al cemento e incrementar la vida útil del acero de refuerzo en presencia de Cloruros y de CO<sub>2</sub>.

Cabe anotar, que este tipo de adiciones, de diferentes procedencias y calidad, han sido estudiadas por otros investigadores quienes reportan contribuciones tanto en la fluidez de las mezclas como en las resistencias mecánicas y de durabilidad de los morteros y concretos (Abali et al., 2006; Ghrici et al., 2007; Ganesan et al., 2007, Oliveira et al., 2010). Particularmente se han desarrollado un número apreciable de estudios para

investigar la viabilidad de utilización de la ceniza de bagazo de caña como adición al cemento (Martinera et al., 1998; Paya et al., 2002; Singh et al., 2000; Cordeiro et al., 2008, 2009); al respecto, hay un acuerdo común en que este material actúa como una puzolana, pero su actividad es función de varios parámetros entre los cuales se debe considerar su composición química, en especial el contenido de inqueados, el tamaño de partícula y su superficie específica (Cordeiro et al., 2008). Asimismo se afirma que la temperatura de quema es determinante en su desempeño; Morales et al. (2009), reportan que la temperatura de calcinación no solo influencia la composición mineralógica de las cenizas sino también la morfología y la composición individual de sus partículas. Fairbairn et al. (2010) realizó un estudio complementario, desde el punto de vista del efecto ambiental, y reporta que el reemplazo de cemento por CBC reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en proporciones apreciables. El porcentaje óptimo de adición de CBC recomendado por la mayoría de investigadores para lograr incrementos resistentes, permeabilidad reducida al agua, mayor resistencia a la penetración de cloruros y una menor liberación de calor en la mezcla de cemento es del 20% (Chusilp et al., 2009; Ganesan et al., 2007; Horsakulthai et al., 2011). En una investigación reciente, Rukzon y Chindaprasirt (2012) afirman que es posible obtener concretos de alta resistencia a la compresión (65.6-68.6 MPa a 28 días) con la adición del 30% de CBC, siempre y cuando el tamaño de partícula sea reducido; en este sentido coincide con las investigaciones realizadas por Cordeiro et al. (2009), quienes adicionalmente reportan que una molienda ultrafina de la adición puede a su vez modificar positivamente el comportamiento reológico de las mezclas. Sin embargo, es importante anotar que no todas las CBC presentan igual comportamiento, Frías M. et al. (2011) evalúan CBC procedentes de la cogeneración eléctrica de diferentes fuentes en Brasil y reportan calidades muy variables. Cabe anotar, que otros investigadores han utilizado la ceniza de bagazo de caña también como reemplazo de arena en concretos y en la producción de materiales cerámicos con resultados igualmente positivos (Sales and Araujo 2010; Souza et al., 2011).

Los materiales de origen volcánico tales como las tobas han sido igualmente objeto de estudio y se incluyen dentro de la clasificación de puzolanas naturales (tipo N) en la Norma ASTM C618. Básicamente están compuestas por material vítreo y otros minerales; sus características físicas y químicas, así como sus efectos al incorporarse al cemento como adición están directamente relacionados con la fuente de origen (Liebig and Althaus 1998; Siddique 2008). Acorde a las características físicas de la toba, particularmente el contenido vítreo, se han desarrollado materiales cementicios con

elevados porcentajes de adición (50%) que presentan propiedades mecánicas comparables al concreto sin adición y mejores desempeños en ambientes agresivos (Uzal and Turanli 2003; Turanli 2005).

## 2. Materiales y proceso experimental

Los materiales utilizados en el presente estudio corresponden a una ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) y una toba volcánica (TV) procedentes de las Antillas (*Guadeloupe*), y un cemento portland tipo III colombiano (OPC), cuyas características fisicoquímicas se presentan en la Tabla 1. La CBC y TV fueron incorporadas en la mezcla en diferentes proporciones (0%, 10% y 20%) como reemplazo del cemento portland. Estos materiales se caracterizaron mediante técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB); además se determinó el tamaño de partícula promedio, por la técnica de granulometría láser, este parámetro se ha incluido en la tabla 1. Los morteros se elaboraron con arena de Ottawa en proporción Cementante: Arena de 1:2,75, con una relación agua/cementante (a/C) constante de 0,5. Las probetas se curaron sumergidas bajo agua saturada con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , por un periodo de 28 y 90 días a temperatura ambiente. La resistencia mecánica a compresión se evaluaron a las mismas edades.

**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados

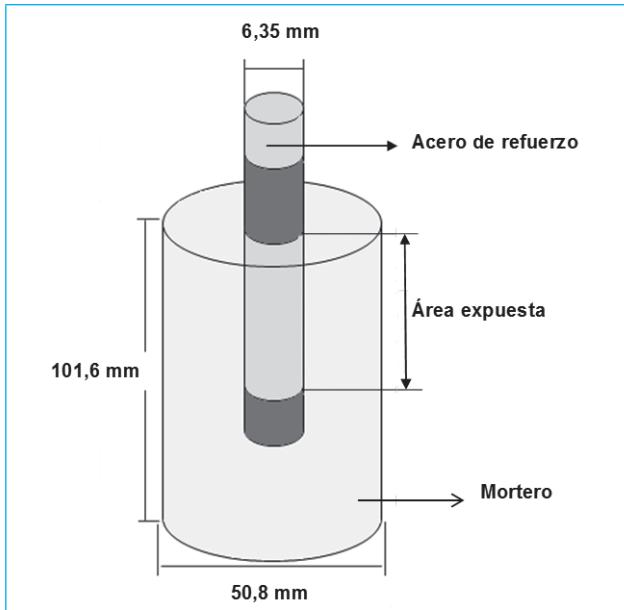
Composición, %	OPC	TV	CBC
$\text{SiO}_2$	20,47	46,03	70,05
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,12	21,60	8,50
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,36	10,46	3,10
$\text{MgO}$	4,05	8,67	0,50
$\text{CaO}$	63,26	11,76	2,80
Pérdidas por Calcinación	1,31	0,59	8,50
Tamaño Partícula Promedio, $\mu\text{m}$	22,92	48,08	13,98

Para la realización de los ensayos se siguieron las normas correspondientes: resistencia a la compresión (ASTM C109), propiedades de Absorción y porosidad (ASTM C642), Succión Capilar (SIA 162/1, ASTM

C1585), y permeabilidad a Cloruros (ASTM C1202). La susceptibilidad a la carbonatación se evaluó en especímenes de morteros curados durante 28 días y el ensayo se realizó en una cámara bajo condiciones aceleradas (1%  $\text{CO}_2$ , 65% HR y 25 °C); el avance de la carbonatación se determinó mediante la aplicación de un indicador de pH (fenolftaleína), procedimiento que se llevó cabo por periodos de 15 días hasta los 150 días de exposición.

Para los ensayos electroquímicos se utilizaron morteros reforzados a nivel central con una varilla de acero corrugado de bajo contenido de carbono y con un diámetro de 6,35 mm. Previamente al acero se le realizó un preacondicionamiento superficial, que consistió en un decapado y posterior recubrimiento con pintura anticorrosiva para delimitar la zona de exposición, tal como se observa en la figura 1. Luego del curado por 28 días, las muestras fueron expuestas a tres medios: agua potable,  $\text{NaCl}$  3,5% y  $\text{CO}_2$  al 1% por 150 días. En estas probetas se determinó el potencial de corrosión del acero de refuerzo acorde a la norma ASTM C876, y la velocidad de corrosión mediante la técnica electroquímica de Resistencia a la polarización lineal (LPR). Para la realización de la técnica LPR se siguió la norma ASTM G59, con barridos de potencial en un rango de  $\pm 20 \text{ mV}$ ; como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de Plata/Cloruro de Plata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ). Para el cálculo de la corriente de corrosión se utilizó como valor de  $B = 0,026 \text{ V}$ , que simula condición activa.

**Figura 1:** Montaje del mortero reforzado



### 3. Resultados y discusión

#### Caracterización de las adiciones: CBC y TV

Según la composición química de CBC y TV, presentada en la tabla 1, se puede apreciar que cumplen con lo especificado por la norma ASTM C618 para materiales de adición de carácter puzolánico, la cual especifica que la sumatoria de los óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  debe ser igual o superior al 70%, además que la pérdida por calcinación debe ser inferior al 10%. La morfología de la CBC, observada por MEB, muestra la combinación de partículas esféricas con partículas irregulares (Figura 2(a)), esto se atribuye a que el material procede de una caldera industrial que utiliza como combustible mezcla de carbón y bagazo de caña, por esta razón se pueden observar cenoesferas y pleuroesferas, que contienen dentro de ellas diminutas esferas (Figura 2(b)), lo cual es típico de la morfología de las cenizas volantes obtenidas en el proceso de combustión del carbón. En la TV se presenta una morfología de tipo prismática (Figura 2(c) y d)).

La caracterización mineralógica de CBC, mediante la técnica de difracción de rayos X (Figura 3), indica que posee fase amorfa y fase cristalina, esta última enriquecida en cuarzo (Q), aunque también se puede apreciar la presencia de cristobalita (Cr) y calcita (Cc). En TV se encontraron fases cristalinas tales como cuarzo (Q), feldespatos (F) y montmorillonita (M).

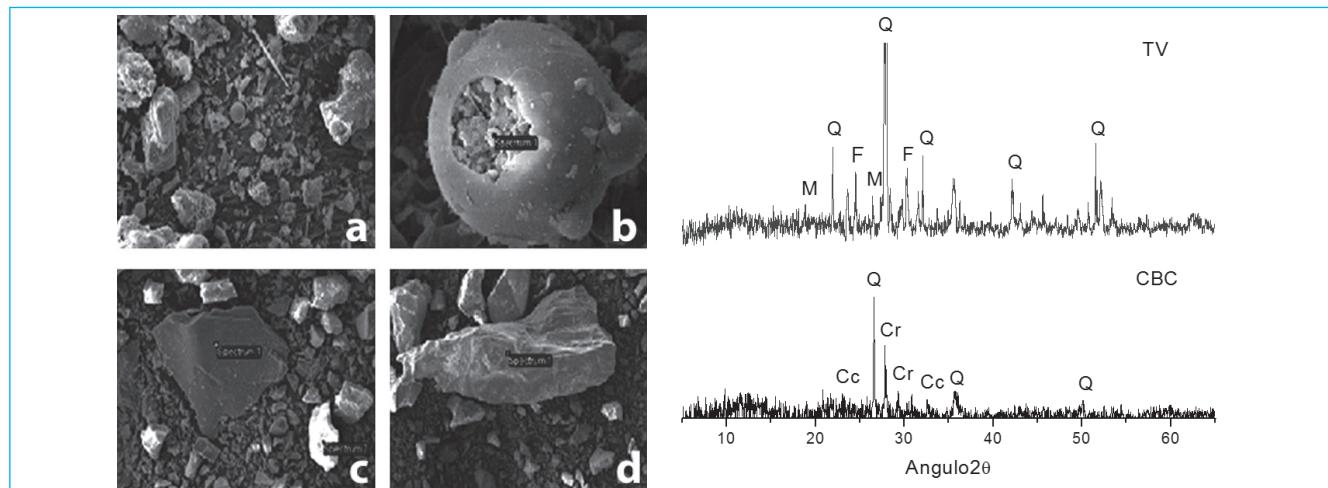
La actividad puzolánica se evaluó según la norma ASTM C 311, comparando la resistencia a la compresión

de morteros de cemento portland adicionados con el 20% de CBC y TV, en sustitución del cemento, y la de los morteros sin adición (0%); se obtuvo un índice de actividad puzolánica de 78,74% para CBC y de 99,05% para TV, superando así, en ambos casos, el 75% establecido por la norma ASTM C 311.

#### Resistencia mecánica a compresión de morteros adicionados

La resistencia a la compresión se determinó a edades de curado de 28 y 90 días, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2. A los 28 días de curado se observa que los morteros adicionados con el 10%, tanto de CBC como de TV, presentan un incremento en la resistencia a la compresión en comparación al mortero sin adición, en órdenes de hasta un 42%; este efecto en las propiedades mecánicas ha sido reportado por otros investigadores (Águila y Sosa, 2008; Ganesan *et al.*, 2007). A los 90 días de curado los morteros adicionados con el 20% de TV presentaron un incremento en la resistencia a la compresión de un 78,5% en comparación a los morteros sin adición; los correspondientes del 20% CBC presentan un menor desarrollo resistente, con un incremento del orden del 7,6%. En general, se destaca el mayor desarrollo resistente de los morteros adicionados con TV, lo cual concuerda con la mayor actividad puzolánica reportada por esta adición, independientemente de su mayor tamaño de partícula (Tabla 1). Cabe anotar que, para la evaluación de las propiedades de durabilidad se seleccionaron las mezclas con 10% de adición.

Figura 2. SEM de CBC y TV Figura 3. DRX de CBC y TV



**Tabla 2.** Resistencia a la Compresión de Morteros

Resistencia a la Compresión (MPa)	Adición, %				
	0	10 CBC	20 CBC	10 TV	20 TV
28 días	12,28	16,16	9,67	17,45	12,16
90 días	16,07	19,12	17,29	21,03	28,69

## Estudios de durabilidad de morteros adicionados

### Ensayos de absorción al agua

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de absorción y porosidad total, evaluados mediante la aplicación de la norma ASTM C642, para los morteros de referencia (0% de adición) y los morteros adicionados en un 10%, a una edad de curado de 28 días. Se puede observar que estos últimos presentan un ligero incremento en los valores de estas propiedades respecto a las reportadas por el mortero sin adición, aunque entre sí son aparentemente similares en su desempeño. Sin embargo, el ensayo de absorción capilar (SIA 162/1, ASTM C1585), incluido en la misma tabla, muestra un mayor coeficiente de absorción capilar ( $K$ ) y una menor resistencia a la penetración de agua ( $m$ ) para los morteros adicionados con TV contrastando con la mayor resistencia mecánica reportada por estos; mientras para CBC estos valores son aproximadamente de orden similar a los reportados por el mortero patrón. Estos resultados se atribuyen al mayor tamaño de partícula de la toba volcánica, el cual es el doble del cemento y casi cuatro veces el correspondiente de CBC. Teniendo en cuenta los incrementos en resistencia mecánica con el tiempo de curado se esperaría igualmente que estas propiedades de absorbividad sean mejoradas concordando con resultados reportados por otros investigadores (Siddiqui 2011; Chusilp *et al.*, 2009; Quintana 2005; y Ganesan *et al.*, 2007).

**Tabla 3.** Resultados de ensayos de permeación

Ensayos	Adición, %		
	0	10 TV	10 CBC
Absorción total, %	7,55	8,58	8,77
Densidad aparente, Kg/m <sup>3</sup>	2460	2390	2470
Vol. poros permeables, %	15,64	17,02	17,81
$K$ (Kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> )	0,004	0,007	0,004
$m$ (10 <sup>-8</sup> s/m <sup>2</sup> )	6,04	2,7	6,35
Porosidad efectiva $\epsilon_e$ (%)	9,75	11,04	10,33

### Permeabilidad a cloruros

La permeabilidad al ion cloruro se determinó con base en la norma ASTM C1202, que corresponde a un ensayo de penetración rápida de cloruros (RCPT), esta es una medida eléctrica que consiste en el monitoreo de la corriente eléctrica que pasa a través de un espécimen cilíndrico de concreto, al aplicar 60V durante 6 horas; la integración de la gráfica corriente vs tiempo da origen a la medida de la carga pasada en unidades de culombios. Con base en los valores de carga pasada, la permeabilidad de los concretos se clasifica en alta, moderada, baja, muy baja o despreciable. Esta clasificación no puede ser aplicada en el presente estudio debido a que el ensayo se ha realizado en morteros, sin embargo, el concepto, de mayor o menor resistencia al paso de los iones cloruros, continúa siendo válido. Los resultados obtenidos en el ensayo (Tabla 4) indican un aumento en la carga para los morteros adicionados con CBC y TV de 2 y 5 veces, respectivamente, comparados al mortero de referencia. De igual manera la medida de la resistividad de los morteros, es significativamente inferior. Los resultados anteriores concuerdan con lo observado en los ensayos de absorción de agua para los morteros adicionados utilizados en la presente investigación (Ramezanianpour *et al.*, 2011). Los resultados aquí reportados son contrarios a los esperados para materiales de adición con características puzolánicas comprobadas, como es el caso de la TV (Ganesan 2007; del Valle A. *et al.*, 2010; Quintana 2005, Torres and Mejía, 2007); este comportamiento es atribuido a su morfología y excesivo tamaño de partícula. Lo anterior, indica la importancia de las características fisicoquímicas de los materiales de adición y ponen en duda la calidad de los materiales evaluados en este trabajo como potencial recubrimiento frente a la corrosión del acero estructural, particularmente en presencia de cloruros (Andrade 2009).

**Tabla 4** Resultados de Permeabilidad a Cloruros y Resistividad

Ensayo	Adición, %		
	0	10 TV	10 CBC
Carga (Culombios)	1411	7208	3008
Resistividad (Ω.m)	136,73	26,07	54,82

### Susceptibilidad a la penetración de CO<sub>2</sub>

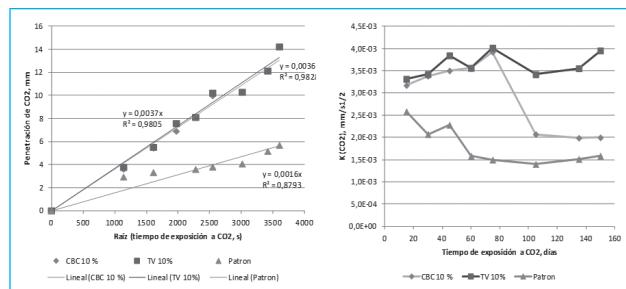
La resistencia a la penetración de CO<sub>2</sub> se determinó mediante la exposición de los especímenes en cámara

ambiental a condiciones de 1% CO<sub>2</sub>, 65% HR y 25 °C. El coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> puede ser obtenido por medio de la ecuación (1), donde X representa la profundidad del frente de carbonatación (mm) a un tiempo de t (s) de exposición y K<sub>C</sub> representa el coeficiente de carbonatación y por tanto la velocidad de penetración, expresada en mm/s<sup>1/2</sup>.

$$X = K_C \times \sqrt{t} \quad (1)$$

En la figura 4a se presenta la penetración de CO<sub>2</sub> en los morteros hasta los 150 días de exposición; se aprecia un comportamiento similar para los morteros adicionados entre sí y una mayor susceptibilidad a la carbonatación con respecto al mortero patrón. Cabe anotar, que a medida que transcurre el tiempo de exposición, en todos los especímenes, aparentemente se presenta una reducción en la velocidad de penetración la cual puede atribuirse a un efecto de taponamiento de poros por precipitación del carbonato de calcio producido en la reacción de carbonatación (Figura 4b); este efecto aparentemente tiende a estabilizar el coeficiente de carbonatación (K<sub>C</sub>). El tiempo de exposición al que ocurre este efecto y el valor del K<sub>C</sub> es función del tipo de material, tal como se puede apreciar en la Figura 4b.

**Figura 4. (a) Penetración de CO<sub>2</sub> en mm, (b) K<sub>CO2</sub> (mm/s<sup>1/2</sup>)**



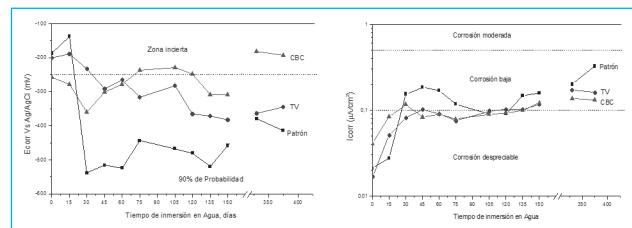
## Ensayos Electroquímicos

### Medio de Exposición: Agua

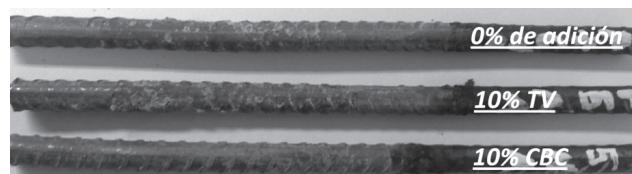
Como se puede observar en la figura 5 los morteros con adición de TV y el mortero sin adición, muestran un potencial entre -100 a -250 mV en los primeros quince (15) días ubicándose en la región del diagrama correspondiente a la zona incierta de corrosión, mientras la muestra adicionada con CBC se encuentra en la zona donde hay una alta probabilidad de

corrosión. Posteriormente y hasta el final del ensayo el mortero sin adición presenta el potencial de corrosión más negativo (aproximadamente -516 mV). La variación de la corriente de corrosión (Icorr) con el tiempo de exposición, presentada en la misma figura, corrobora lo anterior, ya que se puede apreciar que los morteros adicionados hasta edades de inmersión de aproximadamente 135 días presentan una corriente de corrosión (Icorr) despreciable (inferior al 0,1 µA/cm<sup>2</sup>), y posteriormente se ubican en la región de baja corrosión (entre 0,1 y 0,3 µA/cm<sup>2</sup>), comportamiento que, en términos generales, se mantiene hasta el final del ensayo (375 días). Con lo anterior se concluye que las dos adiciones actúan satisfactoriamente en este medio, lo cual se comprueba cuando la probeta es cortada transversalmente (Figura 6) para observar los aceros de refuerzo, donde se aprecia que la zona expuesta al ataque corrosivo está libre de óxido en todas las muestras evaluadas.

**Figura 5. Potencial de Corrosión y corriente de Corrosión (Medio Agua)**



**Figura 6. Aceros de Refuerzo, muestras inmersas en Agua Potable**

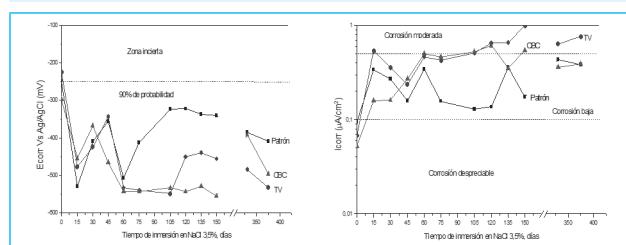


### Medio de Exposición: NaCl 3,5%

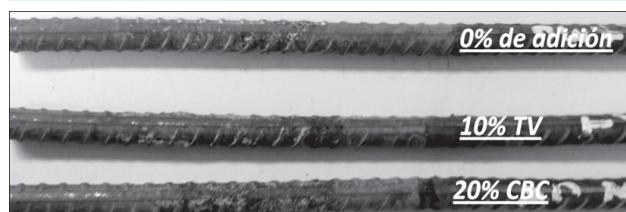
El comportamiento a la corrosión de los morteros sin adición y con adición de CBC y TV luego de la inmersión parcial en NaCl 3.5% (figura 7) difiere del expresado para los especímenes inmersos en agua, ya que, en general, a lo largo del tiempo de evaluación todos los morteros se ubican en la región de mayor

probabilidad de corrosión y con tendencia a presentar velocidad de corrosión moderada (valores de corriente de corrosión entre 0,5 y 1,0  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Concuerdan en alto grado estos resultados con los obtenidos en el ensayo de permeabilidad a cloruros. Algunos investigadores han atribuido este efecto, contrario al esperado en morteros con adiciones puzolánicas, a la mayor capilaridad de los morteros como consecuencia de las características propias de la adición no corregidas previamente a su utilización, tal como el mayor tamaño de partícula observado en la toba volcánica (Benjamín *et al.*, 2000; Hossain and Lachemi, 2004). El desempeño negativo de los morteros adicionados en este medio agresivo se ve reflejado en los aceros extraídos al final del ensayo tal como se aprecia en la figura 8, donde se pueden observar capas de óxido y puntos iniciales de picado. Cabe resaltar aquí el mejor desempeño del mortero de referencia.

**Figura 7.** Potencial y corriente de Corrosión en NaCl 3,5%



**Figura 8.** Aceros de Refuerzo de las diferentes muestras inmersas en NaCl 3,5%



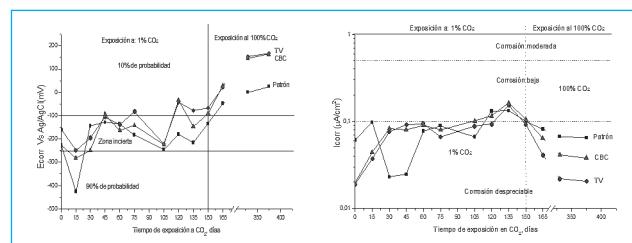
#### Medio de Exposición: CO<sub>2</sub>

En la figura 9 se presenta el comportamiento de los morteros en presencia de CO<sub>2</sub> (1% CO<sub>2</sub>, 60% HR y 25 °C); cabe anotar que después de los 150 días de ensayo las muestras se colocaron en un ambiente saturado de CO<sub>2</sub> al 100%, para procurar su carbonatación completa.

A diferencia de los dos medios anteriormente evaluados, agua y NaCl 3,5%, se aprecia que las tres mezclas en presencia de CO<sub>2</sub> presentan un comportamiento similar y, en términos generales, satisfactorio. El potencial de corrosión reportado por los morteros con y sin adición en los primeros 150 días presenta una tendencia hacia valores más positivos (rango de -250 a 50 mV), indicando que la corrosión es incierta o tiene muy baja probabilidad de ocurrir. Concuerdan estos resultados con la velocidad de penetración del CO<sub>2</sub> evidenciada en los morteros, ya que a esta edad la profundidad de carbonatación de los especímenes fue de 14,2 mm para los adicionados y para las muestras sin adición de 5,7 mm, lo cual indica que la carbonatación no ha alcanzado aun la superficie del acero, puesto que el espesor de recubrimiento era de 22 mm, y en consecuencia no es de esperar inicio de la corrosión.

Después de los 150 días se observa un incremento significativo del potencial de corrosión del acero en todos los morteros evaluados. Esto indica que los productos de la carbonatación han contribuido en el material al taponamiento de los poros y en vez de perjudicar el proceso de corrosión del acero estructural han servido de control al ingreso de mayor proporción del agente agresivo. Esto se pudo corroborar al evaluar la corriente de corrosión, tal como observa en la misma figura 9, donde la tendencia de las curvas es a ubicarse, prácticamente a lo largo de todo el ensayo, en la zona de corrosión despreciable (Icorr menor a 0,1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Cabe anotar, que aunque el comportamiento aquí evidenciado es similar para todas las mezclas evaluadas se destaca el mejor desempeño en este medio de las probetas de OPC adicionadas con CBC y TV.

**Figura 9.** Potencial y corriente de Corrosión en presencia de CO<sub>2</sub>



Con base en estos resultados podría considerarse que el efecto de tener un mayor tamaño de poros capilares en las mezclas adicionadas no resultó ser un parámetro decisivo en su comportamiento frente a la carbonatación; y por el contrario, a diferencia de otros

materiales su susceptibilidad es mínima. La observación de los especímenes al final del estudio (375 días) muestra que los aceros se encuentran perfectamente libres de productos de corrosión.

**Figura 10.** Aceros de Refuerzo de muestras sometidas a Carbonatación



#### 4. Conclusiones

De los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir:

- Las adiciones evaluadas, ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) y toba volcánica (TV), presentan actividad puzolánica, destacándose TV con un índice del 99%, con respecto al 78.7% reportado por CBC.
- Un porcentaje del 10% en sustitución del cemento, de cualquiera de las adiciones, incrementa la resistencia a compresión del mortero a edad de 28 días de curado en órdenes hasta de un 42%. Al incorporar un 20% de adición el incremento resistente se hace más visible a edades más largas, así el mortero adicionado con 20% de TV reporta valores superiores al material de referencia hasta en

un 80%; por el contrario los adicionados con 20% de CBC igualan la resistencia del mortero patrón.

- Contrastó este mayor desempeño resistente del mortero adicionado con TV con su mayor permeabilidad capilar y por ende mayor permeabilidad al ion cloruro; propiedades en las cuales presenta un mejor comportamiento la ceniza de bagazo. Estas características conducen a explicar los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos, relacionados al comportamiento a corrosión de aceros embebidos en este tipo de morteros adicionados. Así, aunque el comportamiento a la corrosión en los medios de agua potable y de CO<sub>2</sub> es satisfactorio, no es así en presencia de NaCl al 3.5%.
- Con base en lo anterior, se resalta que las características del material, no solo de composición sino de morfología y tamaño de partícula son determinantes para un buen desempeño frente a propiedades de durabilidad, por ende se comprobó que la resistencia mecánica no es un parámetro definitivo que permita concluir acerca de la durabilidad de un material en un determinado ambiente de exposición.

#### 5. Agradecimientos

Los autores del presente trabajo de investigación agradecen a Colciencias (Programa EcosNord), la Universidad del Valle, la Université des Antilles et de la Guyane (Guadalupe), el Centro de Excelencia de Nuevos Materiales y el Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas – COLCIENCIAS, Contrato RC - No. 275-2011, por el apoyo concedido para la ejecución del proyecto.

## Bibliografía

- Abali, Y., Bayca, S. U., & Targan, S. (2006). Evaluation of blends tincal waste, volcanic tuff, bentonite and fly ash for use as a cement admixture. *Journal of Hazardous Materials*, 131 (1-3), 126-130.
- Águila, I., & Sosa, M. (2008). Evaluación físico química de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 23 (4), 55-66.
- Almeraya, C. F., Gaona, T. C., & Martínez, V. A. (1998). Monitoreo y control de la corrosión en estructuras de concreto. Disponible en la web: <http://www.imcyc.com/revista/1998/oct/monitoreo.htm>. [Marzo 2012]
- Andrade C. (2009). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidad. Disponible en la web: <http://www.interempresas.net/Construcción/Artículos/36554-La-resistividad-electrica-como-parametro-de-control-del-hormigon-y-su-durabilidad.html>. Marzo 2012]
- Benjamin, S., Khalid, F., & Rizwan, A. (2000). Performance of steel in ordinary Portland, y ash and slag cement mortars during the hydration period. *Journal of Materials Processing Technology*, 103 (3), 383-388.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (11), 3352-3358
- Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Tavares, L., & Fairbairn, E. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement & Concrete Composites*, 30 (5), 410-418.
- Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Tavares, L., & Morales, R. E. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, 39 (2), 110-115.
- Cordeiro, G. C., Toledo, R., Fairbairn, E., Tavare, L., & Oliveira, C. (2004). Influence of mechanical grinding on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash. Proceeding of International RILEM Conference on the use of recycled materials in building structures 2, 731-740
- Del Valle, A., Pérez, T., & Martínez, M. (2001). El Fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación Técnica Nº 182. Disponible en: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt182.pdf>. [Marzo 2012]
- Fairbairn, E. M. R., Americano, B., Cordeiro, G. C., Thiago, P., Paula, A., Toledo, R. D., & Silvoso, M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental*, 91 (9), 1864-1871.
- Frías, M., Villar, E., & Savastano, H. (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and concrete composites*, 33 (4), 490-496
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29 (6), 515-524.
- Ghrici, M., Kenai, S., & Mansour, S. M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29 (7), 542-549.
- Horsakulthai, V., Phiuvanna, S., & Kaenbud, W. (2011). Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. *Construction and building materials*, 25 (1), 54-60.
- Hossain, K., & Lachemi, M. (2004). Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34 (4), 695-702.
- Liebig, E., & Althaus, E. (1998). Pozzolanic activity of volcanic tuff and suevite: Effects of calcinations. *Cement and Concrete Research*, 28(4), 567-575.
- López, M., & Castro, J. T. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25 (3), 419-431.
- Martinera, H. J., Middeendorf, B., Gehrke, M., & Budelmann, H. (1998). Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*, 28 (11), 1525-1536.
- Morales, V., Villar, C. E., Frías, M., Santos, S. F., & Savastano, H. J. (2009). Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. *Cement & Concrete Composites*, 31 (1), 22-28.
- Oliveira, M., Ferreira, I., Souza, C., & Osorio, J. (2010). Sugarcane Bagasse Ash as a Partial portland cement replacement material. *Dyna*, 77 (163), 47-54.

- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., & Ordóñez, L. M. (2002). Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77 (3), 321-325.
- Quintana, E. (2005), Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos, Tesis PhD, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Ramezanianpour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., & Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 25 (5), 2472-2479.
- Rukzon, S., & Chindaprasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials and Design*, 34, 45-50.
- Sales, A., & Araújo, S. (2010). Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management*, 30 (6), 1114-1122.
- Siddique, R. (2008). In *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Cap 10 - Volcanic Ash, pp. 323-349.
- Siddique, R. (2011). Review Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 56 (1), 66-70
- Singh, N., Singh, V., & Rai, S. (2000). Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1485-1488.
- Souza, A. E., Teixeira, S. R., Santos, G. T. A., Costa, F. B., & Longo, E. (2011). Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 92 (10), 2774-2780.
- Torres, J. & Mejia, R. (2007). Influence of the mineralogical composition of kaolins on the performance of added mortars with MK. *Dyna*, 74 (153), 61-67.
- Turanli, L., Uz, B., & Bektas, F. (2005). Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. *Cement and Concrete Research*, 35 (6), 1106-1111.
- Uzal, B., & Turanli, L. (2003). Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, 33 (11), 1777-1781.