

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

IDALBERTO ÁGUILA & MILENA SOSA

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Arquitectura y Urbanismo,
Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC). iaguila@idec.arq.ucv.ve, msosa@postgrado.ucv.ve

Recibido: marzo de 2008

Recibido en forma final revisado: julio de 2008

RESUMEN

Este artículo presenta una caracterización preliminar de algunos residuos de producciones agrícolas venezolanas y se evalúan sus potencialidades para ser utilizados como posibles fuentes de materiales puzolánicos. Se incluyen para su estudio las cenizas de cascarilla de arroz, hoja de maíz y bagazo de caña, todas ellas con importantes cantidades de sílice amorfa en su composición química. Mediante ensayos de laboratorio, se realiza una primera caracterización física y química de cada uno de los materiales, con el fin de determinar si poseen la composición necesaria para ser considerados como posibles materiales puzolánicos. Esta caracterización se complementa con ensayos de resistencia a compresión y durabilidad de muestras de mortero, realizadas con diferentes combinaciones de cada material con cemento Pórtland. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad técnica de la utilización de cenizas de cascarilla de arroz y de hoja de maíz como materiales puzolánicos, no así del bagazo de caña que queda momentáneamente descartado de ser utilizado.

Palabras clave: Puzolanas, Residuos agrícolas, Cemento, Sostenibilidad, Materiales de construcción.

PHYSICAL CHEMICAL EVALUATION OF RICE HUSKS, CORN LEAVES AND CANE BAGASSE ASHES AND THEIR POTENTIAL USE IN MORTAR MIXTURES, AS POZZOLANIC MATERIALS

ABSTRACT

This paper presents a preliminary characterization of some residues of Venezuelan agricultural products and assesses their potential use as potential sources of pozzolanic materials. We include rice husks, corn leaves and cane bagasse ashes, all of them having large quantities of amorphous silica in their chemical compositions. Through laboratory tests, we conducted an initial physical and chemical characterization of each material, in order to determine whether they possess the required composition to be considered as potential pozzolanic materials. This characterization is complemented by resistance to compression and durability tests of mortar samples, made with different combinations of each material with Portland cement. These results demonstrate the technical feasibility of the use of rice husks and corn leaves as pozzolanic materials, but not so the cane bagasse which at present does not meet the requirements.

Keywords: Pozzolans, Agricultural wastes, Cement, Sustainability, Building materials.

INTRODUCCIÓN

No se puede negar el papel que ha jugado el cemento en la historia de la humanidad y sobre todo el cemento Pórtland, aparecido a principios del Siglo XIX, cuando el Británico Joseph Aspdin lo patentó en 1824 y con él abrió una nueva era en la industria de materiales de construcción, sin

embargo, en las últimas décadas han aparecido algunos cuestionamientos al empleo de este material, asociados a su alto costo y al impacto ambiental que genera su producción y uso extensivo.

También es notable el incremento de la producción de cemento que han experimentado los países del tercer mundo

en las últimas décadas. Según Hendriks (2004) la producción mundial de cemento se incrementó a un promedio anual de 3,6 % entre 1970 y 1995, más acentuado entre los años 1990 y 1995 con un incremento interanual de 4,7 %. Los países europeos que en la década de los 70 experimentaron un crecimiento importante de la producción, comenzaron a disminuir la misma ligeramente en los años 80 para experimentar una disminución importante entre 1990 y 1995. En Norteamérica los incrementos han sido constantes hasta 1995 pero a un ritmo muy lento. El salto en la producción lo han dado los países en desarrollo, sobre todo de Asia, encabezados por China, que experimentó un crecimiento del 12,2 % anual entre 1970 y 1995, acentuado entre 1990 y 1995 que alcanzó un 17,7 % promedio. En América Latina el incremento promedio ha oscilado alrededor del 4 % anual. La producción mundial para 1995 se ubicaba en 1453 millones de toneladas (Hendriks, 2004).

Datos más recientes de la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN) dan cuenta que en el quinquenio 2001-2005 esta tendencia se mantiene, situando a China con un crecimiento total de 65,6 % entre 2001 y 2005, siendo el crecimiento global de Asia de 43,1 en el mismo período. La producción global para el año 2005 se sitúa en 2272 millones de toneladas (Oficemen, 2006). Esto denota un elevado y sostenido crecimiento que se acompaña con un incremento en el impacto que se genera sobre el medio ambiente.

El alto consumo de recursos naturales y energéticos y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes (Cachán, 2001) comprometen las posibilidades futuras de utilización de este maravilloso material de construcción. Para atenuar esta situación se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta, con el objeto de disminuir el consumo energético y la de disminuir el consumo de cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto.

Este trabajo se enmarca en la segunda vía apoyado en numerosas experiencias y avances que ha experimentado la tecnología del concreto en las últimas décadas, potenciados por la utilización de modernos equipos de visualización y evaluación de materiales de gran finura como el cemento (Martirena *et al.* 1997), y la aparición de potentes aditivos químicos que han ampliado considerablemente las posibilidades para disminuir la proporción de cemento en la mezcla sin afectar e incluso mejorando las propiedades del concreto (Metha, 2000; Nasvik, 2006).

Las puzolanas en general, sobre todo las de origen artificial, constituyen una de las experiencias más alentadoras en la búsqueda de sustitutos más sustentables ecológica y económicamente del cemento (Martirena, 2003; Metha, 1989).

El código ASTM (1992), en la definición 618-78, especifica las puzolanas como «materiales silíceos o alúmino-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes». En este caso se aprovecha el alto contenido de sílice y alúmina, que caracteriza la composición de estos materiales, para formar compuestos cementantes, al combinarse con la cal que se genera durante el proceso de hidratación del cemento. Esta cualidad permite sustituir ciertas cantidades de cemento por puzolana sin afectar o incluso mejorando su resistencia mecánica, entre otras propiedades. Algunos residuos agrícolas están siendo muy estudiados con el fin de producir puzolanas y hasta el momento se han obtenido muy buenos resultados (Águila, 2001; Martirena, 2003; Martirena *et al.* 1997; Visvesvaraya, 1986; Hammond, 1983).

En Venezuela existen altos volúmenes de producción de arroz, caña de azúcar y maíz, entre otros renglones que pudieran constituir potenciales fuentes de materias primas para la producción de puzolanas (Fedeagro, 2007). Todos estos productos generan cierta cantidad de residuos que pudiesen ser fuentes de obtención de nuevos materiales; en el caso del arroz, sería la cascarilla; en el maíz, la hoja; y en la caña, el bagazo. El uso de estos residuos en la actualidad es bastante limitado; la cascarilla de arroz se utiliza como fundente en las empresas siderúrgicas y como complemento de la alimentación animal, pero en cantidades muy reducidas, la mayor parte se bota en ríos y otros lugares donde se generan fuentes de contaminación, la hoja de maíz también se utiliza como complemento de la alimentación animal pero gran parte se queda en el campo y se pierde, el bagazo de caña se utiliza como materia prima en otras producciones industriales pero igualmente se desechan cantidades importantes. Por consiguiente se cuenta con una potencial fuente segura y económica de material puzolánico. Para evaluar la factibilidad de utilización de estos materiales en Venezuela se requiere un análisis integral que incluya no sólo las propiedades del material, sino su disponibilidad real, los procesos de obtención y comercialización; los costos, etc. En trabajos posteriores se abordará la factibilidad técnica y económica del uso de estos materiales de forma integral. Este trabajo se limita a evaluar los materiales en estudio desde el punto de vista físico-químico y su comportamiento como material puzolánico.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El programa experimental de ensayos contempla, la caracterización de los materiales y el estudio físico-químico de las mezclas de mortero realizadas con cada tipo de cenizas, con énfasis en la resistencia a la compresión y la durabilidad.

Para ello se preparan 14 muestras que incluyen una sin adición de ceniza (100% Pórtland, que se toma como patrón), y series de muestras con contenido de ceniza entre 10 y 30 %, en sustitución de cemento para cada uno de los materiales a evaluar.

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en el Instituto Venezolano de Investigaciones Tecnológicas e Industriales (INVESTI), por lo cual todos los métodos experimentales y normas utilizadas en este trabajo corresponden a las condiciones establecidas por este laboratorio.

Materiales

Los materiales utilizados en la elaboración de las probetas fueron: cemento, arena, agua, cenizas de cascarilla de arroz, de hoja de maíz y de bagazo de caña; arena estándar de Ottawa, compuesta por cuarzo en un 99,5%, forma y granulometría controladas; cemento Pórtland tipo I, (según norma COVENIN 28 «Cemento Pórtland Especificaciones»). Las cenizas de hoja de maíz, de cascarilla de arroz y de bagazo de caña fueron obtenidas a partir de su propia combustión, sin control y posteriormente molidas durante 1 hora en un molino de bolas de 5 Kg de capacidad.

Caracterización de los materiales puzolánicos

Para el análisis químico se utilizó un equipo de absorción atómica Perkin Elmer 2380, con el fin de determinar el contenido de cada elemento químico en la muestra; la densidad se comprobó por el método ASTM C188 «Density of hydraulic cement», utilizando un recipiente estándar de Le Chatelier; y la finura de los materiales cementantes (cemento y cenizas) utilizando un permeabilímetro Blaine (ASTM C204 «Fineness of Portland cement by air permeability apparatus»), en términos de su superficie específica.

Diseño de mezclas

Las mezclas se diseñaron en los laboratorios del INVESTI según el procedimiento establecido en esa institución, el cual se basa en el método propuesto por Porrero *et al.* (2004), que se describe a continuación:

- Resistencia de diseño a compresión en representación de la calidad del mortero en estado endurecido:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia de diseño: } R &= f'c + Z.\sigma \\ \text{Resistencia característica } f'c &= 250 \text{ Kg/cm}^2 \\ \text{Desviación estándar} &= \sigma \end{aligned}$$

Cuando el valor de σ es desconocido como alternativa, la norma CONENIN-MINDUR # 1753 «Estructura de concreto

armado para edificaciones, Análisis y diseño» establece que el valor de $f'c$ se incremente en una cantidad (Z) que es función del nivel de resistencia. Para valores de $f'c$ comprendidos entre 200 y 350 Kg/cm², su valor se debe incrementar en 85 Kg/cm²; en definitiva:

$$R = 32,83 \text{ Mpa}$$

- Asentamiento en representación de las características del mortero en estado fresco:

$$\text{Asentamiento considerado} = 7,5 \text{ cm}$$

- Tamaño máximo de agregado, el cual está condicionado por el tipo de mortero que queremos obtener:

$$\text{Tamaño máximo} = 16 \text{ mm}$$

- Tipo de agregados, naturales o provenientes de un proceso de trituración.
- Aplicación de la Ley de Abrams mediante la cual se establece la relación entre la resistencia del mortero y la relación agua/cemento en peso de la mezcla. Esta Ley plantea que para los mismos materiales y condiciones de ensayos, la resistencia de un concreto completamente compactado a una edad dada, solamente depende de la relación entre el peso del agua y el peso del cemento utilizado en la mezcla.

$$\text{Se obtiene } \alpha = 0,46$$

- Dosis de cemento, aplicando relación triangular:

$$c = k.\alpha^m.T^n$$

Considerando el asentamiento de 3" (aprox. 7,5cm) y $\alpha=0,46$, según Porrero (2004), obtenemos el contenido de cemento:

$$c = 440 \text{ Kg/m}^3.$$

El cambio de contenido de agua se cuantifica mediante el empleo de tres coeficientes de corrección:

- C1=1,20 toma en cuenta los cambios del tamaño máximo de agregado.
- C2= 1,0 toma en consideración la curva granulométrica en función de $\beta = A / (A+P)$
- C3=1,0 considera los distintos tipos de agregado.

En definitiva, en contenido de cemento:

$$c = 440.C1.C2.C3 = 528 \text{ Kg/m}^3$$

en contenido de agua:

$$a = 243 \text{ lts/m}^3$$

La cantidad de agua determinada presupone la condición de agregados saturados con superficie seca (SSS). Puesto que ésta no suele ser la condición normal de los agregados es necesario determinar, o cuando menos estimar la humedad de los agregados a utilizarse con el objeto de realizar las correcciones adecuadas.

- Aire atrapado en la mezcla. lts/m^3

P = tamaño máximo de agregado

- Aplicación de la condición de volumen según la cual la suma de los volúmenes absolutos de todos los ingredientes de la mezcla tienen que ser igual al volumen de referencia, que generalmente es de un metro cúbico. Además, como el volumen de la pasta de cemento siempre es menor que el volumen de sus componentes (cemento + agua) es necesario realizar una reducción del volumen de cemento, de allí que su peso por metro cúbico es multiplicado por un factor constante igual a 0,29.

Condición del volumen:

$$\frac{a}{\gamma_a} + c.0,29 + \frac{A}{\gamma_A} + 10.p = 1.000$$

Volumen de pasta:

$$\frac{a}{\gamma_a} + c.0,29$$

Volumen absoluto del agregado fino:

$$\frac{A}{\gamma_A}$$

Porcentaje de aire atrapado:

$$10.p$$

Se mantiene una relación de agua/ligante constante e igual a 0,50.

En las tablas 1, 2 y 3 se indican las proporciones de la mezcla utilizada para las diferentes combinaciones.

Tabla 1. Mezclas de mortero con adiciones de ceniza de cascarilla de arroz.

Descripción	Patrón	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
Contenido ceniza (g)	0	10	15	20	25	30
Cemento (g)	1.250	1.125	1.062,5	1.000	937,5	875
Ceniza cascarilla arroz (g)	0	125	187,5	250	312,5	375
Ligante Total (g)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
Volumen Equivalente (cc)	0	74,26	111,39	148,51	185,64	222,77
Ceniza equivalente (%)	0	6,19	9,49	12,93	16,53	20,29
Arena (g)	3.437,5	3.437,5	3.437,5	3.437,5	3.437,5	3.437,5
Agua (cc)	630	630	630	630	630	630
Relación agua/cemento	0,50	0,56	0,59	0,63	0,67	0,72
Relación agua/ligante total	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Mezcla total (g)	4.687,5	4.687,5	4.687,5	4.687,5	4.687,5	4.687,5
Densidad (g/cm ³)	2,249	2,222	2,209	2,196	2,184	2,171

C.F.: Elaboración propia

Tabla 2. Mezclas de mortero con adiciones de ceniza de hojas de maíz.

Descripción	Patrón	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
Contenido ceniza (g)	0	10	15	20	25	30
Cemento (g)	1.250	1.125	1.062,5	1.000	937,5	875
Ceniza hoja maíz (g)	0	125	187,5	250	312,5	375,0
Ligante Total (g)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
Volumen Equivalente (cc)	0	78,38	117,57	156,77	195,96	235,15
Ceniza equivalente (%)	0	6,51	9,96	13,55	17,29	21,18
Arena (g)	3.437,5	3.437,5	3.437,5	3.437,5	3.437,5	3.437,5
Agua (cc)	630	630	630	630	630	630
Relación agua/cemento	0,50	0,56	0,59	0,63	0,67	0,72
Relación agua/ligante total	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Mezcla total (g)	4.687,5	4.687,5	4.687,5	4.687,5	4.687,5	4.687,5
Densidad (g/cm ³)	2,249	2,226	2,214	2,203	2,192	2,181

C.F.: Elaboración propia

Tabla 3. Mezclas de mortero con adiciones de ceniza de bagazo de caña.

Descripción	Patrón	10 %	20 %	30 %
Contenido ceniza (%)	0	10	20	30
Cemento (g)	1.250	1.125	1.000	350
Ceniza bagazo caña (g)	0	125	250	150
Ligante Total (g)	1.250	1.250	1.250	500
Volumen Equivalente (cc)	0	59,82	119,64	71,78
Ceniza equivalente (%)	0	5,05	10,69	17,02
Arena (g)	3.437,5	3.437,5	3.437,5	1.375
Agua (cc)	630	630	630	252
Relación agua/cemento	0,50	0,56	0,63	0,72
Relación agua/ligante total	0,50	0,50	0,50	0,50
Mezcla total (g)	4.687,5	4.687,5	4.687,5	1.875
Densidad (g/cm ³)	2,249	2,207	2,166	2,127

C.F.: Elaboración propia

Pruebas realizadas a los morteros

Determinación de la consistencia

La consistencia se determinó mediante el flujo de la mezcla, que se obtiene al someter el material al ensayo de la mesa de caídas, según el método ASTM C230 «Specification for Flow table for use in tests of hydraulic cement». El valor del flujo debe estar entre 100 y 110 %, a lo cual corresponde la denominación de consistencia normal. Valores superiores a estos corresponderían a morteros de consistencia fluida, en cambio valores por debajo se obtendrían para morteros de consistencia seca.

Resistencia a la compresión

Para el ensayo se utilizó una máquina Universal Baldwin a velocidad constante de aplicación de carga y con la escala de 5.000 Kg.

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C109 «Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 50 mm cube specimens)», se elaboraron 3 probetas cúbicas de 5,08 cm de lado para cada formulación de mortero, con la finalidad de obtener un promedio representativo. En total 56 probetas para ser ensayadas a 7 días y otras 56 probetas para ensayarlas a 28 días. El curado se realizó por inmersión en agua, los cubos son extraídos del tanque de agua, secados superficialmente y ensayados antes de 1h a velocidad de carga constante.

Índice de actividad puzolánica

El índice de actividad puzolánica es un concepto utilizado por los especialistas del tema para determinar cuán efectivo puede ser un material que se usa como puzolana. Ofrece una idea de la reactividad del material en presencia de cal y agua y normalmente está asociado a la resistencia a compresión que se logra al ser empleado como adición en la elaboración de concreto. Existen diferentes formas de

determinarlo, en este trabajo se utiliza un índice de actividad puzolánica, definido como la relación de resistencias a la compresión del material puzolánico y la de un mortero a base de cemento Pórtland. En general se especifica que dicho índice no debe ser inferior a 0,75, lo que quiere decir que el cemento obtenido con material puzolánico debe tener al menos el 75% de la resistencia del patrón.

Se calcularon los índices de actividad puzolánica para cada material y las diferentes proporciones en que se añaden a los 7 y 28 días.

Densidad de morteros

Al sustituir parte del cemento por otros materiales con diferente gravedad específica, es de esperarse una variación en la densidad final del mortero elaborado. Las tres cenizas son menos pesadas que el cemento, lo cual normalmente es una ventaja ya que como consecuencia, se obtendrían morteros más livianos.

Reactividad potencial y expansión de morteros

La presencia de algunos elementos activos en los agregados del concreto puede generar una reacción de estos con los álcalis del cemento (Na₂O y K₂O), la cual provoca un aumento de volumen del concreto. Las cenizas en estudio, como se observa en la tabla 4, poseen cantidades importantes de óxido de potasio (K₂O), sobre todo la ceniza de bagazo de caña, lo que podría incrementar esas reacciones expansivas.

Para evaluar esta problemática se sigue el método de determinación de la expansión en morteros por medio de barras, según los códigos ASTM C157 «Test Method for length change of hardened cement mortar and concrete», ASTM C227 «Test method for potential alkali reactivity of cement aggregate combinations (Mortar bar method)» y ASTM C441 «Test method for effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to alkali aggregate reaction». Se determina la

susceptibilidad de la combinación cemento-agregados a reacciones expansivas por medio del cambio dimensional que sufren las barras de mortero preparadas con los materiales en estudio.

Se preparan 2 barras de 285 mm de largo y una sección cuadrada de 25 mm por lado, para cada mezcla. Las barras son colocadas en cámara húmeda a 21 °C y las medidas de expansión se realizan en función del tiempo de curado, por medio de un comparador ASTM C490 «Apparatus for use in measurement of length change of hardened paste, mortar and concrete». Las barras se miden antes de ser colocadas en la cámara húmeda y son medidas nuevamente al salir de ésta. Se determina el porcentaje de variación dimensional experimentado durante el ensayo, lo cual nos da la expansión que experimenta la muestra en un ambiente como el que posee la cámara.

Durabilidad

Una manera indirecta de estimar la durabilidad de los morteros de cemento es determinando la expansión que experimenta al ser sumergido en una solución saturada de sulfato de sodio, según el método ASTM C452 «Test method for potential expansion of Portland cement mortars exposed to sulfate». Este medio agresivo tiene un efecto, sobre la muestra, que simula un tiempo de servicio mucho más largo

que el real, produciendo lo que se conoce como envejecimiento acelerado. Se pretende evaluar, de manera indirecta cómo sería el comportamiento de la muestra a largo plazo.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de los materiales cementantes y sus reacciones posibles tanto con los agregados como con el cemento presentes, se preparan 2 probetas de cada muestra de mortero y son sumergidas en una solución saturada de sulfato de sodio. La posible expansión es medida por medio de un comparador ASTM C490 «Apparatus for use in measurement of length change of hardened paste, mortar and concrete», en función del tiempo de exposición. Se realiza el ensayo para cada combinación de los diferentes materiales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización físico química de las cenizas

Desde el punto de vista físico, en la tabla 4 se observa que las tres cenizas tienen una gravedad específica mucho menor que el cemento y que no existen diferencias muy marcadas entre ellas. La baja gravedad específica de las cenizas puede llevar a una ligera reducción en el peso del concreto a elaborar, lo cual podría representar una ventaja económica y constructiva.

Tabla 4. Caracterización físico química de los materiales cementantes utilizados.

Descripción	Cemento	Cenizas		
		Cascarilla de Arroz	Hoja de Maíz	Bagazo de Caña
Propiedades físicas				
Gravedad Específica	3,03	1,80	1,91	1,45
Superficie Específica (cm ² /g)	3.604	9.487	6.328	2.693
Finura (% pasa 325)	82,19	86,74	87,29	77,24
Análisis Químico (%)				
SiO ₂	22,44	80,33	47,62	36,52
Al ₂ O ₃	4,43	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	3,21	0,85	1,58	1,53
CaO	63,41	1,24	5,16	2,69
MgO	0,58	0,43	4,12	4,16
SO ₃	2,55	0,31	0,90	3,35
K ₂ O	0,31	1,87	9,51	22,04
Na ₂ O	0,26	0,33	0,33	0,27
Humedad		9,21	4,53	10,72
Pérdida al fuego	1,75	11,43	17,67	26,40
TiO ₂	0,10	Trazas	Trazas	Trazas
ZnO	Trazas	0,04	0,06	0,03
MnO	Trazas	0,59	0,28	0,26
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	5	N/A	N/A	N/A

C.F.: Elaboración propia

La superficie específica es un indicador de la finura del material y si bien cada ceniza se molió en condiciones similares, se aprecian resultados muy disímiles, obtenidos entre sí. La ceniza de cascarilla de arroz muestra una mayor facilidad de molienda habiéndose obtenido una alta superficie específica de 9.487 cm²/g, mucho mayor que la del cemento, la ceniza de hoja de maíz mostró una superficie específica de 6.328 cm²/g, también superior a la del cemento, en cambio la ceniza de bagazo de caña obtuvo una superficie específica de 2.693 cm²/g, inferior a la del cemento. Este resultado se puede mirar desde otra óptica y afirmar que se requiere menor tiempo de molienda, en el caso de la ceniza de cascarilla de arroz, para obtener la misma finura, lo cual aporta importantes beneficios económicos. La superficie específica tiene gran incidencia en la reactividad de las cenizas (Kenya, 1993; Salas *et al.* 1986; Mehta, 1989; Nagataki, 1994), y por tanto al evaluar posteriormente la resistencia a la compresión, se deben tener presente los resultados de este ensayo.

Desde el punto de vista químico, el elemento más importante es el contenido de Sílice (SiO₂) en las cenizas. Se observa en la tabla 4 que la cascarilla de arroz posee un 80,33 % de sílice, cercano a experiencias previas (Hammond, 1983; Visvesvaraya, 1986), contra un 47,62% para la hoja de maíz y un 36,52 % para el bagazo de caña. Este último muy por debajo de estudios anteriores (Visvesvaraya, 1986; Martirena *et al.* 1997).

Resulta difícil en esta investigación establecer las causas de este bajo porcentaje de sílice, pero probablemente esté asociado a la variedad de caña utilizada para el estudio o a las características del suelo de la zona. Con base en estos resultados se espera que la ceniza de cascarilla de arroz sea la más reactiva, seguida de la hoja de maíz y luego del bagazo de caña. Estos valores no son totalmente precisos. Si se analizan los porcentajes de humedad y de pérdida al fuego, se aprecian valores altos y muy diferentes en cada caso. La ceniza de bagazo de caña posee un 26,4 % de pérdidas al fuego y un 10,72 % de humedad. Estos valores son menores para los casos de la cascarilla de arroz y de la hoja de maíz, pero aún son altos.

Un estudio más específico dirigido a los procesos de obtención de cada material podría mejorar la eficiencia y disminuir la humedad y la pérdida al fuego, con lo cual los materiales serían más puros y por tanto se incrementarían los porcentajes de sílice y con ello la capacidad puzolánica.

Otros elementos a destacar son; la ausencia total de alúmina (Al₂O₃), la cual hubiese aportado cierta capacidad puzolánica, y el alto contenido del álcali, óxido de Potasio (K₂O), presente en la ceniza de hoja de maíz y más aún en la ceniza de bagazo

de caña. La presencia de este álcali es perjudicial para el concreto, por la posibilidad de que reaccione con el agregado, con la consecuente expansión que normalmente genera esta reacción.

Pruebas realizadas a los morteros

Determinación de la consistencia

Como se puede observar en la figura 1, se obtuvo un flujo de 106 % (consistencia normal) para la muestra patrón, cuando se utilizó una relación agua/ligante (cemento más ceniza) de 0,5. Para este estudio se mantuvo constante esa relación agua/ligante y se determinaron las variaciones que experimenta el flujo en la medida que se añade cenizas a la mezcla.

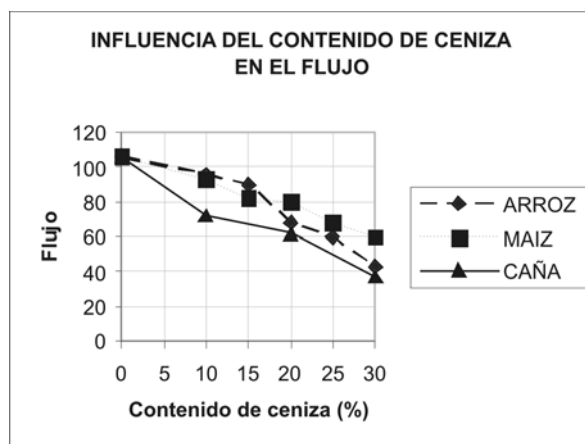


Figura 1. Influencia del contenido de ceniza en el flujo de las mezclas. C.F.: Elaboración propia

Se puede apreciar que no hay diferencias marcadas entre los diferentes materiales, sin embargo si se destaca el incremento que experimenta la consistencia de la mezcla en la medida en que aumentamos el contenido de ceniza.

A pesar de que otros autores han demostrado que las adiciones de puzolanas tienden a mejorar la trabajabilidad de la mezcla, (Metha, 1989; Payá *et al.* 2002), se ha determinado que cuando las puzolanas tienen una finura alta tienden a necesitar mayor cantidad de agua para el mezclado y cuando esto se hace más notable se recurre al uso de aditivos plastificantes para evitar un uso excesivo de agua y mantener altos los valores de resistencia a compresión (Metha, 2000; Nasvik, 2006). Esto constituye una de las principales dificultades al utilizar las cenizas como adición al concreto porque este aumento de la consistencia obliga a utilizar mayor cantidad de agua para lograr la consistencia normal.

Resistencia a la compresión

La experiencia internacional demuestra que el uso de adiciones puzolánicas puede mejorar la resistencia mecánica del concreto (Mejía, *et al.* 2007; Águila, 2001). Como se puede apreciar en la tabla 5, la adición de ceniza al cemento provoca variaciones en la resistencia a compresión de las mezclas elaboradas con él. Este comportamiento se nota asociado a la cantidad de sílice presente en la ceniza. Así, en el caso de la ceniza de cascarilla de arroz, donde la cantidad de sílice es mayor, se aprecian incrementos en la resistencia respecto a la muestra patrón, para adiciones inferiores al 25 %. En el caso de la ceniza de hoja de maíz el incremento en la resistencia se experimenta sólo para el 10 % de sustitución y tiende a disminuir ligeramente en la medida en que se incrementa el porcentaje de sustitución. La ceniza de bagazo de caña, con un porcentaje menor de sílice y menos finura, experimenta descensos drásticos de la resistencia en función del incremento del porcentaje de sustitución. La cascarilla de arroz muestra valores muy interesantes, destacando el hecho de que para sustituciones de 20% de cemento por ceniza se logra un incremento de la resistencia a compresión de casi un 14 % a los 28 días.

Si hacemos un análisis de la velocidad de fraguado para las muestras con adiciones de ceniza de cascarilla de arroz y de

hoja de maíz, que son las que manifiestan actividad puzolánica, vemos que ésta es más lenta que para las muestras sin adición. Se puede afirmar esto al notar que, para las muestras con adición, la resistencia a compresión a los 7 días disminuye levemente en la medida que se añade más cenizas. En cambio a los 28 días se experimentan incrementos de resistencia a compresión para muestras con adiciones entre 10 y 20 % aproximadamente. Sin embargo, a edades avanzadas (90 días), aunque los valores de resistencia a compresión siguen aumentando, este aumento es proporcionalmente inferior al de la muestra patrón.

Índice de actividad puzolánica

El ensayo indica, según la tabla 6 y la figura 2, que la ceniza de hoja de maíz y más aún la de cascarilla de arroz, poseen un aceptable índice de actividad puzolánica, cuando se combinan con cemento en proporciones inferiores al 30 %, no así las combinaciones resultantes de la ceniza de bagazo de caña cuyo índice de actividad puzolánica resultó siempre muy inferior a 0,75. Todo esto está asociado, lógicamente, al comportamiento de la resistencia a la compresión, la cual se utilizó como indicador para la determinación del índice de actividad puzolánica de los materiales.

Tabla 5. Resistencia a la compresión a 7, 28 y 90 días.

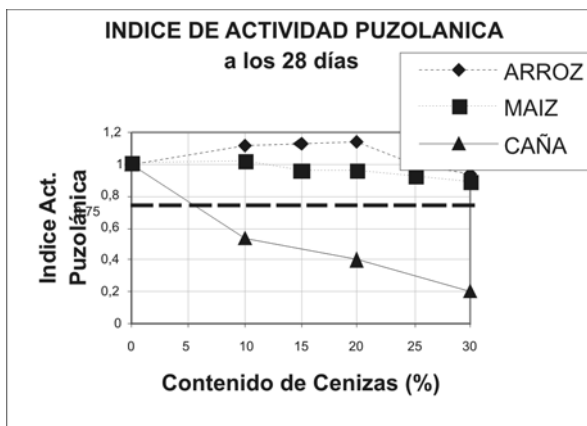
Muestra	% de ceniza	Resistencia 7 días (Kg/cm ²)	% Respecto al patrón	Resistencia 28 días (Kg/cm ²)	% Respecto al patrón	Resistencia 90 días (Kg/cm ²)	% Respecto al patrón
Cemento 100 %	0	301	100	413	100	474	100
Cemento + Ceniza de hoja de maíz	10	264	87,7	425	102,9	487	102,7
	15	298	99,0	397	96,1	455	96
	20	254	84,4	398	96,3	463	97,7
	25	258	85,7	381	92,2	452	95,4
	30	249	82,7	367	88,9	414	87,3
Cemento + Ceniza de cascarilla de arroz	10	242	80,4	458	110,9	545	115
	15	274	91,0	463	112,1	519	109,5
	20	315	104,6	470	113,8	507	107
	25	219	72,8	413	100	428	90,3
	30	258	85,7	389	94,2	447	94,3
Cemento + Ceniza de bagazo de caña	10	205	68,1	223	54	298	62,6
	20	124	41,2	163	39,5	221	46,6
	30	66	21,9	84	20,3	69	14,6

C.F.: Elaboración propia

Tabla 6. Índice de actividad puzolánica a 7 y 28 días.

IAP	Cemento Pórtland	Cenizas			
		% sustitución	Arroz	Maíz	Caña
Índice de Actividad Puzolánica 7 días	1	10	0,804	0,877	0,681
		15	0,910	0,990	-
		20	0,967	0,841	0,412
		25	0,728	0,857	-
		30	0,857	0,827	0,219
Índice de Actividad Puzolánica 28 días	1	10	1,108	1,029	0,540
		15	1,121	0,961	-
		20	1,138	0,964	0,395
		25	1,000	0,923	-
		30	0,942	0,889	0,203

C.F: Elaboración propia.

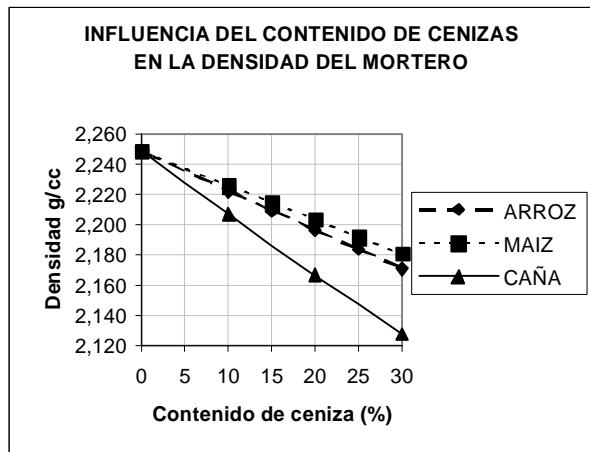


C.F: Elaboración propia.

Figura 2. Índice de actividad puzolánica a los 28 días.

Densidad de morteros

Se aprecia en la figura 3, como en la medida que se incrementa la cantidad de ceniza en la mezcla disminuye proporcionalmente la densidad del mortero. Esto se hace más evidente para las muestras con adiciones de ceniza de bagazo de caña.



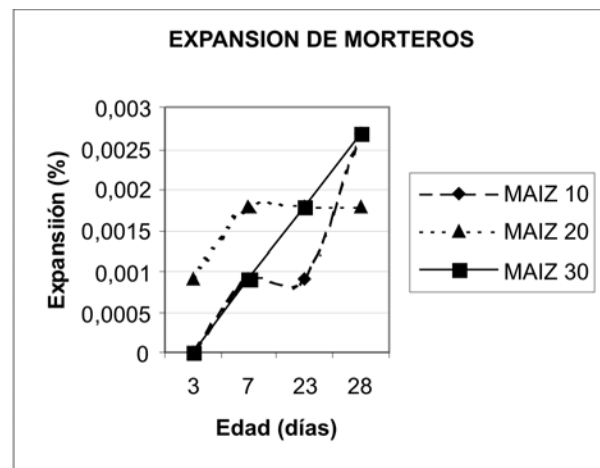
C.F: Elaboración propia.

Figura 3. Influencia del contenido de ceniza en la densidad del mortero.

Reactividad potencial y expansión de morteros

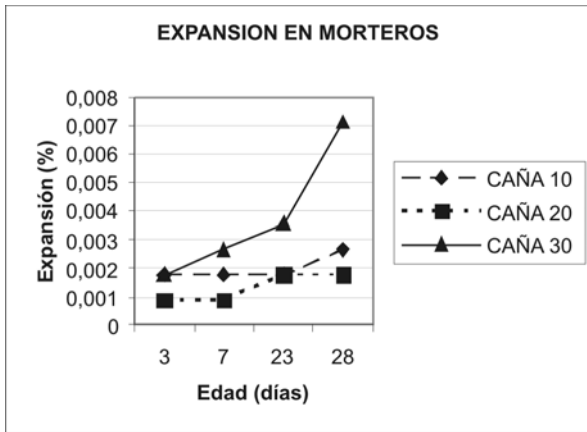
En las figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados del ensayo de expansión de morteros en función del tiempo y para cada una de las combinaciones prediseñadas.

Se constata que en las condiciones de curado (inmersión en agua), el cambio dimensional fue relativamente pequeño y poco variable en función del porcentaje de sustitución. Los valores fueron inferiores a 0,003 % en todas las muestras con adición de cenizas de cascarilla de arroz y de hoja de maíz. Sin embargo, se observa que los morteros con cenizas de bagazo de caña presentan un significativo mayor cambio dimensional relativo, que los otros morteros, el cual llegó a superar el 0,007 % a los 28 días, para la muestra con mayor porcentaje de adición (30 %). Se pudiera intuir una correlación importante con el contenido de álcalis (K_2O) que presenta esta ceniza, sin embargo se requeriría profundizar en este aspecto en estudios posteriores para llegar a conclusiones definitivas.



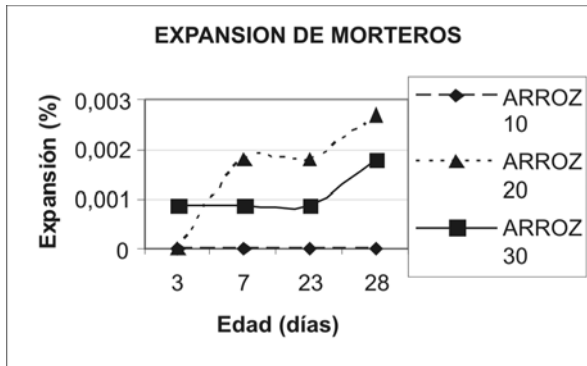
C.F: Elaboración propia.

Figura 4. Expansión de morteros con ceniza de hoja de maíz por inmersión en agua.



C.F.: Elaboración propia

Figura 5. Expansión de morteros con ceniza de bagazo de caña por inmersión en agua.



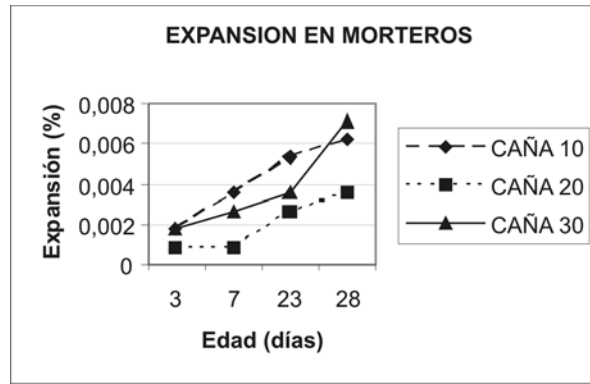
C.F.: Elaboración propia

Figura 6. Expansión de morteros con ceniza de cascarilla de arroz por inmersión en agua.

Durabilidad

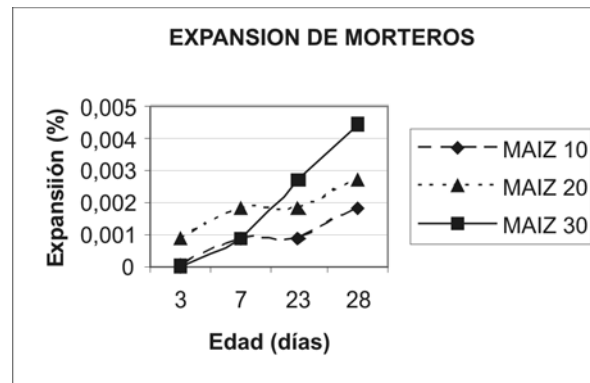
En general los niveles de expansión son bajos, como se aprecia en las figuras 7, 8 y 9, pero al igual que en el caso anterior, se aprecia un mejor comportamiento en las cenizas de cascarilla de arroz y de hoja de maíz que en la correspondiente al bagazo de caña. Esta prueba indica que los morteros elaborados gozan de buena estabilidad química al ser sometidos a ambientes agresivos.

Respecto al ataque de cloruros, Mejía, *et al.* (2007) explican como la adición de varios tipos de puzolanas al concreto disminuye la penetración de iones cloruro, al aumentar la capacidad de la mezcla para enlazar dichos iones, a la vez que disminuye el diámetro de poros y con ello la permeabilidad al agua.



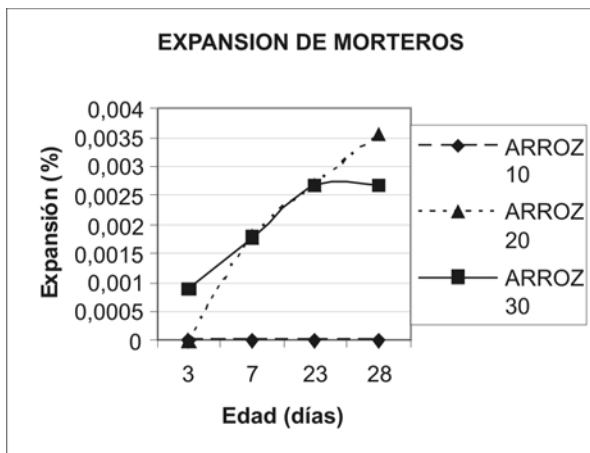
C.F.: Elaboración propia

Figura 7. Expansión de morteros con ceniza de bagazo de caña por inmersión en solución saturada de sulfato de magnesio.



C.F.: Elaboración propia

Figura 8. Expansión de morteros con ceniza de hoja de maíz por inmersión en solución saturada de sulfato de magnesio.



C.F.: Elaboración propia

Figura 9. Expansión de morteros con ceniza de cascarilla de arroz por inmersión en solución saturada de sulfato de magnesio.

CONCLUSIONES

Se verificó que las cenizas de cascarilla de arroz y de hoja de maíz se pueden utilizar como sustitutos parciales del cemento Pórtland en la elaboración de concretos ordinarios.

Siendo el porcentaje de sílice en la ceniza uno de los elementos principales para una puzolana de buena calidad se pudo apreciar que en este sentido la cascarilla de arroz es el material de mayor potencialidad. En este caso se logró una ceniza con poco más de 80 % de sílice en su composición, en tanto que la ceniza de hoja de maíz presentó cerca de un 48 % de sílice, que si bien no muy alto, es un valor aceptable. La ceniza de bagazo de caña resultó menos efectiva en este sentido con un poco más del 36 % de sílice en su composición.

Las adiciones de ceniza de cascarilla de arroz provocan incrementos en la resistencia a la compresión, siendo el porcentaje ideal de sustitución de 20 %. La ceniza de hoja de maíz experimentó un ligero incremento en su resistencia a compresión para pequeños porcentajes de sustitución y en general se puede apreciar que se logra hasta el 20 % sin afectaciones mayores de la resistencia. Las muestras contentivas de ceniza de bagazo de caña no mostraron posibilidades de ser empleadas como material puzolánico, sin embargo en el análisis de su composición química se pudo apreciar que se presentaron en el material altos contenidos de humedad con un 10,72 % y de pérdida al fuego de 26,40 %. Un estudio más riguroso del proceso de obtención podría disminuir esos porcentajes y con esto aumentar el porcentaje de sílice y con él la reactividad. Se recomienda entonces, para futuras investigaciones, estudiar con mayor detenimiento los procesos de obtención de la ceniza de bagazo de caña y de igual forma de hoja de maíz.

Además se pudo apreciar una mejoría en la estabilidad química y la durabilidad del cemento cuando se le añade ceniza, lo cual aumenta la factibilidad del empleo de ésta en elementos que estarán sometidos a ambientes agresivos.

Como aspecto negativo se apreció que la adición de ceniza al cemento provoca una demanda mayor de agua para el amasado de la mezcla, lo cual tiende a disminuir su resistencia mecánica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), al Instituto Venezolano de Investigaciones Tecnológicas e Industriales (INVESTI) y al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT), por el apoyo a la investigación.

REFERENCIAS

- ÁGUILA, I. (2001). Cementos puzolánicos, una alternativa para Venezuela. *Tecnología y Construcción*. IDEC-FAU-UCV, Caracas, 17-III; 27-34.
- CACHAN, A. (2001). Cementos. Andalucía. *Encuentro Medioambiental Almeriense: En busca de soluciones*. Andalucía. 29 p.
- FEDEAGRO. (2007). Estadísticas agrícolas. Producción Agrícola. Disponible en: <http://www.fedeagro.org/produccion/default.asp> (tomado 10-08-2007).
- HAMMOND, A. (1983). Pozzolana cements for low cost housing. *Appropriate Building Materials for low cost housing*, Proceedings of a Symposium, CIB, RILEM. Nairobi, 73-83.
- HENDRIKS, C.A., WORRELL, E., DE JAGER, D., BLOCK, H. Y RIEMER, P. (2004). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. 11 p. Disponible en: <http://www.wbcscd.ch/web/projects/cement/tf1/prghgt42.pdf> (tomado 16-08-2007).
- MARTIRENA, J.F. (2003). Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Pórtland: El aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. *Resumen de la Tesis*. p 65. Disponible en: <http://www.ecohabitar.org/> (tomado 12-04-2007).
- MARTIRENA, J.F., MIDDENDORF, B., BUDELMANN, H. GEHRKE, M. (1997). Estudio de la reacción de hidratación de aglomerantes de cal puzolana fabricados en base a desechos de la industria azucarera. *Informe resultado de trabajo de investigación*. UCLV, Santa Clara. 20 p.
- MEHTA, P.K. (2000). Avances en la Tecnología del Concreto. *Construcción y Tecnología*. IMCYC, México. Octubre 2000.
- MEHTA, P.K. (1989). Pozzolan and Cementitious By-Products in Concrete - Another look. *Third International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. Trondheim, 1-43.
- MEJÍA, R., TALERO, R., DELVASTO, S. (2007). Efecto de adiciones en la resistencia mecánica y durabilidad de morteros. *International conference on non-conventional materials and technologies: Ecological materials and technologies for sustainable building*. Maceió.

NASVIK, J. (2006). El ABC del concreto autocompactable. México. *Construcción y Tecnología*. IMCYC, México. Marzo 2006, 50-55.

OFICEMEN. (2006). Producción mundial de cemento. Disponible en: <http://www.oficemen.com/eventos/pdf/ProduccionMundial2005.pdf> (tomado el 15-08-2007).

PAYA, J., MONZÓ, J., BORRACHERO, M.V., SERNA, P., VELÁSQUEZ, S., ORDÓÑEZ, L.M. (2002). El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas. *VIII Congreso nacional de propiedades mecánicas de sólido*. Gandia, 591-600.

PORRERO, J., RAMOS, C., GRASES, J., VELAZCO, G. (2004). *Manual del concreto estructural*. Caracas. SIDETUR.

UNITED NATIONS CENTRE FOR HUMAN SETTLEMENTS (HABITAT). KENYA. (1993). Development of Pozzolanic Cement using Rice Husk Ash. *Endogenous Capacity-Building for the production of binding materials in the Construction Industry. Selected case studies*. Nairobi, 66-81.

VISVESVARAYA, H.C. (1986). Recycling of agricultural wastes with special emphasis on Rice Husk Ash. *Use of vegetable plants and their fibers as building materials*, Joint Symposium, RILEM. Bagdad, E1-E22.