

# ***Factibilidad del Uso de Cenizas de Residuos Sólidos Urbanos como Aditivo en la Fabricación de Hormigón***

*Jorge E. Rivera Delgado*

*Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil*

*Carlos J. González Miranda, PhD*

*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y Agrimensura*

*Universidad Politécnica de Puerto Rico*

---

**Abstracto** – *La actividad de la construcción demanda una gran cantidad de recursos y materiales, lo que la convierte en un sector con enorme potencial de aprovechamiento de residuos, tanto de los derivados de su propia actividad como de los procedentes de otros sectores; no obstante, debemos resistir la tentación de incorporar éstos simplemente como reciclaje de desechos, sin tener en cuenta los beneficios que pudieran aportar, por ejemplo, a las propiedades del hormigón, especialmente en relación con su resistencia en algunos medios agresivos. En este trabajo se realizó el estudio de uno de los residuos de la incineración de residuos sólidos urbanos (cenizas volante o “fly ash”), y se analizaron las características de las mismas y las propiedades que le confieren a los hormigones al ser incluidas en ellos.*

**Términos Claves** – *Cenizas Volantes, Construcción, Propiedades del Hormigón, Residuos Sólidos Urbanos.*

## **INTRODUCCIÓN**

Si bien se supone que el hombre posee la suficiente capacidad racional para conservar y resguardar la integridad de los ecosistemas en los que vive, esto no bastó, porque durante muchos años puso sus intereses económicos y sociales por sobre el cuidado de su entorno. Hasta hace poco, al construir se tenían en cuenta sobre todo los costos para construir más barato, pero ahora otros aspectos y otras variables se han vuelto relevantes: la calidad, la salud y el impacto medioambiental de las construcciones. La construcción sostenible o la utilización racional de los recursos naturales disponibles para la construcción, la reducción, el reciclaje, la reutilización y la recuperación de materiales, y un diseño y proceso constructivo que

minimice los impactos ambientales conllevan a un cambio de mentalidad en la industria de la construcción.

La ecología y el buen diseño no tienen por qué estar peleados. La arquitectura e ingeniería sostenible o sustentable es una de las alternativas que varios países han emprendido para disminuir el uso de recursos naturales y aprovechar los residuos producidos por el ser humano. La construcción verde es un campo dinámico que está en constante evolución con el advenimiento de las nuevas tecnologías, el desarrollo económico y el cambio social. La popularidad de la construcción ecológica, verde o sostenible se ha incrementado en los últimos años, en respuesta a las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático, así como la disminución de los recursos naturales. La construcción verde se refiere a las estructuras o procesos de construcción que son responsables con el ambiente y ocupan recursos de manera eficiente durante todo el tiempo de vida de la construcción. Este tipo de construcción busca evitar y en algunos casos deshacerse de la contaminación del medioambiente [1]. Se aplica tanto a la renovación como a la construcción de nuevos edificios.

La utilización en construcción de materiales procedentes del reciclaje de residuos sólidos urbanos permite, por un lado, reducir la demanda de recursos naturales no renovables, y por otro lado reducir la cantidad de estos residuos que se destinan a los vertederos sin aprovechamiento; no obstante, debemos resistir la tentación de incorporar éstos simplemente como reciclaje de desechos, sin tener en cuenta los beneficios que pudieran aportar, por ejemplo, a las propiedades del hormigón, especialmente en relación con su resistencia en algunos medios agresivos. En este trabajo se realizó el estudio de uno de los residuos de la incineración

de residuos sólidos urbanos (cenizas volante o “fly ash”), y se analizaron las características de las mismas y las propiedades que le confieren a los hormigones al ser incluidas en ellos.

## **TRASFONDO HISTÓRICO DEL MANEJO DE LOS DESPERDICIOS SÓLIDOS EN PUERTO RICO**

La generación de los residuos sólidos, según definidos en el *Reglamento #6825: Reglamento Para la Reducción, Reutilización y el Reciclaje de los Desperdicios Sólidos en Puerto Rico*, es uno de los aspectos de la actividad antropogénica que contamina y afecta la calidad de vida. El manejo inadecuado de éstos atenta contra el propósito de garantizar una buena calidad de vida. Una de las razones es el carácter de los impactos que se producen en los procesos de almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de éstos, los cuales pueden alterar en forma negativa el medioambiente.

El tema de los residuos sólidos no es nuevo, sino que ha estado implícito en todas las acciones del hombre desde que empezó a cambiar la naturaleza y establecer asentamientos. Puerto Rico no ha estado ajeno a esto. Nuestra economía cambió de agrícola a industrial en un término corto de tiempo. La población ha aumentado en forma acelerada creando una densidad poblacional alta. La sociedad se ha convertido en una de consumo sumamente alto, sobretodo de productos desechables, independientemente si son reciclables o no. La comodidad impera sobre el bien colectivo y el respeto a la naturaleza. Las circunstancias geográficas de Puerto Rico y la escasez de terrenos adecuados para la disposición de residuos sólidos se han sumado a los factores que han agravado la situación del manejo y disposición de los residuos sólidos, lo que no ha pasado desapercibido ante los ciudadanos conscientes y el Gobierno.

El Gobierno Federal, con el propósito de implantar de manera efectiva las disposiciones de la **Ley de Aire Limpio o de Calidad del Aire** de los Estados Unidos (**Clean Air Act**), 42 U.S.C. §7401

et seq. (1970), según enmendada, la **Ley de Agua Limpia (Clean Water Act)**, y sobre todo las disposiciones del Subtítulo D de la **Ley de Recuperación y Conservación de Recursos (Resources Conservation and Recovery Act)**, 42 U.S.C. §6901 et seq., promulgada en 1976, asigna fondos al Gobierno de Puerto Rico destinados a la planificación de proyectos para el manejo adecuado de los residuos sólidos. Esta acción fue determinante para la creación de un instrumento gubernamental capacitado para hacer valer las disposiciones de ley y administrar dichos fondos. Es bajo este marco que se crea la Autoridad de Desperdicios Sólidos (ADS). La ADS tiene como objetivo atender el asunto del manejo de los desperdicios sólidos desde una perspectiva científico-social, económica y ambiental. Entre los primeros esfuerzos por realizar una planificación efectiva del manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico se creó, en el 1980, el Plan Integral para la Recuperación de Recursos. Además de intentar solucionar la situación de los residuos sólidos, este primer esfuerzo consideraba la incineración de los residuos sólidos como una fuente potencial de combustible para la generación de energía. En 1986, la ADS amplió su enfoque para incluir otros métodos o tecnologías y no limitarse a la combustión o quema. La oposición a las técnicas de incineración prevalecientes en aquel momento, dio lugar a que la recuperación de materiales potencialmente reciclables se convirtiera en la mejor alternativa de manejo de residuos. La ADS estableció la siguiente jerarquía de métodos para el manejo de los residuos sólidos: reducción, reutilización, reciclaje y composta, recuperación de energía y disposición.

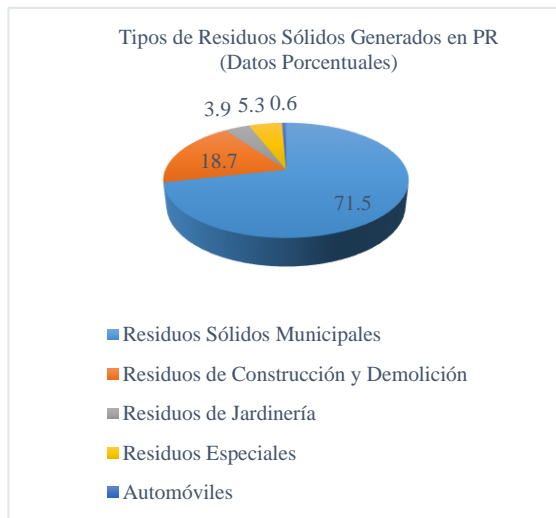
En 2014, la ADS estableció una tasa de generación desperdicios sólidos de 5.56 libras diarias por persona mediante el cálculo inicial del informe de Caracterización de Residuos Sólidos de Wehran (2003), quien fijó una tasa de generación de 5.18 libras diarias por persona (a base del Censo poblacional del 2000). Esa cifra de 5.18 libras establecida por Wehran se ajustó a 5.07 libras diarias por persona, a base de la proyección poblacional del 2003 de la Junta de Planificación, y a esas 5.07 libras

ajustadas, se les sumó unas 0.49 libras, de acuerdo a datos de la ADS sobre la cantidad de materiales reciclables generados por día por persona. De esa manera, se fijó una tasa de generación de 5.56 libras diarias por persona, que permanecerá vigente durante 25 años, a partir de la fecha en que se estableció. Por otro lado, la cifra de disposición se estableció utilizando ese mismo informe de Caracterización de Residuos Sólidos de Wehran (2003), que fijó la tasa de 3.91 libras diarias por persona, cuando se excluyen los residuos de construcción y demolición, residuos especiales, y de automóviles. Sólo se cuantifican los desperdicios sólidos municipales (basura doméstica) y los desechos de jardinería para establecer la generación per cápita.

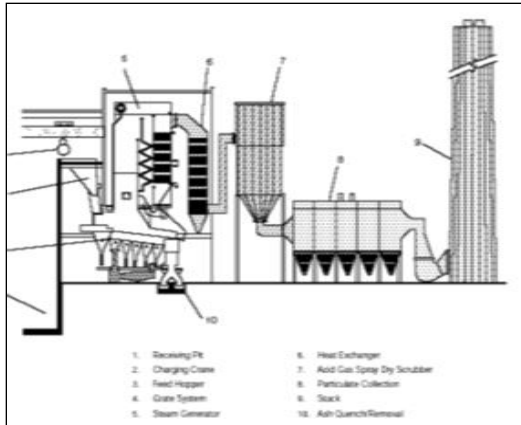
Puerto Rico recicla entre un 10-12% de la basura a nivel nacional, muy por debajo del 35% mínimo establecido por ley hace más de 20 años. Se estima que 40% del desperdicio sólido que va a los vertederos es material reciclable que, por falta de implementación de política pública, se pierde y contribuye a ingresos no adquiridos para nuestra economía. Enviar basura a los vertederos también contribuye a la producción de gases invernaderos, como el bióxido de carbono y metano, que contribuyen a aumentar el calentamiento global.

La isla dispone de 32 vertederos, donde solamente cinco cumplen con las regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y agencias locales, y solamente 11 van a estar operando para el 2020. Ya se vislumbra un panorama complicado para el manejo y control de desperdicios sólidos, además de implicaciones salubristas y ecológicas dentro los próximos 5 años.

A lo largo de los años, la incineración de residuos sólidos urbanos se ha ido consolidando en los países más avanzados como un sistema eficaz para la eliminación de estos residuos, lo que ha llevado a un crecimiento progresivo del número de instalaciones, siendo previsible que se produzca un aumento importante en la cantidad de cenizas volantes que, en cualquier caso, deberán ser gestionadas. Así pues, en la búsqueda de alternativas, recientemente, el Gobierno de Puerto Rico ha vuelto a endosar la incineración de los residuos sólidos como un sistema para la eliminación de los mismos, y como una fuente potencial de combustible para la generación de energía. Generar energía eléctrica utilizando residuos sólidos en un sistema termal controlado avanzado debe considerarse como parte de un plan nacional de reciclaje. La iniciativa denominada “Waste to Energy” (WTE) consiste en quemar residuos sólidos mediante el uso de altas temperaturas, lo que reduce su volumen y genera energía. La tecnología que propone Energy Answers International, Inc., a través de su subsidiaria Energy Answers Arecibo, LLC, permite maximizar la recuperación de energías renovables y materiales comercializables (las cenizas) a partir de 2,106 toneladas por día de desperdicios sólidos municipales (MSW, por sus siglas en inglés). Las cenizas producidas por el sistema de incineración (que mantienen unos niveles de seguridad alto) pueden ser vendidas a compañías de construcción de carreteras, hormigón, bloques, material de aislamiento de sonido, entre otros. El sobrante de las cenizas que tampoco son tóxicas son enviadas a un vertedero especializado y aislado [2].



**Figura 1**  
Muestra los Tipos de Residuos Sólidos



**Figura 2**

**Diagrama de una Instalación Típica de Energy Answers**  
(Fuente: EPA)

## CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PRODUCIDOS POR EL SISTEMA DE INCINERACIÓN

Todos los combustibles, excepto el gas natural, contienen impurezas que generan cenizas al quemarse (los llamados residuos sólidos de la combustión). Estos residuos son escoria, cenizas que se funden y aglomeran formando partículas más o menos grandes o bloques pegados a las paredes de la caldera, que luego caen a la rejilla y, a través de ésta, al fondo del hogar; las cenizas recolectadas en el sistema de recuperación de calor, y ceniza volantes, partículas más finas que son arrastradas por los humos. Se necesitan dos sistemas para la eliminación de ambos residuos. La tabla que aparece a continuación presenta los tipos de ceniza y la cantidad correspondiente que produce el sistema de incineración de Energy Answers.

**Tabla 1**  
**Caracterización de los Residuos de Energy Answers**

Tipo de residuo	Cantidad típica producida, Kg/ton de residuo incinerado
Escoria	N/A
Recogido en el fondo del hogar	250-420
Recogido de la rejilla	5
Recogido en el sistema de recuperación de calor	2-12
Ceniza volante	N/A
Recogido por el sistema de control de contaminación	10-30

**Fuente:** WTE

Las cenizas volantes, aquellas partículas más finas, arrastradas por los humos que son recogidas por el sistema de control de contaminación de aire, se obtienen por la precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión comprendido en los gases de la combustión, mientras que las partículas más gruesas, todas las demás, son recolectadas como cenizas de fondo o escoria. La reutilización de los residuos procedentes de incineradoras ha sido fomentada no sólo por las preocupaciones medioambientales actualmente surgidas en el público y en las autoridades, sino también por el problema de la insuficiencia de espacio en los vertederos debido a las crecientes cantidades de desechos municipales que es necesario eliminar. La filosofía de Energy Answers es tratar la escoria o ceniza de fondo y la ceniza volante como materia prima para productos comerciales, no como un material que requiere eliminación o disposición. El objetivo con respecto a la escoria es crear un material seco, como la grava de la que todos los materiales se pueden recuperar para reutilizar. La escoria se procesa con una tecnología desarrollada por Energy Answers, que recupera metales ferrosos y no ferrosos y produce Boiler Aggregate, un material que ha sido utilizado para pavimentar carreteras y en la producción de productos de hormigón. Asimismo, un sistema de procesamiento separado e independiente se utiliza para recolectar y acondicionar las cenizas volantes para su reutilización potencial.

La utilización de este tipo de residuos presenta dos problemas principales: la peligrosidad y la consiguiente necesidad de someter los mismos a algún tipo de tratamiento antes de considerar sus posibles aplicaciones o proceder a su deposición final, y la falta de homogeneidad en sus características. Esto se debe a las diferencias existentes entre las tecnologías empleadas en la combustión y en el proceso de limpieza de humos de las plantas de tratamiento, y en los procesos previos a la incineración (reciclaje, compostaje o ambas).

### Propiedades Físicas

La escoria resultante de la incineración de residuos sólidos urbanos es un material de tipo granular con partículas en su gran mayoría inferiores a 1 cm de diámetro, formadas por los materiales no combustibles y/o inertes de los residuos urbanos que salen de la cámara de combustión después de la incineración a temperaturas superiores a 850°C, tales como trozos de vidrio, cerámica, metales etc. Incluyen también los materiales más finos que caen entre los intersticios de la parrilla. Dichas escorias a la salida del horno en general se enfrían con agua y se depositan separadamente de las cenizas volantes (residuos de depuración de gases). Suponen el 85-95% en peso de los residuos totales del proceso de incineración. Son de color grisáceo, tienen una amplia distribución granulométrica de partículas con un elevado grado de humedad, que confiere cierta adherencia entre ellas, y morfología muy dispar. Las escorias son más porosas y menos resistentes que los áridos naturales, pudiéndose considerar como áridos de calidad media.

La denominación de cenizas volantes incluye los residuos de depuración de gases. Comprende del 5% al 20% del total de residuos producidos. Estas son partículas sólidas muy finas que se originan en los sistemas de incineración de combustibles sólidos (residuos sólidos urbanos) y que son arrastradas junto a los gases de proceso, separándose de los mismos en los dispositivos de eliminación de partículas previstos (filtros, precipitadores electrostáticos, etc.). Son un material pulverulento con una distribución granulométrica fina (1-1000µm, con más de la mitad por debajo de 250µm) y una alta superficie específica, lo que unido a su composición química supone un alto riesgo de contaminación de las aguas.

### Propiedades Químicas

La composición de los residuos sólidos municipales varía con el tiempo y de un país a otro, debido a las diferencias en los estilos de vida, en los procesos de reciclaje, el diseño y operación del incinerador, y el sistema de control de contaminación del aire. Los análisis químicos

demuestran que los principales componentes de las cenizas de fondo y volantes son: silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe) y calcio; también se pueden encontrar como componentes secundarios, titanio, magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K) o fosfato y en muy pequeñas cantidades bario, estroncio, rubidio y **metales pesados** como cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb), cromo (Cr), níquel (Ni) o cadmio (Cd). Las motivaciones para controlar las concentraciones de metales pesados en corrientes gaseosas son diversas. Algunos de ellos son peligrosos para el medio ambiente y la salud. Unos causan corrosión, como zinc o plomo, mientras otros son carcinogénicos o tóxicos, afectando, entre otros, al sistema nervioso central (plomo), los riñones o el hígado (plomo, cadmio, cobre) o la piel, los huesos, o dientes (níquel, cadmio, cobre, cromo).

**Tabla 2**  
**Composición Química Típica de la Ceniza Volante**

Parámetro	Ceniza volante	Parámetro	Ceniza volante
Si, g/kg	95-190	Cd, mg/kg	250-450
Al, g/kg	49-78	Co, mg/kg	29-69
Fe, g/kg	18-35	Cr, mg/kg	140-330
Ca, g/kg	74-130	Cu, mg/kg	860-1400
Mg, g/kg	11-19	Hg, mg/kg	0,8-7
K, g/kg	23-47	Mo, mg/kg	15-49
Na, g/kg	22-57	Ni, mg/kg	92-240
Ti, g/kg	7,5-12	Pb, mg/kg	7400-19000
S, g/kg	11-32	Se, mg/kg	6,1-31
Cl, g/kg	45-101	Sn, mg/kg	1400-1900
P, g/kg	4,8-9,6	Sr, mg/kg	80-250
Mn, g/kg	0,8-1,7	V, mg/kg	32-150
Ag, mg/kg	31-95	W, mg/kg	Nd
As, mg/kg	49-320	Zn, mg/kg	19000-41000
Ba, mg/kg	920-1800	PCDD, µg/kg	115-140

**Fuente:** (Hjelmar, 1996; Zhang and Zhao, 2009)

Contrario a lo que la combustión sucede con las cenizas volantes producidas en del carbón, la incineración de residuos sólidos urbanos genera unas cenizas con características heterogéneas que, dada su composición, son consideradas como residuos o subproductos peligrosos y necesitan ser sometidas a algún tipo de tratamiento antes de considerar sus posibles aplicaciones o, en última instancia, proceder a su deposición en el terreno. Asimismo, es preciso destacar que estudios recientes de la

composición de las cenizas volantes producidas de la incineración de residuos sólidos urbanos revelan que la implantación de límites de emisión estrictos, el desarrollo de tecnologías de control de contaminación de aire, y la incineración de residuos sólidos con una composición controlada resultó en la reducción de la concentración de varios de estos elementos peligrosos.

### **Procesamiento**

El reciclaje de los residuos procedentes de incineradoras de residuos sólidos urbanos requiere un procesamiento bastante elaborado para obtener un material que sea aceptable desde los puntos de vista técnico y medioambiental. Se deben separar las escorias y las cenizas volantes, llevándose a cabo las siguientes técnicas de procesado en la ceniza volante, antes de su utilización en la construcción o de su eventual disposición final:

- El **lavado y posterior secado** produce una reducción del 30% del peso inicial de las cenizas volantes, debido principalmente a la disolución de las sales, que son solubles en agua. La composición de las cenizas (con una importante cantidad de metales pesados) indica que se trata de un residuo peligroso a los efectos de la legislación local y federal, y que contienen un elevado porcentaje de sales solubles. La cantidad de metales pesados extraída depende fundamentalmente del valor de pH al que se produce la extracción. El procedimiento de extracción más simple consiste en el lavado con agua y el posterior tratamiento del agua residual obtenida, en la que se encuentran altas cantidades de cloruros de sodio (Na), de potasio (K) y de calcio (Ca). Si se realiza la extracción en medio alcalino (el pH de la corriente de extracción resulta ser 10-13), solamente pueden liberarse metales de sales muy solubles, como cloruros, por lo que este tipo de extracción no es recomendable. Este proceso de lavado determina un mayor contenido en metales pesados en las cenizas lavadas, debido a la significativa pérdida de masa correspondiente a las sales solubles. A esos valores de pH, la

mayoría de los metales están inmovilizados como hidróxidos o carbonatos, por lo que resultan difíciles de extraer. Si al agua empleada se le añade ácido clorhídrico o cloruro de hidrógeno (HCl), se mejora la extracción, ya que, aparte de los compuestos extraídos anteriormente, se le suman algunos óxidos de aluminio (Al), de hierro (Fe), de silicio (Si) y Magnesio (Mg); sin embargo, si se quiere realizar una extracción más efectiva, se necesitan alcanzar valores de pH por debajo de 4, que únicamente se consiguen empleando grandes cantidades de ácido. En el caso de la extracción ácida, debe tenerse en cuenta que el ácido puede disolver o destruir la estructura sólida de las cenizas volantes, hecho que agravaría la situación al darse una posterior liberación de los contaminantes que estaban previamente encapsulados en la matriz sólida de las mismas.

- La **solidificación y estabilización** a menudo se combinan para conseguir el mejor resultado posible con el fin de reducir los lixiviados de los componentes peligrosos. La solidificación es un proceso físico para encapsular los residuos con un material aglomerante. No implica necesariamente una reacción química de los contaminantes con el agente solidificante, por lo que no es por sí misma un tratamiento que altere la peligrosidad del residuo, aunque puede reducirla al interponer una barrera física entre este y el medio ambiente, reduciendo su movilidad o disminuyendo el área efectiva disponible para su difusión, a la vez que también permite un mejor manejo del residuo. La estabilización es un proceso químico que transforma elementos contaminantes solubles en elementos con menor capacidad de solubilidad al añadir ciertos reactivos. Esta conversión puede incluir una solidificación del residuo por medios químicos, aunque en la mayoría de los casos se trata de procesos que permiten insolubilizar, inmovilizar, encapsular, destruir y, en definitiva, transformar el contaminante en una forma mucho más estable

o menos tóxica. En el caso de las cenizas volantes, puede utilizarse el fosfato como agente estabilizante, formándose sales de baja solubilidad, circunstancia que determina una menor lixiviación de metales.

- El tratamiento térmico implica la fundición de residuos a elevadas temperaturas desde 1.200 a 1.500°C para transformar las cenizas en cristal no nocivo y muy estable (vitricación). De esta forma se destruyen rápidamente las dioxinas y otros componentes orgánicos, disminuye su volumen y se facilita la recuperación de metales. Este tratamiento se puede combinar con el anterior. No obstante, dado su alto coste, se ha empleado sólo en casos muy excepcionales [3].

### **VENTAJAS E INCONVENIENTES**

La utilización de cenizas volantes de incineradoras de residuos sólidos urbanos presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

#### **Ventajas**

- Las cenizas volantes de residuos sólidos urbanos se están utilizando en algunos países como materia prima que se añade al horno para producir clinker de conglomerante. Los conglomerantes de cenizas de residuos sólidos urbanos se fabrican en hornos similares a los de clinker de cemento portland pero utilizando temperaturas inferiores; es decir, a 1350°C, lo que requiere menos combustible y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>. Las cenizas volantes generadas en las plantas de incineración tienen una composición química similar a la composición típica de un cemento de alinita, por lo que recientemente se han realizado diferentes estudios alemanes y americanos sobre la producción de cemento de alinita a partir de residuos de incineración. El cemento de alinita fue desarrollado en la Unión Soviética hace dos décadas al aislar un nuevo compuesto en el clinker de cemento que contenía MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaCl<sub>2</sub>. Este compuesto recibe el nombre de alinita. Las principales características

tecnológicas de este tipo de cemento son su baja temperatura de formación (unos 1000°C) y sus excelentes propiedades ligantes. El proceso de producción del cemento de alinita consiste en la cocción de un crudo con una relación CaO/SiO<sub>2</sub> entre 2.3 y 3.2 y un contenido en cloruros entre 4.5 y 9.5 en tanto por ciento en peso. La mezcla es homogeneizada, peletizada, clinkerizada a temperaturas entre 950 y 1100°C y posteriormente enfriada. El contenido en cloruros del cemento, le confiere un rápido fraguado y endurecimiento por lo que sus usos y puesta en obra son particulares. Se emplea fundamentalmente en aplicaciones que requieren una alta capacidad portante inicial y donde la durabilidad no es un requisito prioritario.

- Existen diversas investigaciones de laboratorio sobre el uso de cenizas volantes procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos como adición al hormigón a partir de la actividad puzolánica que pueden presentar. Algunas investigaciones indican que al sustituir hasta un 30% de cemento por cenizas volantes (obtenidas en un proceso con recuperación previa), se pueden obtener resistencias a compresión comparables con las de algunos hormigones sin cenizas volantes. Cuando no se realiza la recuperación previa, la resistencia de los hormigones disminuye considerablemente.

#### **Inconvenientes**

- El problema que origina el empleo de las cenizas volantes es la variedad de características que pueden presentar, pudiendo haber cenizas aptas para su empleo y cenizas que presenten serios inconvenientes tanto medioambientales como técnicos; por ello, los resultados pueden resultar dispares de unos estudios a otros.
- La incorporación de estas cenizas volantes al hormigón aumenta la cantidad de agua de mezcla necesaria para alcanzar una determinada consistencia y el tiempo de fraguado.

## **CENIZAS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS UTILIZADAS COMO ADITIVO MINERAL EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES**

El cemento Portland es una mezcla de compuestos complejos, principalmente silicato tricálcico, silicato dicálcico aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. Se encuentra dentro de los denominados cementos hidráulicos, caracterizados por fraguar y endurecer al reaccionar químicamente con agua. La reacción, llamada hidratación, da origen a nuevos compuestos; el producto más importante, por la proporción y por sus propiedades cementantes, es el silicato de calcio hidratado; el segundo producto es el hidróxido de calcio, un compuesto débil. El hormigón, material vital para la industria de la construcción, surge de la mezcla de dos componentes: agregados (60 a 80 % del volumen total) y pasta cementante (el resto). La calidad del hormigón depende de la calidad de la matriz cementante, de la calidad de los agregados y de la unión entre ambos. Las características y propiedades del hormigón quedarán definidas por los materiales componentes, especialmente por las proporciones relativas entre éstos. En estado fresco el hormigón debe tener cohesión y trabajabilidad (debe poder colocarse y compactarse sin que se produzca segregación que reduzca la homogeneidad del material), y en estado endurecido se requiere que tenga resistencia a compresión (que tiene importancia por sí misma y por determinar otras propiedades deseables del hormigón).

Además de estos componentes básicos, el hormigón también puede contener aditivos minerales. Estos materiales se utilizan para mejorar alguna propiedad del hormigón, ya sea en estado fresco o endurecido, y también pueden actuar sobre la durabilidad. Una adición mineral pulverulenta es todo aquel material fino que puede incorporarse al hormigón, ya sea en reemplazo del cemento Portland o del agregado fino, y que presenta propiedades benéficas para el mismo. Estas adiciones son de orígenes muy variados, tanto naturales como artificiales y generalmente tienen muy bajo costo.

La utilización de materiales suplementarios puede tener una gran importancia económica, ecológica, y tecnológica.

En la actualidad, en la fabricación de hormigón se utilizan materiales residuales como adiciones, por ejemplo: cenizas volantes procedentes de centrales térmicas de carbón, cenizas de alto horno, humo de sílice o microsílice, etc. Al incorporar adiciones minerales a un hormigón, se pueden producir modificaciones en el comportamiento físico y químico del mismo, afectando al comportamiento tanto en estado fresco como endurecido. En estado fresco, se pueden alterar la manejabilidad, la exudación, el tiempo de fragüe y el calor de hidratación. En estado endurecido, en general se pueden afectar las resistencias a temprana edad y las resistencias a edades avanzadas. Respecto a la durabilidad, las adiciones puzolánicas, al refinar el tamaño del poro y el tamaño del grano, proveen al hormigón de una matriz más densa e impermeable, por lo que impiden el ingreso de agentes agresivos [4].

La perspectiva de la incorporación de cenizas volantes procedentes de incineradoras de residuos sólidos urbanos en la producción de cemento puede considerarse interesante. Para propósitos de este estudio, su aplicación potencial sería la de sustituir parte del cemento, como de hecho ocurre en el caso de las cenizas volantes procedentes de centrales térmicas, etc.

Primeramente, se debe señalar que no se aconseja utilizar cenizas volantes producto de la incineración de residuos sólidos urbanos en hormigones, tal como se obtienen del referido proceso. Las mismas contienen importantes cantidades de metales pesados, por lo que son residuos peligrosos, y un elevado porcentaje de sales solubles, que al mezclarse con agua, generan una reacción exotérmica con gran aumento de volumen. Al incluir cenizas sin apagar en morteros y hormigones se producen importantes aumentos de volumen y de la porosidad, y disminución de las resistencias mecánicas. Ensayos efectuados hasta el momento han demostrado la necesidad de someter estas cenizas a un pretratamiento para la extracción



y separación de algunas sales solubles y metales pesados, que serían las(los) responsables del retraso en el fraguado, al inhibir la hidratación del cemento; de importantes aumentos de volumen y de la porosidad, y de la disminución de las resistencias mecánicas.

Asimismo, respecto a las cenizas volantes una vez procesadas, es preciso destacar que el primer efecto que producen es el de dispersión de los granos de cementos. Esto contribuye a la accesibilidad del agua hacia los granos de cemento, mejorando sus condiciones de hidratación; además, sirven de sitios de nucleación de los productos de hidratación del cemento portland, especialmente del hidróxido de calcio liberado durante las reacciones de hidratación del cemento. Este efecto lo ejercen todas las adiciones minerales, en mayor o menor medida, por más inertes que se consideren (por inertes se entiende a materiales que no reaccionan químicamente con el medio).

El uso de cenizas volante procedentes de la incineración de residuos urbanos reemplazando una parte del cemento portland parece ofrecer ventajas. La resistencia a la compresión es comparable a la del hormigón con solo cemento, y el peso por unidad se reduce enormemente. Esta última ventaja es favorable en el uso de construcciones ligeras. Se recomienda su uso en hormigones celulares o de baja densidad. Mezclando estas cenizas con cemento, cal, yeso, arena y agua se pueden fabricar hormigones celulares, caracterizados por una razonable resistencia a la compresión (3 a 10 MPa), reducida densidad (400 a 800kg/m<sup>3</sup>) y elevada porosidad. Estas propiedades se consiguen mediante la reacción del aluminio con cal, desprendiendo hidrógeno que genera un gran volumen de huecos.

También se ha estudiado el uso de estas cenizas en la fabricación de hormigón de relleno, se ha concluido que realizando la adecuada dosificación se pueden obtener hormigones con alta fluidez, sin exudación ni segregación, y con resistencias similares e incluso superiores a la de los hormigones de relleno tradicionales. Se clasifica como hormigones de relleno al material destinado a la sustitución de suelo compactado en el relleno de

zanjas, bases de pavimento y cavidades que requieran un relleno, siendo la matriz de dicho material el cemento. Estos hormigones requieren una gran fluidez y una baja resistencia. Se debe evitar la segregación, y reducir la exudación y la retracción. La resistencia habitual que suelen alcanzar está entre 0.25 y 5.5 MPa y su densidad fluctúa entre 1.3 y 1.7 Kg/m<sup>3</sup>.

No se recomienda su uso en hormigones estructurales, debido a que estas cenizas normalmente **no** poseen carácter puzolánico, ya que apenas tienen sílice reactiva. Una puzolana es un material natural o artificial que contiene **fundamentalmente** silicio o silicio y aluminio. Esto les da un carácter ácido y por lo tanto una gran afinidad por la cal, tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiental. La puzolana por sí misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño; sin embargo, cuando una puzolana se usa en combinación con el cemento Portland, reacciona con el hidróxido de calcio de éste a través de una reacción secundaria a la reacción de hidratación de los componentes del cemento, para formar compuestos cementantes. Cuando hay puzolana dentro de los materiales cementantes, ésta actúa de la siguiente forma:



Donde **C-S-H** significa silicatos de calcio hidratados de estequiometría no definida.

Básicamente, un cemento Portland en el proceso de hidratación produce gel de tobermorita e hidróxido de calcio (portlandita). Un cemento con adición puzolánica hace lo mismo, pero el hidróxido de calcio, producto de la hidratación de los silicatos, es consumido por el material puzolánico produciendo más gel de tobermorita; este fenómeno otorga características adicionales al cemento con adición que no tiene el cemento Portland puro. La generación de gel de silicatos de calcio hidratados a partir de la reacción puzolánica contribuye a densificar la microestructura del hormigón y disminuir la porosidad de la pasta, ya que los poros capilares son eliminados o reducidos en tamaño y los densos cristales de hidróxido de calcio son

sustituídos por **C-S-H** adicional de una densidad menor, lo que mejora las características de durabilidad del hormigón. Un alto contenido de hidróxido cálcico en la pasta de cemento hidratado puede tener un efecto adverso para la durabilidad del hormigón debido a la elevada solubilidad del CH en medios acuosos, este es vulnerable a las aguas puras, sulfatos y otros agentes.

Por otra parte, las adiciones minerales junto con el grado de hidratación también juegan un papel significativo en las propiedades de transporte de agentes agresivos, ya que a medida que se forman los productos de la hidratación bloquean las conexiones de poros capilares en la pasta y en la interfaz árido-pasta. Esto lleva a crear una estructura interna más tortuosa que dificulta el transporte a través de ella [5].

### Índice de Actividad Puzolánica

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a la temperatura ordinaria, en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica. Esta es una de las principales razones para el empleo de ciertas cenizas volantes en el hormigón, pues las mismas son capaces de reaccionar con el hidróxido cálcico liberado en la reacción de hidratación del cemento portland.

Se define el índice de actividad puzolánica como la relación entre la resistencia a compresión de una mezcla de cemento, cenizas volantes y arena, y la resistencia de la mezcla de referencia compuesta de cemento y arena. El índice de actividad puzolánica de las cenizas volantes de una incineradora de residuos sólidos urbanos, que de por sí es bajo, depende de la composición del material incinerado, de las condiciones de combustión, y de las características de la ceniza a ser usada en la fabricación del hormigón.

### CONCLUSIONES

Está claro que el uso de la ceniza volante como aditivo mineral es una alternativa para la fabricación

de hormigones de baja densidad y resistencia; aunque se hace evidente que con anterioridad al uso de las cenizas volantes, éstas deben ser tratadas. Asimismo, después de una insistente búsqueda, se advirtió que la línea de investigación basada en comprobar la viabilidad y funcionalidad de las cenizas de residuos sólidos urbanos como material de construcción aún le falta desarrollo.

### REFERENCIAS

- [1] T. H. Russ, *Site Planning and Design Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill Co., 2009, pp. 25-46.
- [2] Energy Answers Arecibo, LLC. (2015). *Proyecto de conversión de desperdicios a energía alterna y recuperación de recursos de Arecibo, Declaración de impacto ambiental preliminar* [Online]. Disponible: [http://www.rd.usda.gov/files/RUSAreciboDraftEIS\\_July2015\\_Span.pdf](http://www.rd.usda.gov/files/RUSAreciboDraftEIS_July2015_Span.pdf).
- [3] E. Kalogirou et al., *Fly ash characteristics from Waste-to-Energy facilities and processes for ash stabilization* [Online]. Disponible: [http://www.iswa.org/uploads/tx\\_iswa\\_knowledgebase/Kalogirou.pdf](http://www.iswa.org/uploads/tx_iswa_knowledgebase/Kalogirou.pdf).
- [4] M. H. Sandanella. (2015). *Estudio de factibilidad de la utilización de cenizas de filtro como adición en hormigones* [Online]. Disponible: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/2147/PS%20Sandanella,%20Matias.pdf?sequence=1>.
- [5] J. D. Bapat, *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013.