

Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera (primera parte)

Pozzolanic properties of residues of sugar industries (first part)

J.F.MARTIRENA-HERNÁNDEZ¹, S.BETANCOURT-RODRÍGUEZ¹, B.MIDDENDORF², A.RUBIO¹, L.MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ¹, I.MACHADO-LÓPEZ¹, R.GONZÁLEZ-LÓPEZ¹

Fecha de recepción: 31-III-99
Fecha de aceptación: 24-VII-00

⁽¹⁾Univ Central de Las villas. CUBA
⁽²⁾Univ. Gh Kassel. ALEMANIA

RESUMEN

Las cenizas de bagazo y paja de caña de azúcar (CPC, CBC), obtenidas en forma inalterada directamente de las calderas de la fábrica de azúcar, y de la quema incontrolada en el campo, representan una interesante fuente de puzolana reactiva, con potencialidad de ser usada en la preparación de aglomerantes del tipo cal/puzolana. El trabajo que se presenta realizó una evaluación integral de estas puzolanas, con el interés de utilizarlas como materia prima en la producción de aglomerantes.

SUMMARY

Non altered straw and sugar cane bagasse ash (CPC, CBC) collected directly from the boilers in the sugar industry and from non-controlled burning in the open fields turned up to be a reasonably good pozzolana, which can be utilized for the manufacture of lime-pozzolana binders. This paper presents a detailed survey of this material with the aim to use it as raw material in the manufacture of binders.

INTRODUCCIÓN

Los aglomerantes de tipo cal puzolana se han convertido recientemente en una atractiva alternativa para la construcción social en países en vías de desarrollo. Entre las puzolanas más usadas frecuentemente están las tobas y cenizas volcánicas.

Varios residuos de la industria y la agricultura han demostrado tener propiedades puzolánicas, entre ellos las Cenizas Volantes de Carbón (PFA) desechadas en plantas generadoras de energía, y las Cenizas de Cascarilla de Arroz (RHA) (1).

Hay estudios recientes que demuestran que los desechos agrícolas e industriales de la Industria Azucarera, principalmente las Cenizas de Bagazo de Caña (CBC), y

las Cenizas de Paja de Caña (CPC) tienen actividad puzolánica, debido al alto contenido de sílice (SiO_2) presente en estos materiales (2,3).

ANTECEDENTES

En los residuos agrícolas combustionados, con propiedades puzolánicas reconocidas, la actividad puzolánica depende principalmente de la temperatura de combustión, que debe oscilar entre 400 °C-800 °C (1, 4, 5, 6, 7, 8) para evitar la formación de fases cristalinas de sílice producto de las altas temperaturas en la combustión. Las cenizas producidas bajo estas condiciones son consideradas de buena calidad.

Sin embargo, la evidencia definitiva de la actividad puzolánica de un material es su resistencia, combinada

con su durabilidad (9, 10, 11). Se han dado casos de puzolanas que no pasan con éxito los tests de puzolanidad, pero a pesar de esto tienen una buena actividad puzolánica (9). Por lo tanto es recomendable hacer ensayos mecánicos siempre que sea posible.

La alta presencia de material cristalino en las cenizas procesadas es motivada por las elevadas temperaturas de combustión, tanto en las calderas (CBC), como en las piras que se realizan en los campos (CPC). Este mineral cristalino es poco reactivo, y, por ende, la actividad puzolánica de las cenizas es relativamente baja. Si se logra que la combustión ocurra bajo condiciones controladas, a temperaturas bajas y tiempos de residencia fijos, la presencia de mineral amorfo se incrementa, lo que incide de forma directa sobre la reactividad de las cenizas.

PROGRAMA CIENTÍFICO DE TRABAJO

El presente trabajo se orientó a demostrar, de forma convincente, la formación de productos estables como resultado de la reacción de hidratación de pastas de cal-puzolana, usando CPC y CBC como puzolanas. Esto es importante para poder asegurar la calidad y durabilidad de las producciones realizadas con el aglomerante cal-puzolana. Este trabajo constituye la principal base teórica desarrollada para justificar las aplicaciones prácticas presentadas más adelante.

METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO

La evaluación se realizó principalmente en pastas de consistencia normal (ASTM), fabricadas sobre la base de aglomerante cal-puzolana, usando las cenizas (CBC/CPC), como fuentes de puzolana. Se decidió el uso de pastas para evitar errores de interpretación en los resultados de los diferentes ensayos realizados.

Las puzolanas usadas fueron estudiadas de forma independiente previo a su mezcla con la cal. Se realizaron estudios de composición química, actividad puzolánica y estudios mineralógicos (XRD)

Se determinaron las relaciones molares cal:silíce con el objetivo de obtener la proporción óptima cal:puzolana a usar en la fabricación de las pastas. Las proporciones óptimas varían para cada puzolana estudiada pero, de forma general, oscilan entre un 25-30% (cal), y un 70-75% (puzolana) (proporción gravimétrica)

Se fabricaron pastas con ambas puzolanas (CBC y CPC), además de un grupo de control, fabricado con RHA.

Las pastas fueron preparadas, y vertidas en pequeños moldes cilíndricos de 3 cm de diámetro por 5 cm de

altura. Luego fueron curadas a temperatura constante en espera de los ensayos a realizar. Desde los primeros momentos de su fabricación las muestras fueron protegidas para que no estuvieran en contacto con el CO₂ de la atmósfera, en prevención de la ocurrencia de la carbonatación. Se hicieron los siguientes estudios:

Estudios mineralógicos sobre la base de DRX en pastas de 3, 7, 14, 28, 60 y 90 días: Se hizo un muestreo de los cambios de fases cristalinas que ocurrieron durante los primeros 90 días en las pastas evaluadas.

. Estudios morfológicos, con la ayuda del SEM, en pastas de 28 días de edad.

. Estudio de la evolución de la estructura de poros de las pastas, por medio de ensayos en el Porosímetro por Intrusión de Mercurio.

. Evolución de la resistencia mecánica de pastas en el tiempo. Se hicieron ensayos a flexión y compresión de prismas de pastas de consistencia normal.

. Evaluación de la influencia de distintas sustancias empleadas como aditivos, entre ellas el CaSO₄.H₂O (yeso), y el NaSO₄.

Estos estudios realizados permitieron al equipo monitorear y estudiar la cinética de la reacción de hidratación. Para esto se emplearon varios enfoques:

1. Determinar la velocidad de desaparición del Ca(OH)₂ como medida del avance de la reacción. La producción de hidrosilicatos de Calcio (C-S-H) se realiza a costa del consumo del hidróxido de Calcio (HC) que se suministra a la puzolana. La velocidad con que este producto es consumido puede ser un indicador importante del avance de la reacción de hidratación, siempre que se evite que se produzca la carbonatación de la muestra producto del contacto con la atmósfera. La presencia de HC se puede detectar en los difractogramas (XRD), y por medio de estudios de Termo-Gravimetría (TG) (pérdidas de peso por la liberación del CO₂).

2. Establecer posibles avances de la reacción de hidratación a partir de evaluar la evolución de la estructura de poros en las pastas, y comparar con estudios similares en pastas fabricadas con cemento Portland ordinario. Sobre todo estudiando las proporciones relativas de cada tipo de poros evaluado (poros de gel, poros capilares, poros por aire ocluido). El incremento de valor de la reacción se caracteriza por un aumento de los poros de gel, que se forman al precipitarse nuevos productos de reacción, que ocupan los espacios libres entre los granos. Los estudios se hacen en las pastas hidratadas por medio del Porosímetro por intrusión de Hg.

3. Identificar nuevos productos de la reacción. Para esto se examinaron las muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), usando además técnicas de Dispersión de Energía de Rayos X (EDX) para identificar los elementos presentes en cada nueva morfología surgida. Se empleó como patrón de comparación fotos de pastas de cemento portland ordinario de 28 días de edad. Comparando la forma y composición de cada nueva fase observada en el SEM, se puede afirmar, de forma indirecta, la presencia de productos de la reacción previamente identificados en pastas de cemento portland ordinario, como, por ejemplo, los hidrosilicatos de Calcio. La presencia de C-S-H fue confirmada, además, con la ayuda de los estudios de XRD realizados en pastas de diferentes edades, donde las fases cristalinas de C-S-H pueden ser identificadas.

4. Corroborar todas las hipótesis anteriores con ensayos de las propiedades mecánicas de las pastas evaluadas. Si los enfoques anteriores apuntan a afirmar que se producen determinados productos de reacción estables, que le brinden propiedades cementantes, la mejor forma de verificar que esto es verdadero es precisamente realizando el ensayo de las propiedades mecánicas de prismas moldeados con las pastas anteriormente estudiadas. Si se comprueba que las propiedades mecánicas son las

esperadas, entonces no hay nada que impida llegar a conclusiones sobre lo que está pasando en las pastas hidratadas. De lo contrario, habría que realizar nuevamente las pruebas anteriores para comprobar su veracidad.

Estos estudios fueron simultaneados con la evaluación del efecto de aditivos sobre las propiedades puzolánicas de las pastas fabricadas. Se empleó principalmente $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (yeso), y el NaSO_4 , que han sido mencionados ampliamente en la literatura por su efecto de acelerar la hidratación de las pastas hechas sobre la base de cal-puzolana (12, 13), además de tener influencia en el endurecimiento de las pastas.

En la Figura 1 se muestra un esquema en forma de diagrama de bloques, donde se reseña, brevemente, la metodología de trabajo empleada.

CENIZAS INALTERADAS

Las CBC fueron extraídas directamente de las calderas del Complejo Agroindustrial Azucarero (CAI) "10 de Octubre" en la provincia de Villa Clara, Cuba. En búsqueda de consistencia y representatividad en los resultados este estudio fue repetido en su integridad para las cenizas del

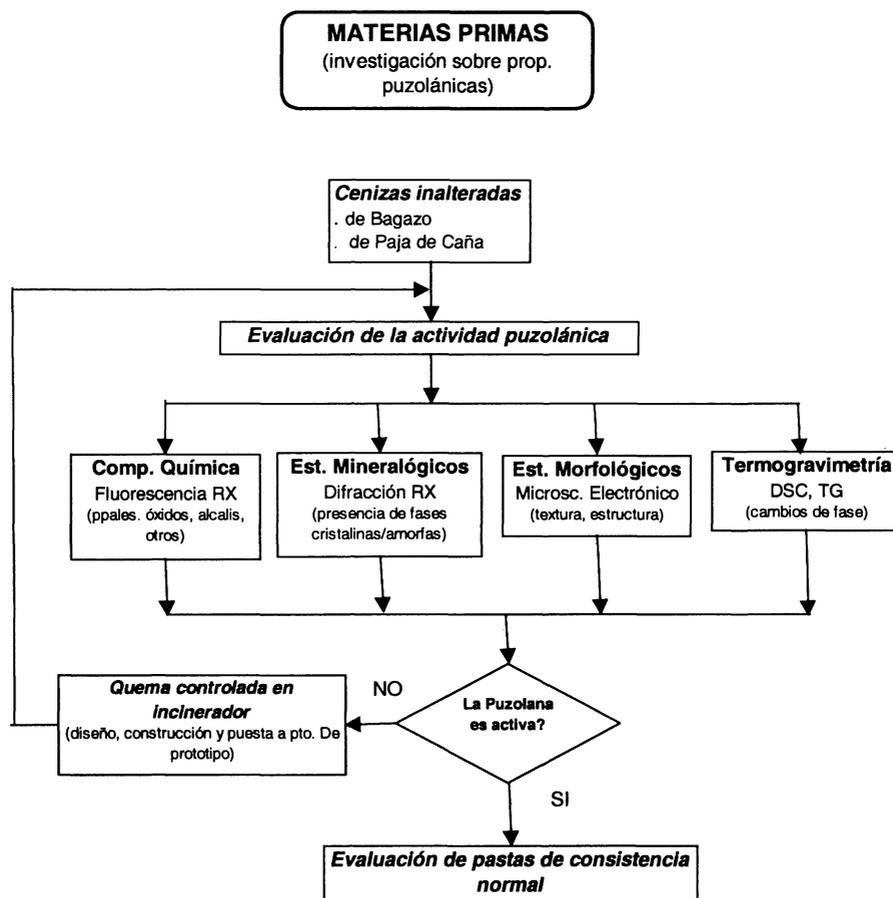


Figura 1.- Programa para la ejecución de la investigación.

CAI "Héctor Rodríguez", también de la provincia de Villa Clara. De forma independiente, y con similares objetivos, se hicieron algunos estudios individuales en otros CAI del país, aunque sus resultados no se incluyen en este trabajo.

Las CPC fueron tomadas directamente de las acumulaciones de cenizas del Centro de Limpieza del CAI "México", en la provincia de Matanzas, Cuba. Por similares razones, se procedió a repetir el estudio para las CPC resultado de la quema al aire libre de la Paja de Caña en el CAI "Héctor Rodríguez", de Villa Clara.

Se evaluó un tercer grupo de puzolanas, considerado en este trabajo como grupo de control. Se seleccionaron las RHA, cuya actividad puzolánica ha sido consistentemente demostrada en la bibliografía (1, 4, 14, 15).

La composición química de las cenizas fue determinada por medio de las técnicas de Fluorescencia de Rayos X. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Las muestras empleadas para la ejecución de ensayos tuvieron que ser quemadas con el objetivo de eliminar sustancias no deseadas, como, por ejemplo, el carbón, y materia orgánica sin combustionar.

Los estudios confirmaron que las cenizas contienen un elevado contenido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3), en condiciones tales que satisfacen las exigencias de las regulaciones internacionales (ASTM para cenizas tipo F).

Las muestras fueron sometidas a estudios mineralógicos, en busca de fases cristalinas de sílice. Se ha confirmado la presencia significativa en ambas muestras de cuarzo y cristobalita, esto indica que la temperatura de combustión fue en algunos casos superior a los 800 °C. Sin embargo

la forma del diagrama de XRD (ver Figura 2) sugiere la presencia de una determinada cantidad de material amorfo, probablemente fases de sílice. Este material amorfo se encuentra en proporciones dentro un 5% y un 10%. Se atribuye la reactividad de estas cenizas a la presencia de este mineral amorfo.

Se realizaron estudios de Termogravimetría y Análisis Térmico Diferencial para detectar cambios de fase por debajo de los 800 °C. Estos estudios fueron complementados con la observación de las muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

Se realizaron además estudios de tipo morfológico, con la ayuda del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Estos estudios mostraron partículas con formas irregulares, de tipo esponjoso, sin presencia de cenosferas, indicio de las bajas temperaturas de combustión. Estas formas de tipo "cavernosas" son la principal razón de las altas superficies específicas de estas cenizas, que se supone sea la causa directa de la alta demanda de agua de las pastas y morteros hechos con el aglomerante cal puzolana. Se encontró evidencia de la presencia de carbón sin quemar (ver Figura 3).

CENIZAS QUEMADAS DE FORMA CONTROLADA

Ya es conocido que las altas temperaturas de combustión afectan la reactividad de las cenizas usadas como puzolanas. Resulta entonces imprescindible tratar de lograr una combustión controlada de los residuos agrícolas, para optimizar la reactividad de las cenizas a producir.

Para este fin se hace necesaria la concepción de una instalación para incineración, diseñada para que en ella se

TABLA 1
Composición química de las cenizas utilizadas

Compuesto	RHA	CBC	CPC
SiO_2	71.74	72.74	59.06
Al_2O_3	5.61	5.26	4.75
Fe_2O_3	3.47	3.92	3.18
TiO2	0.38	0.32	0.34
CaO	10.42	7.99	19.59
MgO	1.98	2.78	2.25
SO3	0.5	0.13	1.37
K2O	3.62	3.47	4.75
Na2O	0.4	0.84	0.73
P2O5	0.89	1.59	1.67
Pérdidas por ignición	0.78	0.77	2.05
TOTAL	99.79	99.81	99.74

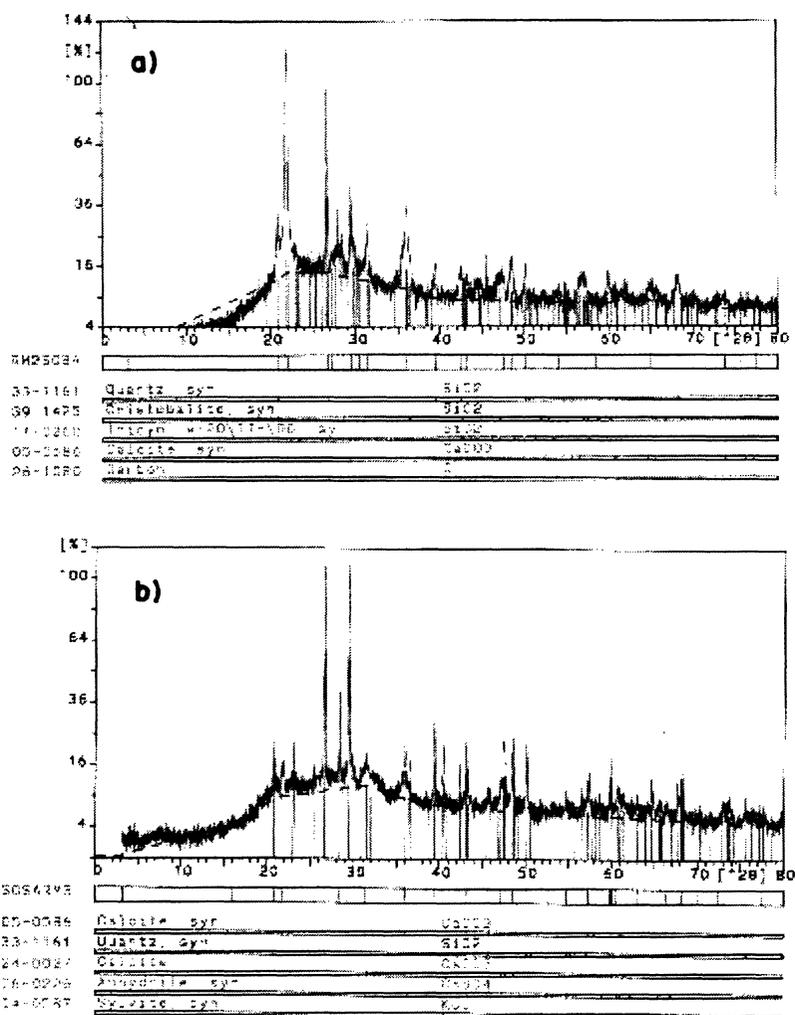


Figura 2.- Difractogramas de Rayos X de muestras de: a) cenizas de bagazo de caña, b) cenizas de paja de caña.

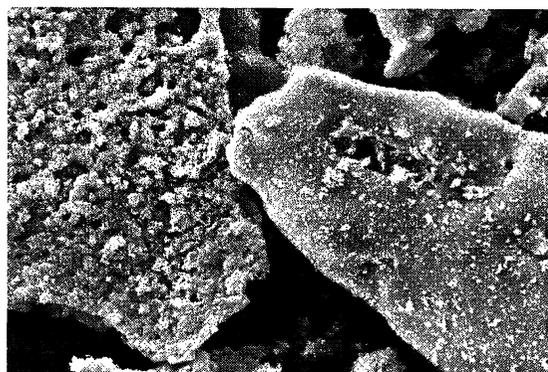


Figura 3.- Imagen de SEM de la ceniza.

puedan ejecutar quemas controladas de los residuos agrícolas. Este trabajo incluye el diseño, construcción de prototipo y pruebas de campo de un modelo de incinerador.

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL INCINERADOR

Existen varias referencias sobre construcción y explotación de todo tipo de incineradores para quemar de

forma controlada biomasa, con el objetivo de producir cenizas activas (2,3,4,6,7,8,10).

Los incineradores que han sido mencionados como con mayor éxito por Mehta son los del tipo Cama Fluidizada (Fluidized Bed Boiler). Los inconvenientes de este tipo de incinerador son sus altos costos de inversión inicial y de operación y que obliga a procesar grandes cantidades de material para que la inversión sea viable económicamente. Es prácticamente imposible diseñar y construir uno de estos incineradores para talleres de producción intermitente a pequeña escala.

Se han probado además algunos incineradores rústicos (6, 7, 8), contruidos con materiales simples y de bajo costo, pero su problema radica en la baja productividad que obliga a construir una batería de varios incineradores operando a la vez, para producir cantidades razonables de cenizas. Esto, a pesar de que ha funcionado a pequeña escala, genera costos de inversión y operación relativamente altos, sobre todo comparados con los niveles de productividad del taller.

El problema está entonces en diseñar una instalación que permita realizar una combustión controlada, con niveles adecuados de productividad (al menos 25 kg/h), y con bajos costos de inversión y operación. Esta tarea fue ejecutada dentro del programa de investigación aplicada y su realización se coordinó con el Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA) de la Universidad Central de las Villas (16)

El diseño se realizó teniendo en cuenta experiencias anteriores (6, 7, 8). Los principales aspectos considerados fueron:

- . Garantizar que en todo momento la biomasa esté a menos de 40 cm de la superficie de la pila en contacto con el aire. Esto permite controlar la temperatura de la masa ardiente por debajo de los 800 °C.
- . Organizar el enfriamiento de la cámara a partir de crear un tiro natural de aire, que permita evacuar los gases de combustión y regular la temperatura de la cámara de combustión.
- . El tiro debe ser tal que haga que la velocidad del aire que fluye sea menor que la velocidad de arrastre de las partículas depositadas luego de la combustión, generalmente residuos (cenizas volantes).
- . Permitir una evacuación simple de las cenizas, sin que sea necesario esperar a apagar el horno. Similares condiciones son exigidas para la alimentación del horno.

Las paredes fueron concebidas para ser construidas en ladrillo rojo, ya que las temperaturas en ningún caso excederán los 800 °C, y, por tanto, no hay necesidad de usar ladrillos refractarios. Las puertas y parrilla fueron construidas en acero de construcción, dotadas de su conveniente protección térmica. El casquete, junto a la chimenea, fue también construido en acero laminado, aunque en versiones posteriores ha sido también construido con ladrillos.

La cámara de combustión tiene una división natural que permite que el aire fluya entre una pared metálica construida y la pared exterior. La pared exterior es construida en ladrillo a cistaron, con toberas distribuidas uniformemente. La función de estos dispositivos es alimentar el extra de aire requerido para la combustión

La sobrealimentación de aire tiene dos efectos favorables: primero, disminuye la temperatura de la cámara de combustión y, por ende, de las cenizas. En segundo lugar, acelera la combustión y evita la formación de carbón por efecto de causa local de pirólisis en algunos puntos de la

cámara de combustión. Es evidente que con estas características, la eficiencia energética es baja, pero esa no es la razón de ser del horno.

La Figura 4 muestra una foto de un incinerador después de construido.

Debido a errores constructivos no se incluyeron todas las toberas necesarias, razón por la que fue necesario elevar la chimenea para aumentar el tiro de aire. No se consideró inicialmente la diferencia entre la humedad con que entra cada tipo de biomasa (por ejemplo, la cascarilla de arroz tiene al quemarse un 10-12% de humedad, mientras que la paja de caña de azúcar tiene un 50% aproximadamente), lo que provoca un incremento sustancial de los gases emitidos en la combustión, aumentando la demanda de tiro para extraerlos.

Las deficiencias del tiro del prototipo crearon una serie de problemas:

- . *Falta de aire a la combustión* Provocado por el exceso de gases, hace que la combustión sea sin llama viva y muy lenta. Este fenómeno puede ser resuelto con el aumento de las toberas.
- . *Baja capacidad de operación* La combustión que ocurre es muy lenta, lo que hace que la productividad inicialmente esperada (para cascarilla de arroz como combustible) de 60 kg/h se reduzca a unos 12 kg/h aproximadamente.

Corregidos algunos de los problemas iniciales, se procedió a realizar quemas experimentales de paja de caña, para



Figura 4.- Incinerador experimental construido en Sagua la Grande. Cuba.

tomar mediciones de las temperaturas de combustión en la cámara. Para este fin se dispuso de termopares para medición de temperatura en hornos.

De igual forma se procedió a evaluar las cenizas producidas, con criterios muy similares a los empleados con las cenizas inalteradas, ya expuestos en este trabajo (16).

Los aspectos más importantes de estas mediciones fueron (16):

- . Las temperaturas máximas alcanzadas, medidas en varios puntos de la cámara de combustión, no sobrepasan, en ningún momento, los 600 °C.

- . La capacidad real de producción de cenizas del incinerador no es superior a los 12 kg/h.

- . La operación con las compuertas del cenicero cerradas provoca las máximas temperaturas en la zona baja de horno, cerca de la parrilla. La operación del horno con las compuertas del cenicero abiertas desplaza las máximas temperaturas a las zonas altas del horno.

- . El avivar la candela abriendo las compuertas de alimentación desplaza las temperaturas máximas a las zonas altas.

Como resultado de esta evaluación, se recogieron criterios técnicos para mejorar el diseño del incinerador. Con estos elementos se realizó un nuevo diseño, que tiene entre sus principales ventajas:

- . Elimina una gran parte de los elementos metálicos de su diseño, sustituyéndolos por mampostería,

generalmente en forma de arcos. El acero es sustituido por el hierro fundido, más barato y resistente a la acción del fuego.

- . El tiro de aire es superior, dado por una chimenea con mayor diámetro y altura.

- . La alimentación de combustible (biomasa) es más fácil a partir de una nueva compuerta incluida en el nuevo diseño.

- . Se incrementa el número de toberas para garantizar un tiro de aire superior.

- . Los costes de este modelo representan aproximadamente un 40% de los costes del modelo anterior.

La Figura 5 muestra algunos de los esquemas del nuevo diseño.

EVALUACIÓN DE LAS CENIZAS RESULTADO DE LA INCINERACIÓN CONTROLADA

Los resultados de los estudios de composición química realizados no arrojaron grandes diferencias en la composición de estas cenizas y las cenizas quemadas al aire libre. Sin embargo, el porcentaje de sustancias amorfas crece significativamente, con valores entre un 15-35% (16), muy superior a las de las cenizas quemadas al aire libre. Esto se debe, fundamentalmente, a las bajas temperaturas de combustión en el horno.

Los porcentajes de material sin combustionar y carbón se mantuvieron en rangos aceptables (menores del 10%) (16).

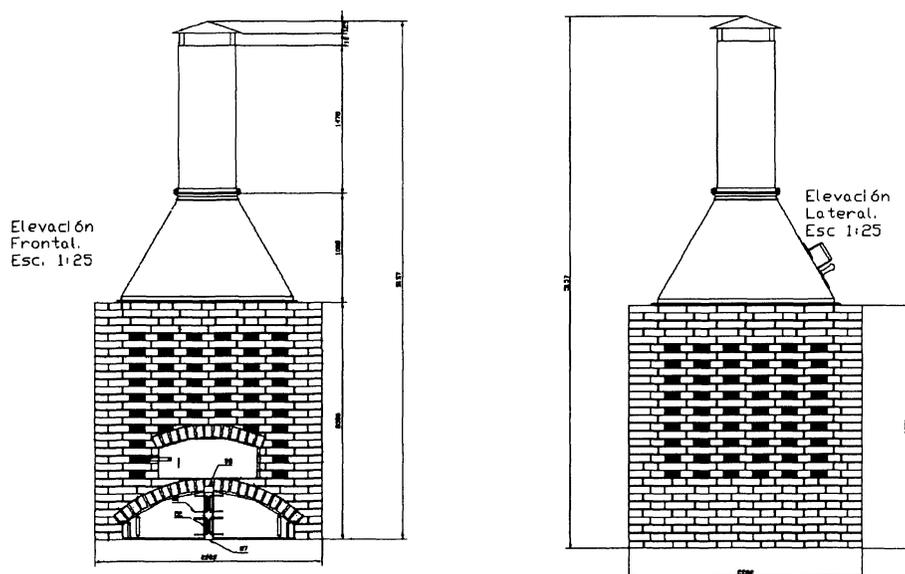


Figura 5.- Vista frontal y lateral del nuevo diseño de incinerador.

Estas cenizas, por tanto, son más adecuadas para la producción de aglomerante cal-puzolana, debido fundamentalmente a su mayor reactividad. La poca presencia de sustancias cristalinas hace que el material sea más suave, y, por tanto, más fácil de triturar. Esto redundará en significativos descensos del tiempo de molienda, lo que trae consigo una mayor eficiencia en la operación del taller.

CONCLUSIONES

. Las cenizas producidas por la combustión del bagazo en las parrillas de las calderas de las centrales azucareras pueden ser clasificadas como material probablemente puzolánico. Sin embargo, las altas temperaturas, y la combustión incompleta que ocurre en las calderas influyen negativamente en su reactividad, que, en algunos casos, puede ser despreciable. La principal causa de la baja reactividad es la presencia de sustancias cristalinas e impurezas como el carbón y material sin combustionar. Es más recomendable emplear las llamadas "cenizas de asiento", que tienen propiedades superiores en comparación con las "de parrilla" y, por ende, mayor reactividad.

. Las cenizas producidas al combustionar la paja de la caña de azúcar, tanto al aire libre, como en incineradores especiales, se pueden considerar como una puzolana de alta reactividad, idónea para su uso en la producción de aglomerante cal-puzolana.

. Cuando la biomasa se quema en incineradores especiales, del tipo propuesto en este trabajo, se produce una ceniza de excelentes propiedades, con una proporción de material amorfo de un 35%, superior a la de las cenizas inalteradas (10-15%). Ha sido demostrado experimentalmente que las temperaturas en el horno no rebasan los 800 °C, aun a pesar de los problemas del prototipo experimental evaluado. Esto evita la formación de material cristalino durante la combustión. La productividad lograda en este tipo de incineradores es de 12 kg/h, aunque hay potencial de lograr hasta 40 kg/h en cada unidad.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Mehta K.: The Chemistry and Technology of Rice Husk Ash Cements. Proceeding of the Joint Work Shop organized by UNIDO in Pakistan, 22-26, January 1979.
- (2) Martirena J.F.: The Development of Pozzolanic Cement in Cuba., Journal of Appropriate Technology, Vol. 21, No. 2, September 1994. Intermediate Technology Publications, U.K.
- (3) Mehrotra and Irshad Masood: Pozzolanic Behaviour of Bagasse Ash. Building Research and Information, Vol. 20, Number 5, pp. 299-304, 1992.
- (4) Malhorta S.K.: Cementitious Binders from Agro-Industrial By-Products. BASIN NEWS. U.K. 1993.
- (5) Khangaonkar P.R., Azmi Rahmat : Kinetic Study of the Hydrothermal reaction between Lime and Rice Husk Ash-Silica., Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp. 577-588, 1992.
- (6) Boateng A.A., Skeete D.A.: Incineration of Rice Hull for Use as Cementitious Material. The Guyana Experience., Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 795-802, 1990.
- (7) Chopra S.K.: Utilization of RHA For the Production of Cement and Cement-Like Binders. Proceeding of the Joint Work Shop organised by UNIDO in Pakistan, 22-26, January 1979.
- (8) Smith R.G.: Rice Husk Ash Cement., Paper presented at the First International Seminar on Lime and Other Alternative Cements, Stoneleigh, Warwickshire, U.K., 9/11, December 1991.
- (9) Taylor H.F.W.: Cement Chemistry. Academic Press. London, 1993.
- (10) Rabilero A.: Una contribución al estudio del aglomerante cal-puzolana. Reporte al IX Forum de Ciencia y Técnica (in Spanish). Havana. Cuba, 1993.
- (11) Martirena J., Betancourt S.: Notes for a Book on Technology for the Manufacture of Lime Pozzolana Binders (unpublished information).
- (12) Weiping Ma and Paul W. Brown: Hydrothermal Reactions of Fly Ash with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Cement & Concrete Research Vol. 27 No. 8 pp. 1237-1248, 1997.
- (13) J. Paya, J. Monzo, M.V. Borrachero, and E. Peris-Mora: Mechanical Treatment of Fly Ashes. Part 1: Physico-chemical Characterization of Ground Fly Ash. Cement & Concrete Research Vol. 25 No. 7 pp 1469-1479, 1995
- (14) James J., Subba Rao M.: Reaction Product of Lime and Silica from the Rice Husk Ash., Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp. 67-73, 1986.
- (15) James J., Subba Rao M.: Reactivity of rice Husk Ash., Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp 296-302, 1986.
- (16) CETA, Colectivo de autores: informe del proyecto "Tecnología de explotación de un horno incinerador de paja de caña para la obtención de ceniza puzolánica". Univ. Central de las Villas, marzo, 1998.

* * *