Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

www.rlmm.org

DURABILIDAD DE MORTEROS ADICIONADOS CON CENIZAS VOLANTES DE ALTO CONTENIDO DE CARBON

Diana M. Burgos [*], *Daniela E. Angulo* [*], *Ruby Mejía de Gutiérrez*

Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC, Universidad del Valle, A.A 25360, Cali, Colombia

**email: dianamburgos@hotmail.com, danianra@hotmail.com*



RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio de las propiedades de durabilidad y resistencia a la corrosión de morteros de cemento portland adicionado con ceniza volante (CV) de alto contenido de carbón (19%) en proporciones de hasta un 30% en peso como reemplazo parcial del cemento, utilizando como material de referencia un mortero sin adición. Las propiedades evaluadas en el material sin refuerzo incluyen la resistencia a compresión, absorción y porosidad, absortividad, permeabilidad a cloruros y susceptibilidad a la carbonatación. Para evaluar el comportamiento frente a la corrosión del acero de refuerzo de los morteros se utilizaron ensayos electroquímicos de Resistencia a la Polarización lineal (LPR); estos se llevaron a cabo sobre especímenes expuestos a tres diferentes medios: agua, NaCl 3,5%, para simular condición marina, y CO_2 bajo condiciones controladas (1% CO_2, 65 H.R. % y 25°C). Los resultados mostraron que a 28 días de curado los morteros con 10% de CV presentaron un incremento del 35% en la resistencia a la compresión comparado con el mortero sin adición, a su vez esta mezcla se destaca por su mejor desempeño frente a la corrosión de los aceros estructurales. En términos generales, todos los morteros adicionados presentaron baja permeabilidad a cloruros.

Palabras Claves: *ceniza volante, morteros adicionados, durabilidad de morteros, corrosión*

DURABILITY OF BLENDED MORTARS USING FLY ASH OF HIGH UNBURNED CARBON CONTENT

ABSTRACT

This paper presents a study of the durability properties and corrosion resistance of Blended Portland Cement Mortars using fly ash (FA) of high unburned carbon content (19%). The mortars were prepared with percentages up to 0-30% wt of FA as a partial replacement of cement. A mortar without addition was used as reference. The properties evaluated in the unreinforced mortars comprehend Compressive Strength, Absorption and Porosity, Absorptivity, Chloride - Ion Penetration and Susceptibility to Carbonation. The corrosion behavior of reinforcing steel in the mortars was evaluated using Linear Polarization Resistance test (LPR). The test was carried out in three different environment: Water, NaCl 3,5% in order to simulate a marine environment, and CO2 (1% CO2, 65 H.R. % y 25°C). The results showed that the mortars with 10% CV present a 35% increase in compressive strength at 28 days compared to the reference mortar, at the same time. This mix presented the best performance against corrosion of structural steels. Overall, all mortars showed low chloride permeability.

Keywords: *fly ash, blended mortar, durability of mortars, corrosion*

Recibido: 01-02-2011 ; **Revisado:** 20-05-2011

Aceptado: 25-05-2011 ; **Publicado:** 31-05-2011

pISSN: 0255-6952 | eISSN: 2244-7113

Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2012; **32** (1): 61-70

1. INTRODUCCIÓN

La pérdida de la integridad de las estructuras está asociada en alto grado con la corrosión de los aceros de refuerzo de los concretos, particularmente a consecuencia de la presencia de los iones cloruro y/o dióxido de carbono al interior de la estructura. La incorporación de materiales suplementarios, tales como las puzolanas, contribuye a la reducción de la permeabilidad y por ende al incremento de la durabilidad de los concretos; entre este tipo de materiales se encuentran las *cenizas volantes (CV),* subproducto industrial, generado durante los procesos de combustión y gasificación del carbón. Investigaciones previas han demostrado que la adición de CV como sustituto parcial del cemento en morteros y concretos contribuye adicionalmente en las propiedades mecánicas y la reología de las mezclas [1]. Otros efectos positivos son atribuibles a la generación de los productos de la reacción puzolánica que actúan densificando el material y reduciendo su permeabilidad por refinamiento del tamaño de poros e interferencia con la conectividad de los mismos, en razón de lo cual la matriz de concreto adicionado con ceniza volante disminuye el riesgo de corrosión en los aceros de refuerzo [2,3]. Por otra parte, genera beneficios económicos y ecológicos, tanto de ahorro de energía como de recursos provenientes de fuentes naturales.

Sin embargo, los resultados obtenidos en las propiedades de los morteros y/o concretos adicionados varían dependiendo de la calidad y porcentaje de adición de la CV. Al respecto, cabe anotar que la mayoría de las investigaciones realizadas hasta la fecha [4,5,6] hacen uso de cenizas volantes con niveles reducidos de carbón inquemado, que cumplen satisfactoriamente los límites establecidos en la Norma ASTM C618 del 6%.

La presente investigación se enfocó en el estudio de las propiedades mecánicas y de durabilidad de un mortero adicionado con una ceniza volante de alto contenido de inquemados, y su efecto frente al fenómeno corrosivo de los refuerzos de estos morteros.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para el presente estudio se utilizó una CV de alto contenido de carbón, proveniente de una caldera industrial de la región (Valle, Colombia), la cual se incorporó en diferentes proporciones (0%, 10%, 20% y 30%) como reemplazo del cemento portland. Este material se caracterizó mediante técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), análisis térmico diferencial (DT/TG), microscopia electrónica (SEM) y difracción de rayos X (DRX). Los morteros se prepararon en relación 1 de cemento por 2,75 de arena en peso, utilizando cemento portland tipo III sin adición (OPC) y arena de Otawa. La composición química de la ceniza volante y del cemento portland, determinadas por FRX, y el tamaño de partícula promedio, determinado por granulometría láser, se presentan en la Tabla 1. Las mezclas de OPC y CV se prepararon con relación agua/(cemento+adición) en un rango de 0,55 a 0,6, determinadas bajo la norma ASTM C230 para lo cual se requirió la incorporación de un aditivo superplastificante (*VISCOCRETE 5600),* tal como se puede apreciar en la Tabla 2.

2.2 Preparación de las Muestras y Ensayos

Los ensayos mecánicos, de durabilidad y electroquímicos fueron realizados después de los 28 días de curado en agua saturada con $Ca(OH)_2$. Se utilizaron muestras cilíndricas de 3 cm de diámetro x 6 cm de altura para los ensayos de compresión (ASTM C109), Absorción y Porosidad (ASTM C642), y Succión Capilar (Estándar Europeo SIA 162/1). Para el ensayo de Permeabilidad a Cloruros (ASTM C1202) se utilizaron muestras de 3,81 cm de altura x 7,62 cm de diámetro, y de 5,08 cm de diámetro x 10,16 cm de altura. Para el ensayo de susceptibilidad a la carbonatación las muestras fueron mantenidas en una cámara bajo condiciones aceleradas (1% de CO_2, 65 H.R.% y 25 °C); el avance del frente de carbonatación fue medido, cada 15 días, mediante el uso de un indicador acido-base (fenolftaleína).

Para los morteros reforzados se prepararon especímenes de 5,08 cm de diámetro x 10,16 cm de altura y se utilizó como material de refuerzo una varilla central de acero corrugado de bajo contenido de carbono y diámetro de 6,35 mm. El acero fue sometido a una preparación previa superficial, consistente en un proceso de decapado para eliminar alguna capa de óxido existente y luego fueron recubiertas con una pintura anticorrosiva para delimitar la zona de exposición, tal como se muestra en la Figura 1(a). Una vez se cumplieron los 28 días de curado, las muestras fueron expuestas en agua

©2012 Universidad Simón Bolívar

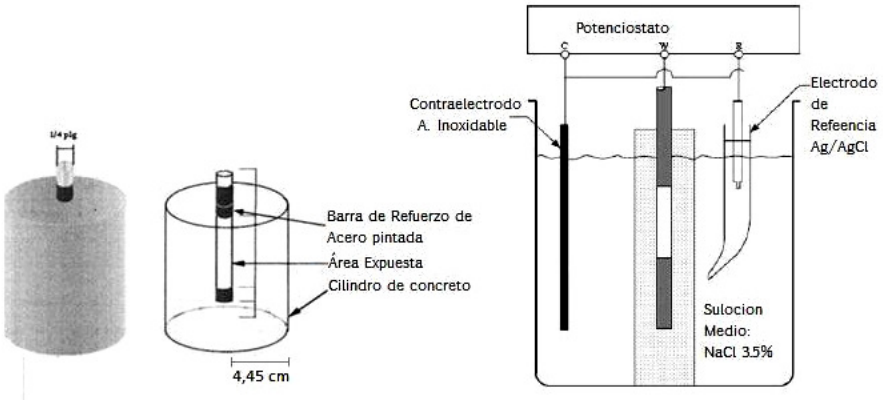


Figura 1. (a) Muestras de mortero Reforzado, (b) Esquema ensayo LPR

Tabla 1. Composición Química y características de la Ceniza Volante y Cemento Portland Tipo III

Material	*Propiedades Físicas*			*Composición Química (%)*					
	Gravedad Especifica (g/cm^3)	*Tamaño Part. Prom. (μm)*	*Índice Puzolanicidad (%)*	*SiO_2*	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*CaO*	*MgO*	*Perdida al Fuego*
Cemento	3,14	19,17	-	19,50	6,50	3,10	63,30	1,01	3,09
Ceniza Volante	2,00	120,02	77,95	42,40	19,10	9.00	1,80	0,35	19,75

Tabla 2. Relaciones a/c y proporciones de aditivo

Mezclas	*Proporción CV (%)*	*Relación (a/c)*	*Superplastificante (%)*
Patrón	0	0,55	0
Mezcla 1	10	0,56	0,1
Mezcla 2	20	0,58	0,15
Mezcla 3	30	0,6	0,3

Tabla 3. Criterio de probabilidad de Corrosión [7]

Ecorr vs $Cu/CuSO_4$ (mV)	*Ecorr vs Ag/AgCl (mV)*	*Probabilidad de Corrosión*
>-200 mV	>-100 mV	10% que se presente
-200 a -350 mV	-100 a -250 mV	Zona incierta
<-350 mV	<-250 mV	90% que se presente

potable y NaCl 3,5% mediante inmersión parcial, y a carbonatación acelerada a las condiciones mencionadas anteriormente. La velocidad de corrosión de los aceros se evaluó con la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) (Figura 1(b)); complementariamente se determinó el potencial de corrosión del acero de refuerzo mediante la norma ASTM C876, la cual establece los criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión, como se muestra en la Tabla 3 [7] y en la Tabla 4 [8]. Una descripción más amplia de los criterios de valoración de potenciales para el acero embebido en concretos se presenta en el Manual DURAR [9]. Para la realización de la técnica LPR se utilizó el equipo *Potenciostat/Galvanostat GAMRY PC14*; y se aplicaron sobrepotenciales de ±20 mV registrando la respuesta en corriente bajo la norma ASTM G 59. Para el cálculo de la corriente de corrosión se utilizó como valor de B 26 mV, que simula condición activa. Para estos ensayos se utilizó como electrodo de referencia Ag/AgCl.

Tabla 4. Rangos de valores de corrosión basados en términos de vida de servicio.[8]

Icorr (μA/cm2)	*Nivel de Corrosión*
≤0,1	Despreciable
0,1 – 0,5	Bajo
0,5 – 1	Moderado
>1	Alto

©2012 Universidad Simón Bolívar

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la Ceniza Volante

Según las especificaciones de la norma ASTM C618, la ceniza volante utilizada puede ser clasificada como tipo F, ya que como se observa en la Tabla 1, aproximadamente el 70% de la ceniza volante corresponde a SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 y contiene un porcentaje menor al 10% de MgO y CaO. Es de resaltar que la CV con la que se trabajó en este estudio posee un alto contenido de inquemados (19,75%), mayor al 6% especificado en la misma norma. Dado que el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de este alto contenido de carbón en la durabilidad de los morteros en diversos ambientes, no se consideró efectuar tratamientos térmicos de adecuación a la ceniza; aunque se reconoce que la presencia excesiva de carbón puede alterar la reactividad de CV ya que éstas son partículas no reactivas, porosas y de textura áspera que aumentan la demanda de agua de las mezclas.

La caracterización morfológica de la ceniza volante se realizó mediante la técnica de SEM (Figura 2). En la micrografía 2(a) se observan numerosas partículas esféricas de diversos tamaños denominadas comúnmente cenoesferas, observándose además la presencia de partículas irregulares. En la micrografía 2(b) se observa que algunas de las partículas de CV son compactas y otras son huecas; igualmente se evidencia la presencia de partículas porosas o esponjosas que corresponden a carbón inquemado. En la micrografía 2(c) se muestra un tipo de geometría característica de las CV llamadas pleuroesferas, las cuales son esferas rellenas de otras esferas de menor tamaño.

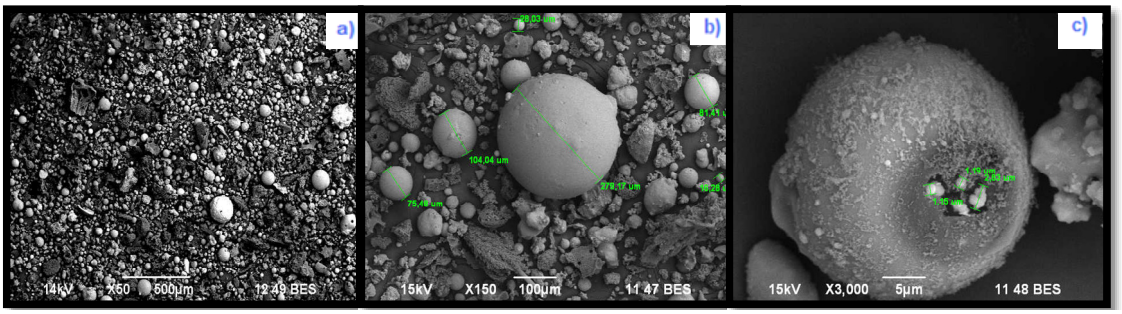


Figura 2. SEM, (a) vista general, (b) partículas esféricas y (c) pleuroesferas de la Ceniza Volante.

La caracterización mineralógica de la CV se realizó mediante la técnica de difracción de rayos X. El espectro obtenido se presenta en la Figura 3 que indica que el material es parcialmente amorfo y presenta como componentes cristalinos cuarzo (Q) y mullita (M). En la Figura 4 se muestran las curvas de TGA, DTA y DTG obtenidas del análisis térmico diferencial realizado a la muestra de ceniza volante en presencia de oxígeno. La pérdida de peso, al incrementar la temperatura (TG), se atribuye a la pérdida de carbón inquemado en el material, lo cual ocurre en el intervalo de temperatura de 430 a 800 °C; a partir de esta temperatura la ceniza volante permanece estable, es decir no sufre transformaciones microestructurales. La curva DTG indica que esta pérdida de masa, producida por la combustión del carbón, se da en dos etapas y se ubica en 552,68 °C y 727,55 °C, el análisis de la curva DTA corrobora que los picos son de índole exotérmica. La pérdida de peso coincide con el porcentaje de inquemados determinado en el análisis químico.

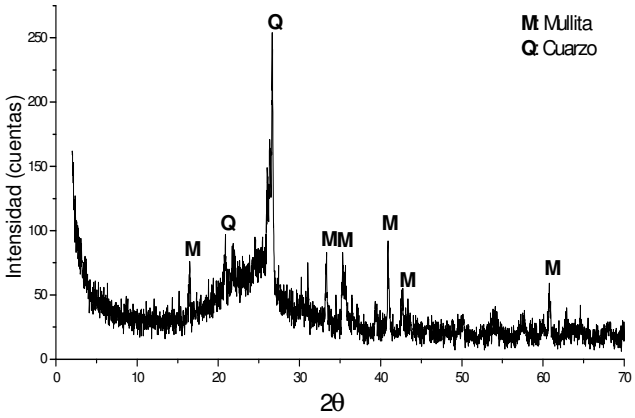


Figura 3. Difracción de Rayos X Ceniza Volante

La actividad puzolánica de la CV se comprobó al comparar la resistencia a la compresión de un

mortero adicionado con 20% de CV y la del mortero de referencia (0% CV) obteniéndose un valor de 78% (Tabla 1), lo cual supera el valor mínimo de 75% especificado en la norma ASTM C311.

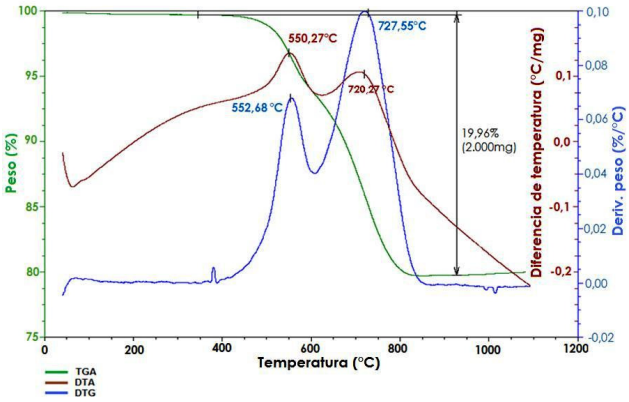


Figura 4. Análisis Térmico Ceniza Volante en Atmosfera de Oxigeno

3.2 Ensayos Mecánicos

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión presentados en la Tabla 5 demuestran que a 28 días de curado el mortero adicionado parcialmente con 10% de CV presenta un incremento del 35% en la resistencia comparado con los morteros sin adición; por el contrario, los morteros adicionados con 20% y 30% de CV presentan una disminución de hasta un 31%. Es posible, según afirman Amahjour et al [2], que este comportamiento se invierta al incrementarse el tiempo de curado cuando las reacciones puzolánicas avancen en mayor grado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la reactividad y resistencia de las mezclas con ceniza volante depende especialmente del tamaño de partícula [10,11,12], parámetro que en la presente investigación podría actuar negativamente, ya que la CV empleada presenta un elevado tamaño de partícula (5 veces la del cemento).

Tabla 5. Resistencia a la Compresión Morteros con y sin adición de CV a los 28 Días de Curado

Adición de CV (%)	*0*	*10*	*20*	*30*
Resistencia a Compresión (MPa)	*23,59*	*31,91*	*18,39*	*16,14*

3.3 Estudio de Durabilidad

3.3.1 Ensayos de Permeación

En la Tabla 6 se presentan los resultados del ensayo de porosidad y absorción, los cuales indican un aumento en el porcentaje total de poros para las muestras adicionadas con CV, lo que concuerda con lo reportado por Mejía y Rodríguez. [13] quienes exponen que la porosidad total podría llegar a ser mayor en mezclas adicionadas con puzolanas comparadas con mezclas sin adición puzolánica. No obstante, la distribución y tamaño de los poros es diferente. Esto último puede verificarse en los resultados de succión capilar mostrados en la Tabla 6, particularmente para los morteros adicionados con un 10% de ceniza volante, que presentaron un mayor coeficiente de resistencia a la penetración de agua (m), menor coeficiente de absorción capilar (K) y porosidad efectiva (εe) con respecto a las demás mezclas. Lo anterior, indica que la adición de CV en un porcentaje del 10% fue efectiva en la modificación de la microestructura del material, a pesar de las características de la ceniza volante empleada. Caso contrario se aprecia al incrementar el porcentaje de adición, lo cual se explica por el mayor contenido de partículas carbonosas en la mezcla que conducen a una mayor porosidad efectiva. Es factible que un mayor tiempo de curado, contribuya a reducir la porosidad efectiva, una vez se desarrollen los productos de la reacción puzolánica.

3.3.2 Desempeño frente a Cloruros

Los resultados de permeabilidad a cloruros (ASTM C1202) se presentan en la Tabla 7, donde se observa que en general, los morteros adicionados con CV presentan un comportamiento similar entre ellos, ya que todos se encuentran en un rango de carga transmitida entre 1000-2000 coulombios, lo que los clasifica como de baja permeabilidad al ion cloruro; cabe anotar que la adición de CV reduce de manera significativa la permeabilidad del mortero en órdenes superiores al 80%, interfiriendo en la difusión de agentes agresivos. Los resultados, aparentemente contradictorios, de los valores de porosidad efectiva y los correspondientes a permeabilidad a cloruros, pueden atribuirse a la proporción de alúmina en la mezcla que incrementa con el porcentaje de adición; esto contribuye a la

©2012 Universidad Simón Bolívar

formación de la sal de Friedel mediante la cual se enlazan cloruros. Este comportamiento concuerda con los resultados reportados en investigaciones anteriores [5,14,15,16].

En cuanto a los resultados de resistividad presentados en la Tabla 7, se puede observar que los morteros adicionados con CV exhiben mayor resistividad en comparación a los morteros sin adición. Esto indica que el mortero adicionado puede actuar como una barrera protectora frente a la corrosión de la armadura.

Tabla 6. Resultados Ensayos de Permeación

	Adición de CV (%)	*0*	*10*	*20*	*30*
Resultados Succión Capilar	K ($kg/m^2seg^{1/2}$)	0,015	0,013	0,021	0,024
	m (10^7 s/m^2)	4,16	4,29	4,17	3,75
	Porosidad efectiva ε_o (%)	9,7	8,6	13,6	14,7
Resultados de Porosidad y absorción	Porosidad total (%)	16,68	19,40	21,51	23,26

Tabla 7. Resultados de Permeabilidad a Cloruros y Resistividad.

	Adición de CV (%)	*0*	*10*	*20*	*30*
Resultados Permeabilidad a Cloruros	Carga Transmitida (Coulombios)	9170,36	1521,91	1236,06	1366,30
Resultados de Resistividad	Resistividad (Ω.m)	22,97	138,02	147,22	136,65

3.3.3 Susceptibilidad a la Carbonatación

En la Tabla 8 se observa el coeficiente de carbonatación de las muestras para 62 días de exposición en la cámara de carbonatación. Se puede apreciar que los morteros con 10% de CV presentan el menor coeficiente de carbonatación respecto al resto de los morteros adicionados y al de referencia. Este último presentó carbonatación completa a los 62 días de exposición, mientras los morteros adicionados con 30% de CV presentaron carbonatación completa en un periodo corto de exposición (15 días), por lo que no fue posible registrar su coeficiente de carbonatación. Estos resultados presentan concordancia con los resultados del ensayo de absorción capilar.

Tabla 8. Resultados de Carbonatación

Adición de CV (%)	*0*	*10*	*20*	*30*
Coeficiente de Carbonatación global (*K*) ($mm/dia^{1/2}$)	3,069	0,549	3,626	---

Con base en estos resultados, se puede deducir que la adición óptima es del 10% de ceniza volante, lo cual concuerda con la mayor resistencia mecánica y menor permeabilidad reportada en el ensayo de succión capilar.

3.4 Resultados Ensayos Electroquímicos

3.4.1 Medio Carbonatación

En la figura 5(a) se puede observar que hasta un tiempo de exposición de 103 días, los morteros reforzados adicionados parcialmente con CV presentan un buen comportamiento comparado al correspondiente del mortero de referencia (0% de CV), con potenciales ubicados en la zona de menor probabilidad de corrosión. Los morteros adicionados con un 10% de ceniza volante presentan una tendencia ascendente en el potencial hacia valores más positivos, a diferencia de los de 20 y 30%. Éstos resultados coinciden con lo observado en el ensayo de LPR, , tal como se puede apreciar en los valores de corriente de corrosión (Icorr), presentados en la Figura 5(b).

©2012 Universidad Simón Bolívar

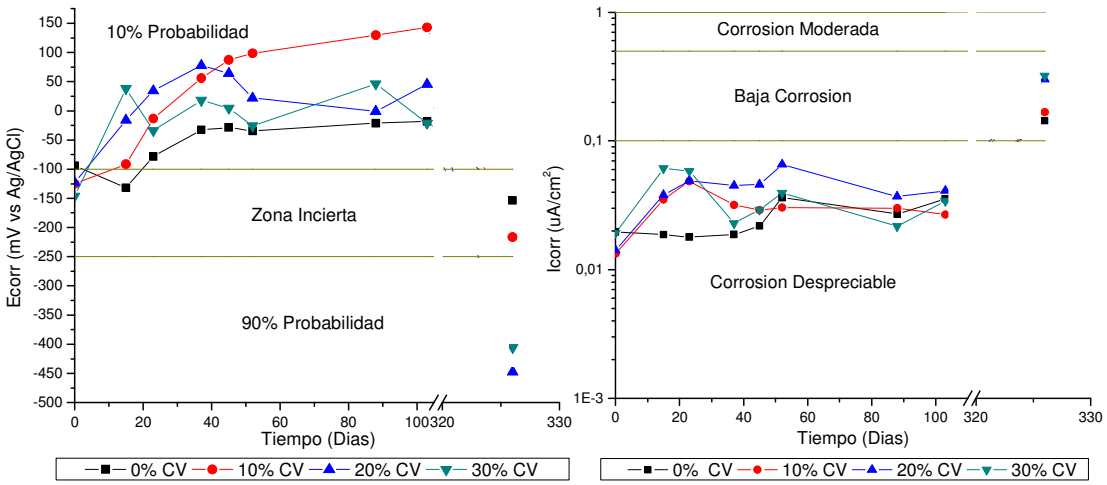


Figura 5. (a) Potencial de Corrosión promedio vs Días de Exposición en el Medio de Carbonatación (b) Corriente de Corrosión promedio vs Días de Exposición en el Medio de Carbonatación.

En general, todos los especímenes evaluados reportan valores menores a 0,1 μA/cm^2, lo que ubica las mezclas evaluadas en un nivel de corrosión despreciable. Los resultados de ensayos de varias investigaciones citadas por Khunthongkeaw *et al.* [17] reportan que al adicionar CV como reemplazo al cemento la velocidad de carbonatación se reduce.

En términos generales las muestras a los 62 días de exposición, se encontraban completamente carbonatadas como se mencionó anteriormente en la prueba de susceptibilidad a la carbonatación, excepto las del 10% de CV. Para los ensayos electroquímicos, las probetas se retiraban de la cámara y se ensayaban con el montaje mostrado en la Figura 1 utilizando agua como medio de ensayo. Una vez carbonatadas las probetas, estas permanecieron expuestas a condiciones naturales

(ambiente laboratorio) y solo se sometieron a inmersión parcial en agua horas antes de realizar el ensayo. Relacionando los resultados obtenidos de los ensayos de durabilidad y electroquímicos, se encuentra que aunque los morteros adicionados con el 20 y 30% de ceniza volante están completamente carbonatados, sus aceros de refuerzo no presentan señales de corrosión, pues hasta los 140 días de exposición éstos trabajan con potenciales de corrosión positivos y corrientes de corrosión menores a 0,07 μA/cm^2.

El comportamiento general anteriormente descrito cambia en la última medida (326 días de exposición) en el cual los potenciales de corrosión, en general, disminuyen drásticamente a potenciales más negativos ubicándolos entre la zona incierta y de 90% de probabilidad de corrosión, aumentando los valores de corriente de corrosión a ordenes de 0,1 y 0,5 μA/cm^2. Autores como Tae-Hyun Ha *et al.* [18] y M.F. Montemor *et al.* [19], sugieren tener un control del contenido de carbón inquemado en las cenizas volantes para incrementar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo de los morteros o concretos adicionados al estar expuestos a carbonatación y sugieren niveles menores al 8% de pérdidas por ignición. El aumento en la velocidad de la corrosión como consecuencia de altos contenidos de carbón, lo atribuyen a la activación del carbón en los morteros que forma CO_2 y este a su vez reacciona con el hidróxido de calcio presente, formando $CaCO_3$ que conlleva a una adicional y rápida despasivación de los aceros de refuerzo. Como se muestra en la Figura 6, a los 326 días de exposición las muestras fueron cortadas trasversalmente para corroborar las condiciones de los aceros de refuerzo. Se pudo observar que el acero embebido en las muestras del 0 y 10% de adición de CV se encuentra libre de óxidos, a diferencia del acero de las muestras con 20 y 30% de adición de CV.

3.4.2 Medio Agua Potable:

En la Figura 7(a) se observa que el potencial de corrosión (Ecorr) de todas las muestras, hasta los 30 días de inmersión en agua potable se encuentra entre -100 y -250 mV, ubicándolos de esta forma en una zona incierta de corrosión. A los 45 días de inmersión se observa una caída significativa de los

valores de potencial para las muestras con y sin adición de CV, a este tiempo de exposición todos los morteros trabajan de forma similar presentando un potencial más negativo, ubicándose en la zona de 90% de probabilidad de que ocurra el proceso corrosivo; este comportamiento se puede atribuir al periodo de formación de la película pasiva. Cabe mencionar que la inmersión de las probetas fue parcial, por lo que se genera un diferencial de oxígeno en la barra de refuerzo que llega a generar el proceso corrosivo aun encontrándose sumergidas en agua potable. A los 75 días de inmersión se inicia un ascenso del potencial hacia valores más positivos que continua hasta los 140 días de inmersión; este comportamiento coincide con lo obtenido en el ensayo de corriente de corrosión, tal como se puede apreciar en la Figura 7(b).

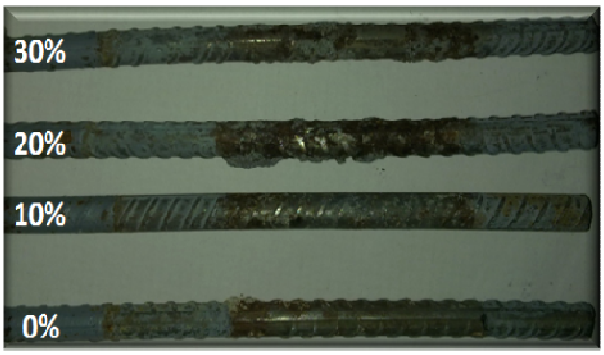


Figura 6. Aceros de Refuerzo de las diferentes muestras sometidas a Carbonatación.

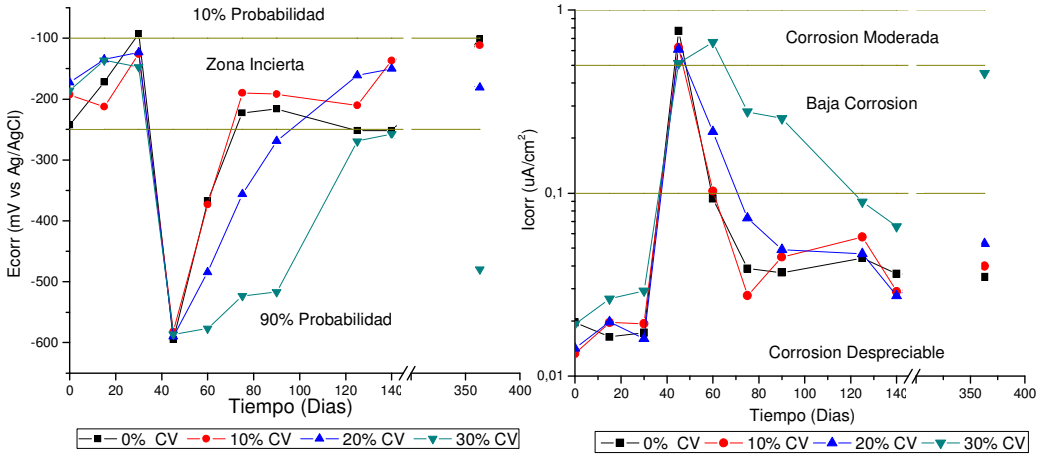


Figura 7. (a) Potencial de Corrosión promedio vs Días de Inmersión en el Medio Agua Potable, (b) Corriente de Corrosión promedio vs Días de Inmersión en el Medio Agua Potable.

A partir de los 60 días de inmersión la corriente de corrosión de todos los morteros disminuye, para el caso de las muestras con CV del 0 al 20% el valor de la corriente de corrosión es inferior a 0.1 µA/cm^2 que corresponde, según la Tabla 4, a un nivel de corrosión despreciable, este comportamiento se mantiene aún a los 363 días de inmersión en agua. Por el contrario, los morteros adicionados con 30% CV, se ubican en la zona de corrosión baja al final del ensayo con una corriente de corrosión del orden de 0,45 µA/cm^2. Como se muestra en la Figura 8, a los 363 días de inmersión en el medio Agua, el acero de los diferentes especímenes evaluados se encuentra en buen estado, sin presencia de óxidos, incluidos el acero de refuerzo del mortero adicionado con 30% de CV.

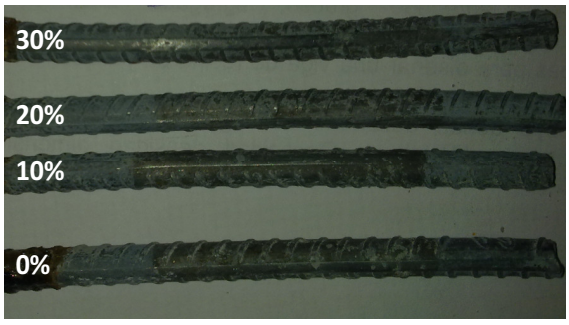


Figura 8. Aceros de Refuerzo de las diferentes muestras inmersas en Agua Potable

3.4.3 Medio NaCl 3,5%:

La Figura 9(a) presenta el comportamiento de los morteros reforzados con y sin adición de ceniza volante en presencia de NaCl 3,5%. Se observa, en general, a tiempos cortos de inmersión un

decaimiento del potencial hacia valores más negativos de todos los morteros reforzados estudiados ubicándolos en la zona de 90% de probabilidad de que ocurra corrosión, asociado con una corriente de corrosión que alcanza valores superiores a 0,5 µA/cm^2 como se observa en la Figura 9(b). Este comportamiento coincide con lo observado en agua potable (Figura 7). Sin embargo, a diferencia de los especímenes con inmersión parcial en agua, los expuestos a NaCl 3.5% a partir de los 45 días los potenciales se incrementan hacia valores positivos y la corriente se ubica en el rango de 0,1 a 0,5 µA/cm^2 como consecuencia de un alto contenido de cloruros al interior del mortero que afectan la película pasiva del acero. A los 363 días de inmersión en NaCl 3,5% no se muestra un cambio significativo en los potenciales de corrosión del acero, pero si en las corrientes de corrosión, indicando un avance significativo del proceso. En la Figura 10 se observa la apariencia de los aceros de refuerzo al final del ensayo (363 días de inmersión).

En general para los dos medios presentados anteriormente (Agua, NaCl 3.5%) los morteros reforzados que contienen un 30% de adición de CV presentaron el peor comportamiento, esto es atribuido según Montemor M. *et al.* [6] y Kayali y Zhu 2005 [20] a las características fisicoquímicas de la adición, particularmente su tamaño de partícula elevado y su alto contenido de material inerte o carbón inquemado, parámetros que afectan la reactividad óptima de la ceniza en la mezcla.

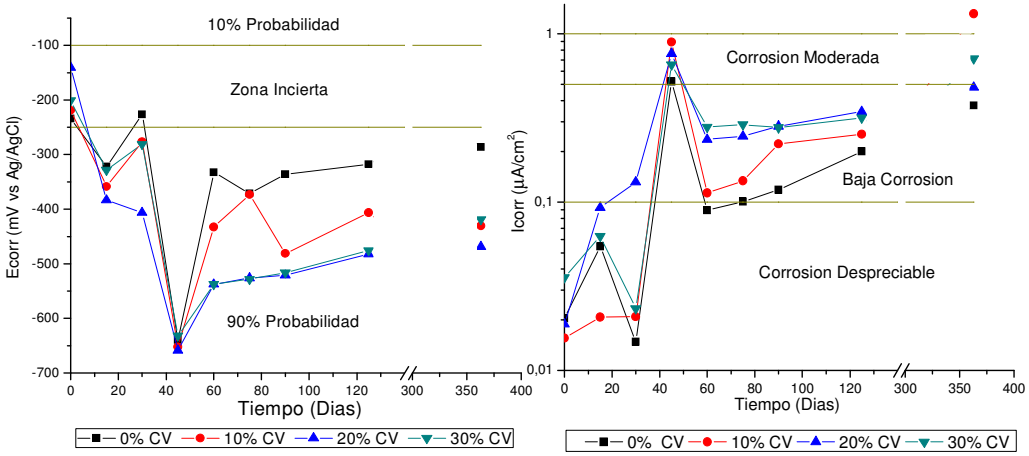


Figura 9. (a) Grafico de Potencial de Corrosión promedio vs Días de Inmersión en el Medio NaCl 3.5%, (b) Grafico de Corriente de Corrosión promedio vs Días de Inmersión en el Medio NaCl 3.5%.

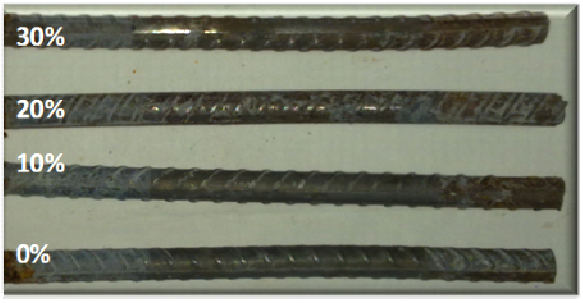


Figura 10. Aceros de Refuerzo de las diferentes muestras inmersas en NaCl al 3,5%

4. CONCLUSIONES

La ceniza volante, utilizada en la presente investigación, con un contenido de carbón del 19% no afecta significativamente las propiedades del mortero y puede ser potencialmente utilizada como puzolana en porcentajes bajos como reemplazo parcial del cemento en las mezclas. La adición del 10% de CV se considera el porcentaje óptimo de adición ya que incrementa la resistencia mecánica del mortero en un 35% a edades de 28 días de curado y genera efectos positivos en las propiedades

©2012 Universidad Simón Bolívar

de durabilidad. Adicionalmente los morteros reforzados y adicionados con 10% CV se comportan adecuadamente frente a la corrosión de los aceros embebidos en los diferentes medios de exposición evaluados. En cementantes no reforzados es posible incorporar porcentajes hasta de un 20% de CV, ya que éstos incluso presentan niveles de permeabilidad reducidos, particularmente en presencia de cloruros. Es apropiado evaluar las características de desempeño físico-mecánico en mezclas con porcentajes de adición de CV superiores a los aquí considerados y a edades mayores de curado, para definir sus potenciales aplicaciones en el sector de la construcción.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo agradecen a la Universidad del Valle, al Centro de Excelencia de Nuevos Materiales, y al "Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas" contrato RC-No. 275-2011

6. REFERENCIAS

[1]. Hui-sheng Shi, Bi-wan Xu, Tao Shi, Xiao-chen Zhou. Mater. Struct. 2008; 41 (6): 1051–1056.

[2]. Amahjour F, Payá J, Pardo P, Borrachero M.V, "*Propiedades de Lechadas de cementos fabricados con cemento Tipo I y mezclas con cenizas volantes (CV) y humo de sílice (HS)*". En: Actas del VIII Congreso Nacional de propiedades mecánicas de sólidos. Gandia (España), 2002, p. 729-737.

[3]. HEADWATER RESUORCES. "Fly Ash: The Modern Pozzolan Improving Concrete Performance Enhancing Our Environment" [On-Line] 2009. Disponible a través de: www.flyash.com, South Jordan (Utah, EE.UU.)

[4]. Garcés P., Andión L.G., Zornoza E., Bonilla M., Payá J. Cement Concrete Comp. 2010; 32 (3): 204–210,

[5]. Yoon-Seok Choi a, Jung-Gu Kim a, Kwang-Myong Lee. Corros Sci 2006; 48 (7): 1733–1745.

[6]. Montemor M, Simões A, Salta M. Cement Concrete Comp. 2000, 22 (3): 175-185.

[7]. Norma ASTM C876, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Pennsylvania (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2011.

[8]. Del Valle A; Perez,T; Maerinez, M. Instituto Mexicano del Transporte. 2001 [On-Line]; 182, ISSN 0188-7297.

[9]. Trocónis de Rincón y Miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. 2da. ed. CYTED, 1998. p:128-135

[10]. Papadakis V. Cement Concrete Res. 1999, 29 (11): 1727-1736.

[11]. Bouzoubaa N, Zhang M.H, Bilodeau A, Malhotra V.M. Cement Concrete Res.1998; 28(11): 1555-1569.

[12]. Fernández A, Palomo A. Fuel. 2003; 82(18): 2259-2265.

[13]. Mejía R, Rodríguez P, "Durabilidad y corrosión en materiales cementicios: fundamentos, componentes, fenómenos de deterioro, mecanismos de transporte, métodos de control, prevención y evaluación de la corrosión". CYTED, San José, C.R, 1999.

[14]. Papadakis V, y Tsimas, S. Cement Concrete Res. 2002; 32(10): 1525-1532.

[15]. Bouzoubaa N, Zhang M.H, Malhotra V.M. Cement Concrete Res. 2000; 30(7):1037-1046.

[16]. Bouzoubaa N, Zhang M.H, Malhotra V.M. Cement Concrete Res. 2001; 31(10): 1393-1402.

[17]. Khunthongkeaw J, Tangtermsirikul S. Leelawat T. Constr Build Mater. 2006; 20(9): 744–753.

[18]. Tae- Hyun Ha, Srinivasan Muralidharan, Jeong-Hyo Bae, Yoon-Cheol Ha, Hyun-Goo Lee, Kyung Wha Park, Dae-Kyeong Kim. Constr Build Mater. 2005; 19(7): 509–515.

[19]. Montemor M.F, Cunha M.P, Ferreira M.G, Sim~oes A.M. Cement Concrete Comp. 2002; 24(1): 45–53.

[20]. Kayali O, Zhu B. Constr Build Mater. 2005; 19(4): 327-336.

©2012 Universidad Simón Bolívar