

# *Alternativas para el Uso de Cenizas Volantes en Mezclas de Hormigón*

*Leonardo Espiña Sánchez  
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil  
Héctor J. Cruzado, Ph.D.  
Departamento Ingeniería Civil y Ambiental  
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

---

**Resumen** — *Estudios demuestran que las cenizas volantes de carbón se pueden utilizar como uno de los componentes para la fabricación de estructuras de hormigón. Este proyecto pretende corroborar si las cenizas volantes de carbón se pueden utilizar como uno de los componentes de la mezcla de hormigón para la fabricación de vallas de seguridad. Para este proyecto se prepararon seis diseños de diferentes mezclas, incluyendo una de control. Durante la preparación de cada mezcla se sustituyó el cemento “Portland” por cantidades de cenizas volantes de carbón en diferentes proporciones, buscando la mezcla óptima con mayor resistencia para la confección de las vallas de hormigón. Para lograr un adecuado diseño de vallas de hormigón, se utilizaron los estándares de la “American Society for Testing and Materials” (ASTM). Para los diseños se combinaron el 8%,10%, 12% y 14% de la mezcla con la ceniza volante y hormigón y fueron objeto de la compresión establecida en los parámetros de la fabricación de vallas y se analizó la fractura para los diferentes lotes*

**Palabras claves** — *Cenizas Volantes, Compresión Del Hormigón, Hormigón, Vallas.*

## **INTRODUCCIÓN**

Desde noviembre 2002, la planta “Applied Energy System” (AES) se instaló en el municipio de Guayama con el fin de vender energía eléctrica a Puerto Rico mediante la quema de carbón mineral [1]. Estas cenizas son el resultado del ciclo de combustión para generar energía eléctrica. Durante dicho proceso existe una combinación de los siguientes elementos: carbón, oxígeno, sulfuro y agua. Con base de calor y al quemarse todos los componentes, se produce vapor y la generación de energía. Sin embargo, el desperdicio resultante de ese proceso generatriz de energía son las cenizas

volantes de carbón, de las cuales AES produce aproximadamente 250,000 toneladas anuales [1]. La producción de las cenizas volantes de carbón equivale aproximadamente el 10% del volumen original del carbón quemado [1].

Estudios realizados concluyen que las cenizas pueden utilizarse como elemento de mezclas de hormigón [2]. Conforme con dicho estudio previamente realizado, se concluyó la viabilidad de realizar estructuras de hormigón con una mezcla añadida de cenizas volantes de carbón.

El objetivo principal del proyecto es buscar alternativas para el uso de cenizas volantes creadas por la planta generadora de energía AES. Con el firme propósito de buscar las alternativas y evitar el cúmulo de toneladas de las cenizas volantes de carbón en Puerto Rico y reconociendo que la planta AES continua vendiéndole energía eléctrica a base de la quema de carbón mineral, se investigó la situación previa a la excesiva acumulación de residuos [2].

## **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

AES genera aproximadamente 454 megavatios por hora (MW/hr) que representa un consumo eléctrico del 15% que la Isla utiliza. El contrato de la planta de AES y la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) es por un término de 25 años y avalado por múltiples organizaciones reconocidas en Puerto Rico [2].

La planta AES produce una ceniza volante o “fly ash” (FA) y ceniza de fondo o “bottom ash” (BA). Estas son utilizadas para manufacturar un agregado que AES Puerto Rico ha llamado AGREMAX [2]. El agregado AGREMAX es un material tipo gravilla que se procesó para crear varios productos, como por ejemplo grava para relleno, cubierta para sistema de relleno sanitario, mejora a fincas agrícolas, estabilización de terrenos

y remediación de suelos contaminados entre otros. Fue utilizado como sustituto de agregado natural en la rehabilitación de caminos rurales de fincas privadas y caminos municipales de las comunidades de Puerto Rico, porque en aquel entonces se le consideraba como un desperdicio no sólido ni tóxico.

Transcurrido los años, las cenizas volantes de carbón que genera la AES son consideradas como desperdicio sólido tóxico [3]. Conforme a esta nueva realidad en cuanto a composición de las cenizas volantes de carbón, la entonces alcaldesa del Municipio de Guayama firmó en mayo 2012 una ordenanza para prohibir el uso de los productos derivados de la quema de carbón en este municipio [2]. Treinta y cinco (35) municipios se acogieron a la prohibición cobijada en la ordenanza del Municipio de Guayama.

A la fecha del 23 de octubre de 2013, el Senado de Puerto Rico presentó ante la Asamblea Legislativa el P de la S 340 [1] en el cual concluye que en AES existen montañas de cientos de toneladas de cenizas volantes de carbón, sin dársele uso y sin que AES cumpla con el contrato acordado con AEE en cuanto al manejo de los residuos [2]. Ante esta situación es indispensable buscar alternativas para el uso y disposición de las cenizas que acumula AES.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El propósito principal de este estudio es realizar una propuesta de diseño de mezcla de cemento con ceniza volante que cumpla con los parámetros de las vallas de hormigón de seguridad que siguen los estándares de diseño de ASTM C-825 sección 7 [4]. Entre las especificaciones establecidas por este estándar se incluyen que la mezcla debe tener un mínimo de resistencia en compresión de 4000 psi, un contenido de humedad de 5.5% y que el refuerzo de acero va a tener un mínimo de dos pulgadas de cubierta.

Se realizó un diseño de mezcla control para obtener una resistencia mínima de 4,500 psi usando cemento Portland, agregado grueso de media

pulgada, arena de río y agua. Se usaron los valores modelos de fineza del agregado fino, gravedad específica del agregado grueso, gravedad específica del cemento y 5% de absorción de humedad. También se obtuvieron los valores de contenido de humedad de la piedra y arena mediante pruebas de laboratorio especificadas por el ASTM C -33 [5].

Se fabricaron diferentes muestras sustituyendo el cemento Portland por la ceniza y las mismas se sometieron a las pruebas de compresión según el ASTM C-39 [6]. La primera mezcla de control no tenía contenido de ceniza. Luego se fabricaron muestras con el 10%, 8%, 12% y 14% de ceniza sustituyendo el peso del cemento. Cada lote estaba compuesto de catorce (14) cilindros, de los cuales doce (12) eran pequeños (volumen de 100.56 in<sup>3</sup>) y dos (2) eran grandes (342.84 in<sup>3</sup>). Las muestras fueron sumergidas en tanques de curado y luego se hicieron pruebas de compresión al término de 7, 14, 21 y 28 días, según las directrices de ASTM C-39 [6], recopilando el tipo de fractura que sufrió cada cilindro. También se recopiló el peso de cada (antes de las pruebas de compresión).

Los resultados obtenidos de las pruebas fueron evaluados para determinar si las mezclas cumplen con los parámetros de resistencia a la compresión que requiere el ASTM C-825 [4] luego de transcurrir 28 días de haber sido preparada la mezcla.

## DISEÑO DE MEZCLA

Se decidió fabricar el diseño de la mezcla control para tener una resistencia en compresión de 4,500 psi o más. En base a este diseño, las cantidades y datos de los componentes de la mezcla son los siguientes:

- Resistencia a compresión  $f'_c = 4,500$  psi
- Relación cemento agua  $w/c = 0.38$
- Tamaño agregado máximo = 1/2"
- Módulo de finura = 3
- Aire atrapado = 0.405
- Slump = 1" a 4"
- Temperatura promedio = 83.6°C - 87 °C
- Cantidad cemento = 855 lb/yd<sup>3</sup>

- Agregado fino = 1,030 lb/yd<sup>3</sup> (ajustado según contenido humedad de 0.22%)
- Agregado grueso = 1,545 lb/yd<sup>3</sup> (según corrección por conversión de agregados)

A continuación se presentan las propiedades de los materiales determinadas por medio de pruebas de laboratorio, según establecido por el ASTM C-33 [5]:

- Gravedad específica del cemento = 2.95 g/ml
- Contenido humedad agregado grueso = 0.47%
- Contenido humedad agregado fino = 3.13%
- Gravedad específica aparente agregado grueso = 2.38
- Densidad de agregado grueso = 75 lb
- Gravedad específica aparente agregado fino = 2.39
- Módulo de finesa = 3.0
- Absorción del agregado fino = 1.24%
- Contenido de absorción del agregado grueso = 1.21%
- Contenido de agua del agregado grueso = 0.47%
- Contenido de agua del agregado fino = 3.31%

La mezcla diseñada de cemento, para una yarda cubica se presenta a continuación:

- Cemento: 855 lb
- Agregado fino: 1,200 lb
- Agregado grueso: 1,365 lb
- Agua: 349 lb

Se estima que el volumen necesario para preparar cada lote de 14 cilindros es de 1,892.4 in<sup>3</sup>. En base a este volumen, las cantidades de cada componente para la prueba de control son:

- Cemento: 42 lb
- Agregado fino: 59 lb
- Agregado grueso: 67 lb
- Agua: 17 lb

La Tabla 1 muestra las proporciones de las seis (6) lotes de mezclas de hormigón preparadas para este proyecto: una mezcla de control y 5 mezclas en las cuales se substituyó parte del cemento con cenizas volante.

**Tabla 1**  
**Proporción para las Muestras**

Lote	Subs. (%)	C (lb)	FA (lb)	AF (lb)	AG (lb)	H <sub>2</sub> O (lb)
Control	0	42	0	59	67	17
1	10	37.8	4.2	59	67	17
2	10	37.8	4.2	59	67	17
3	8	38.64	3.36	59	67	17
4	12	36.96	5.04	59	67	17
5	14	36.12	5.88	59	67	17

Subs.: por ciento substituido de cemento; C: cemento; FA: ceniza volante; AF: agregado fino; AG: agregado grueso; H<sub>2</sub>O: agua

## RESISTENCIA EN COMPRESIÓN

La metodología utilizada para las pruebas de compresión es la establecida por el ASTM C-39 [6]. El mismo requiere la preparación de varios lotes de cilindros, los cuales se someten a pruebas en la máquina de compresión (“Forney Concrete Compression Machine”).

En la Figura 1 se muestra un cilindro sometido a la prueba de compresión. Las pruebas en compresión se realizaron por etapas: 4 cilindros a los 7 días, 3 cilindros a los 14 días, 3 cilindros a los 21 días y 4 cilindros a los 28 días. Los pesos de los cilindros fueron registrados antes de poner los mismos a la prueba de compresión.

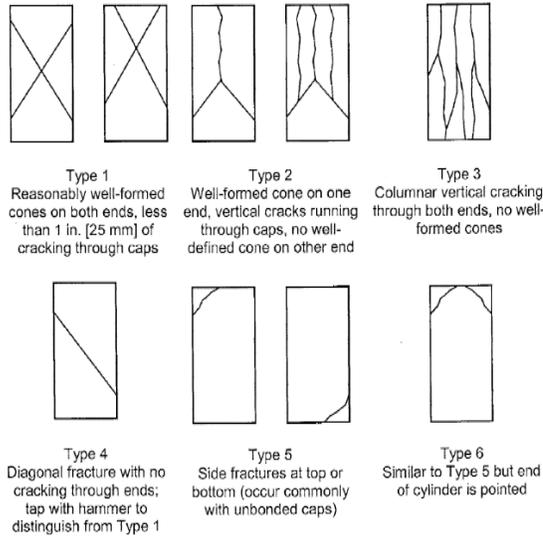


**Figura 1**  
**Prueba de Compresión**

Los datos de la carga máxima fueron evaluados usando la formula  $f'_c = F_{max} / A$ , donde  $f'_c$  es la resistencia en compresión,  $F_{max}$  es la carga máxima

aplicada en compresión y A es el área del cilindro utilizado.

Se observa en record el tipo de fractura de cada cilindro en todas las roturas. Cada cilindro fue objeto de análisis conforme a los tipos de fracturas. La Figura 2 muestra los tipos de fracturas comunes en pruebas de compresión de cilindros [6].



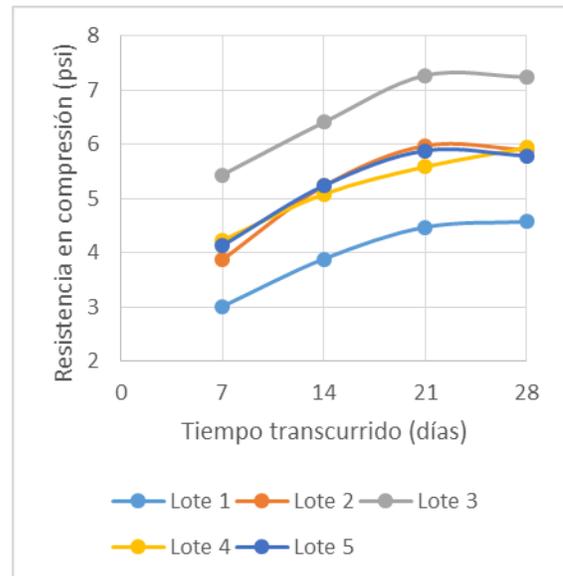
**Figura 2**  
Tipos de Fractura

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran las resistencias en compresión promedio que se obtuvieron para los distintos lotes y los distintos días que transcurrieron luego de fabricarse los cilindros. Estos promedios también se presentan de forma gráfica en la Figura 3. Se puede observar que todas las mezclas alcanzaron la resistencia requerida por el ASTM C-825 [4] de 4,000 psi a los 28 días. El Lote 1 sobrepasó la resistencia de 4,000 psi en las pruebas realizadas a los 21 días, mientras que el Lote 2 hizo lo propio en las pruebas hechas a los 14 días. Los Lotes 3, 4 y 5 sobrepasaron la resistencia de 4,000 psi en las pruebas realizadas a los 7 días. Se puede observar también que el Lote 3, la mezcla en que se substituyó 8% del cemento con cenizas volantes, tuvo la resistencia promedio más alta con  $f_c$  de 7245 psi. Los Lotes 2, 4 y 5 obtuvieron valores de resistencia a los 28 días bien similares como 5,901 psi, 5,941 psi y 5,793 psi, respectivamente.

**Tabla 2**  
Resultados de las Pruebas de Compresión

Lote	Días	Substitución de ceniza por cemento	$f_c$ (psi)
1	7	10%	3,013
	14	10%	3,890
	21	10%	4477
	28	10%	4578
2	7	10%	3877
	14	10%	5233
	21	10%	5979
	28	10%	5901
3	7	8%	5442
	14	8%	6410
	21	8%	7276
	28	8%	7245
4	7	12%	4232
	14	12%	5084
	21	12%	5591
	28	12%	5941
5	7	14%	4134
	14	14%	5241
	21	14%	5887
	28	14%	5793



**Figura 3**  
Resultados de las Pruebas de Compresión

Las Tablas 3, 4, 5 y 6 muestran los pesos, carga máxima y tipo de fractura para las pruebas realizadas a 7, 14, 21 y 28 días, respectivamente. Se

puede apreciar que a medida que aumenta el porcentaje de cenizas, el peso de la muestra disminuye, siendo la diferencia más grande entre las muestras de 8% y las de 14%. También se puede constatar en las tablas que a menor porcentaje de cenizas, la carga máxima tiende a ser mayor. Se puede observar también que los tipos de fractura que predominaron fueron la 3, 4 y 5.

**Tabla 3**  
**Peso, Carga Máxima y Tipo de Fractura a los 7 Días**

% Cenizas	Peso (lb)	F <sub>max</sub> (lb)	Tipo de Fractura
0	8.67	56,743	4-5
8	8.65	70,013	3-5
10	8.54	48,431	3-5
12	8.60	53,603	5
14	8.54	52,678	4-5

**Tabla 4**  
**Peso, Carga Máxima y Tipo de Fractura a los 14 Días**

% Cenizas	Peso (lb)	F <sub>max</sub> (lb)	Tipo de Fractura
0	8.65	65,923	5
8	8.76	80,576	4
10	8.58	65,783	3-5
12	8.62	63,910	4-5
14	8.58	65,883	4-5

**Tabla 5**  
**Peso, Carga Máxima y Tipo de Fractura a los 21 Días**

% Cenizas	Peso (lb)	F <sub>max</sub> (lb)	Tipo de Fractura
0	8.65	77,728	4-5
8	8.80	91,471	4-5
10	8.62	75,161	4
12	8.60	70,287	4
14	8.49	73,998	4-5

**Tabla 6**  
**Peso, Carga Máxima y Tipo de Fractura a los 28 Días**

% Cenizas	Peso (lb)	F <sub>max</sub> (lb)	Tipo de Fractura
0	8.71	76,165	4
8	8.74	93,033	4-5
10	8.56	74,818	3
12	8.62	75,048	4-5
14	8.56	74,358	4-5

## CONCLUSIÓN

En Puerto Rico, como en otros lugares del mundo, existe un serio e importante movimiento

que exige el cuidado y protección del ambiente y los recursos naturales. Este proyecto ha encontrado unos parámetros de diseño de mezcla de hormigón y ceniza volante que se pueden utilizar para la y fabricación de vallas de hormigón. Esto significa que a medida se utilice la ceniza volante como sustituto de cemento en la fabricación de las vallas, se encapsula la ceniza en la mezcla, solucionando el problema de la disposición de este material.

Por otro lado, la mezcla ayuda a reducir los costos de los materiales lo cual viabiliza la producción de vallas para todas las áreas que sea necesario.

Las vallas de protección están diseñadas para múltiples usos y con diversos estilos, como por ejemplo para control de tráfico, puente y carreteras, protección en áreas de construcción, protección de peatones, protección para trabajadores en zona de construcción, protección en área de aeropuertos y otros usos que se designe por la necesidad y el área a utilizarse. El uso de la mezcla de hormigón con ceniza volante, es la misma para todas las aplicaciones anteriores.

Sobre los parámetros de la mezcla de hormigón con ceniza volante utilizada en esta investigación, el margen de aceptación de valores en los diseños estuvo entre el 8% y el 14% de ceniza volante. Por ejemplo, si se fuese a instalar 50 millas de vallas tipo New Jersey entre San Juan y Mayagüez en ambas direcciones, y cada sección fuese de 20 pies de largo con 32 pulgadas de alto con una base de 24 pulgadas y un ancho de tope de 6 pulgadas, se utilizarían 957 toneladas de cenizas volantes, con la mezcla del 8%. Al precio actual de cemento, esto significaría un ahorro aproximado de \$203,617. Si por el contrario, si se utiliza el diseño de vallas en un proyecto de 50 millas de vallas de San Juan a Arecibo usando el diseño de 14% con segmentos de vallas de 10 pies, se economizaría aproximadamente \$337,021 en el costo del cemento utilizado.

Claramente el proyecto provee una alternativa para el uso de las cenizas volantes en mezclas de hormigón. De esta manera se puede ayudar a resolver el problema de la disposición de las

cenizas (FA), producto de la quema de carbón en la planta AES y evitar la acumulación excesiva en los predios de la planta.

### **RECOMENDACIÓN**

Para que los resultados de este proyecto sean verificados, se recomienda el acercamiento con “National Cooperative of Highways Research Programs” (NCHRP 350), el cual es el ente encargado de recomendar procedimientos evaluativos de seguridad y desempeño, para todo tipo de vallas de protección.

### **AGRADECIMIENTO**

Se agradece al Laboratorio de Materiales de Construcción de la Universidad Politécnica de Puerto Rico, por permitir realizar la investigación, y en especial al Sr. Salvador Montilla, por toda su colaboración y asistencia.

### **REFERENCIAS**

- [1] M. Santiago Negrón, “Proyecto del Senado 340”, *17ma Asamblea Legislativa, 1ra Sesión Ordinaria, Senado de Puerto Rico*, 4 de febrero de 2013.
- [2] Senado de Puerto Rico, “Informe Positivo sobre sustitutivo al P.S.340”, *17ma Asamblea Legislativa, 2da Sesión Ordinaria Senado de Puerto Rico*, 23 de octubre de 2013.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency, “Characteristics of Hazardous Waste”, *Code Federal Regulation*, 40 CFR Part 261 Subpart C, § 261.20. Consultado el 7 de abril de 2013. Disponible: <http://www.epa.gov>.
- [4] ASTM C825-06, “Standard Specification for precast concrete”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2011. DOI:10.1520/C025-06R11.
- [5] ASTM C33/C33m-13, “Standard Specification for Concrete Aggregates”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2013. DOI: 10.15201/C0033-C0033m-13.
- [6] ASTM C39/C39M-12a, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Specimens”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2012. DOI: 10.1520/C0039\_C0039M-1.