

615-51

la utilización de las cenizas volantes según el reciente simposio de Pittsburgh

ALVARO LÓPEZ RUIZ
Dr. en Química Industrial
Senior Testing Engineer

Se resume lo tratado en el simposio celebrado recientemente en Pittsburgh, U.S.A., sobre la utilización industrial de las cenizas volantes, complementado con información directa obtenida en visitas a instalaciones industriales y obras. En él, los Estados Unidos han analizado el problema con el fin de buscar una solución industrial a la creciente producción de este subproducto de las Centrales Térmicas de carbón, que alcanzará una cifra que se aproxima a los 40×10^6 t en 1980. Esto multiplicará los problemas para su eliminación, lo que grava el precio del kW. La producción en 1967 será cercana a los 20×10^6 t, de las que sólo se aprovechará el 4%. Se sugieren algunos posibles campos de aplicación de las cenizas volantes en España, en especial del conglomerante puzolana-cal en carreteras.

GENERALIDADES

En el mes de marzo de 1967 se ha celebrado en Pittsburgh, Pa, el simposio «Fly Ash Utilization», con el objeto de explorar las aplicaciones industriales y los posibles mercados para las cenizas volantes en los Estados Unidos, cuya producción crece sin cesar. La simple eliminación de este subproducto de las Centrales Térmicas constituye un problema, que tiende a agravarse al irse agotando los lugares próximos para su deposición. El coste de esta operación es, en algunos casos, de 2 dólares por tonelada. Este hecho grava el precio del kW y reduce el valor del carbón. Algunas Centrales están desarrollando mercados para este subproducto, como, por ejemplo, la fabricación de árido ligero para hormigones, que venden al precio de 4,5 dólares la yarda cúbica (350 ptas./m^3).

El simposio ha sido organizado por las siguientes entidades: «National Coal Association», «Edison Electric Institute» y «United States Department of the Interior, Bureau of Mines». Aunque el simposio ha sido prácticamente doméstico, la expectación ha sido extraordinaria, como lo indica una asistencia de más de 500 congresistas.

La producción de cenizas volantes en los Estados Unidos en este año, 1967, se aproximará a 20×10^6 t, de las que sólo se utilizará el 4%. En la figura 1 se representa la producción de cenizas volantes y el consumo de carbón bituminoso en las Centrales Térmicas, a partir del año 1950.

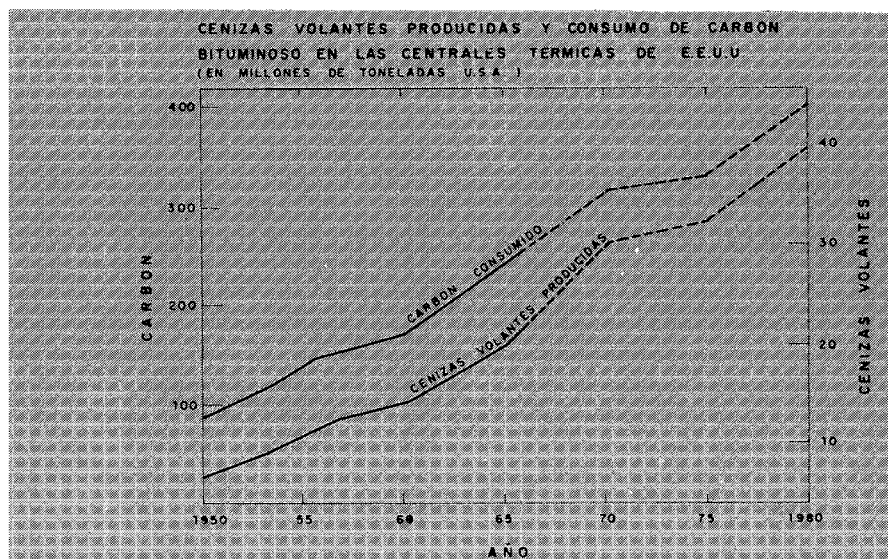


Figura 1.—Producción de cenizas volantes y consumo de carbón en las Centrales Térmicas en los Estados Unidos, a partir del año 1950.

En la tabla I figura la producción de cenizas en diversas naciones de Europa y el tanto por ciento utilizado industrialmente.

Las principales industrias consumidoras de cenizas volantes en los Estados Unidos las utilizan:

- 1) como constituyente del hormigón de cemento portland y en inyecciones. Las cenizas volantes se pueden añadir, bien en la fábrica de cemento, bien en la hormigonera;
- 2) en la conglomeración de las capas estructurales de cimentación (base y subbase) de autopistas y carreteras, y en la estabilización de suelos;
- 3) como relleno fino («filler») en los hormigones asfálticos;
- 4) en la fabricación de árido ligero para el hormigón;
- 5) como relleno selecto en autopistas, cimentaciones, etc.

Otros campos de menor consumo son los siguientes:

- a) Como aditivo de arenas de fundición.
- b) Como aditivo en morteros de albañilería.
- c) Como componente de las mezclas para la limpieza de superficies metálicas (chorro de arena).
- d) En la fabricación de bloques acústicos.
- e) En cementos aislantes.
- f) Como correctivo y acondicionador de suelos agrícolas.
- g) Como relleno de productos industriales, por ejemplo fertilizantes, jabón, papel, goma, tejas asfálticas, etc.

Fuera de los Estados Unidos es de destacar el elevado consumo de cenizas volantes: en Inglaterra, en rellenos estructurales de autopistas, aeropuertos, etc.; en Francia, como sustitución de parte del cemento portland; en Holanda, en la fabricación de ladrillos, y en Alemania, en la fabricación de bloques y paneles de hormigón celular.

TABLA I.—Producción y utilización de cenizas en 1965 por diversas naciones europeas, en miles de toneladas. Relación de las principales industrias consumidoras

	Producción en millares de toneladas	UTILIZACIÓN (en miles de toneladas)											Total	% utilizado de la producción	
		Cemento (Adición o sustitución)	Cemento (Cemento Crudos)	Carreteras	Hormigón celular	HORMIGÓN			Arido ligero	Ladrillos	Relleno de terrenos en construcción	Varios			
						Bloques	Hormigón preparado	Presas							
Francia	4.022	832	124	726	—	102	—	—	—	—	1	286	53	2.124	53
Grecia	250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Holanda	391	—	—	57	—	10	—	—	—	—	77	95	9	248	63
Polonia	4.990	15	—	25	525	175	—	—	—	—	—	200	—	940	19
Rumania	1.500	22	—	—	33	—	—	—	—	—	—	—	23	78	5
Inglaterra	9.440	18	—	1.647	—	938	55	—	65	31	1.013	12	3.779	40	
Alemania Oc.	10.000	5	—	550	40	850	800	—	—	—	—	450	35	2.730	26

NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LAS CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes son un polvo fino gris, que es arrastrado por los gases de combustión del carbón pulverizado, y que se produce como subproducto en las Centrales Térmicas. Se forman a partir de los componentes incombustibles del carbón, si bien contienen como impureza partículas de carbón. El tamaño de grano varía entre 1 y 80 micras. Las partículas más finas, observadas al microscopio, son pequeñas esférulas huecas translúcidas. El tamaño de los granos de carbón suele variar entre 10 y 300 micras.

La composición química de las cenizas volantes varía considerablemente. Más del 85 % está formado por sílice, alúmina, óxido de hierro, cal y magnesia, con una pequeña proporción de óxido de sodio y potasio, y SO_3 . En su actividad juega un papel fundamental la fase vítrea, que es la activa. El peso específico suele variar entre 2,2 y 2,5. El color típico es el gris. Un color oscuro suele estar relacionado con un contenido alto en carbón.

Las cenizas, por su origen, pueden ser «inherentes», es decir, procedentes de compuestos asociados estructuralmente con la fase carbón, y «no inherentes», como, por ejemplo, los finos estratos de limo que atraviesan frecuentemente los estratos de carbón, y las rocas marginales. La fracción «no inherente» puede ser separada económicamente hasta un 2-3 %, del producto final; sin embargo, la fracción «inherente» no puede ser separada por medios mecánicos.

En la tabla II figura la composición química media de cuatro cenizas volantes procedentes de la combustión de carbones bituminosos y de otras cuatro de lignito. En ella puede apreciarse la considerable mayor reactividad puzolánica de las cenizas volantes procedentes de carbones bituminosos y su menor contenido en cal.

TABLA II.—Composición química y reactividad puzolánica media de cuatro cenizas volantes procedentes de la combustión de carbones bituminosos y de otras cuatro de lignito

%	Cenizas volantes de carbón bituminoso	Cenizas volantes de lignito
SiO_2	41,0	32,4
Al_2O_3	21,5	16,5
Fe_2O_3	20,5	7,5
CaO	6,5	27,5
MgO	1,5	8,0
Na_2O	0,3	2,0
K_2O	0,3	0,3
SO_3	1,7	2,3
Pérdida al fuego	3,5	1,7
Reactividad puzolánica	15,5	4,1

Las aplicaciones de las cenizas volantes se basan, principalmente, en las siguientes características:

a en las propiedades puzolánicas, es decir, en su reactividad con la cal (sea añadida directamente, sea producida en las reacciones de hidratación de los constituyentes del cemento portland), para producir compuestos conglomerantes;

b en el fino tamaño de grano unido a una pequeña demanda de agua, que determinan su aplicación como árido fino en hormigones de cemento portland y asfálticos, ya que este tamaño suele faltar frecuentemente en las arenas silíceas;

c en las propiedades reológicas que comunican a los hormigones, morteros y «pastoles»* de cemento, especialmente si éste es escaso en granos ultrafinos. Estas propiedades se deben a la forma esférica y al tamaño casi coloidal de las partículas, que disminuyen considerablemente la permeabilidad de los sistemas en estado plástico;

d en el pH ligeramente alcalino (9 a 11), que explica su utilidad en la desacidificación de determinados suelos de cultivo (al mismo tiempo se «afloja» el terreno y se le aportan algunos elementos traza esenciales).

La reactividad de las cenizas volantes, a temperatura ordinaria, con la cal en presencia de agua, reside en la fase vítrea. En la reacción se forman principalmente silicatos y aluminatos hidratados de calcio, si bien también se pueden formar compuestos de magnesio. Se han identificado mediante rayos X, en los sistemas fraguados, hidratos del grupo de la tobermorita (silicato hidratado de calcio), etringita [sulfoaluminato hidratado de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 30\text{--}32\text{H}_2\text{O}$)], y un sulfoaluminato de menor contenido en SO_3 ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{--}13\text{H}_2\text{O}$). Se cree que la formación de etringita puede tener lugar sin adición de cal. Se atribuye a esta circunstancia la tendencia a endurecer de las cenizas volantes húmedas apiladas.

Se ha constatado que el óxido magnésico de las cales dolomíticas monohidratadas reacciona también con las cenizas volantes; sin embargo, el hidróxido magnésico y los carbonatos son prácticamente inactivos. Se ha dado el siguiente orden de receptividad puzolánica de las cales:

- 1 Cal dolomítica monohidratada [$\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot\text{MgO}$].
- 2 Cal de alto contenido en hidróxido cálcico [$\text{Ca}(\text{OH})_2$].
- 3 Cal dolomítica dihidratada [$\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot\text{Mg}(\text{OH})_2$].

Experiencias realizadas con cenizas volantes procedentes de lignitos han mostrado que el óxido cálcico que forma parte de su composición puede reaccionar con la fase vítrea en presencia de agua. Esta reacción tiene lugar con un considerable aumento de volumen, que puede ser peligroso si se produce una vez fraguadas las mezclas.

ESPECIFICACIONES

El objeto de las especificaciones es asegurar que existen las propiedades deseadas en un producto determinado, que no se dan características desfavorables o que aparecen en un grado tolerable para el fin perseguido, y que el comportamiento y las propiedades son uniformes

* NOTA En la contribución se emplea la palabra «pastol» para expresar los sistemas de inyección que no tienen decantación o ésta es muy pequeña, para distinguirlos de los sistemas con decantación o «lechadas». Los pastoles se emplean en la inyección de formaciones granulares, mientras que las lechadas se utilizan principalmente en la inyección de rocas.

en cada lote y entre los distintos lotes. Frecuentemente el resultado de las especificaciones es un compromiso entre el deseo del comprador en asegurar que el producto es satisfactorio para sus necesidades y el deseo del fabricante en vender todo lo que produce.

Uno de los mayores inconvenientes de las cenizas volantes es su frecuente falta de uniformidad. La composición química varía entre los distintos centros de producción y de tiempo en tiempo en cada centro productor. No es de extrañar esta circunstancia, si se consideran las diferencias entre los distintos carbones y las distintas condiciones de combustión de una central a otra, y aún en una misma central. Por otra parte, no se debe olvidar que la misión fundamental de las Centrales Térmicas es producir energía eléctrica. De todo lo cual se deduce la importancia y la dificultad de elaborar especificaciones para este producto de tan variada composición y características.

En la elaboración de especificaciones para las cenizas volantes como constituyente de los hormigones de cemento se ha seguido un criterio semi-empírico, en el que se han considerado, conjuntamente, el proceso puzolánico de conglomeración, diversos programas de ensayos en los que se han estudiado las propiedades de los productos fabricados con las distintas muestras analizadas, y la experiencia real de las obras.

Esto explica el que se estén retocando y mejorando continuamente las especificaciones. Se reconoce que las actuales tienen diversos puntos débiles; así, por ejemplo, en los límites de composición química no se distingue entre sílice activa e inactiva, o entre cal libre y combinada. Afortunadamente, los ensayos de actividad puzolánica y el ensayo de expansión en autoclave, resuelven el problema mediante medida directa de las propiedades en cuestión.

En la tabla III figuran cinco especificaciones empleadas en Estados Unidos y una en Inglaterra. Entre los valores propuestos pueden apreciarse diferencias notables, como, por ejemplo, en los límites máximos para la pérdida al fuego (12 % según ASTM y 5 % según el U.S. Bureau of Reclamation).

El carbón contenido en las cenizas volantes, aparte de rebajar el valor puzolánico del conjunto, tiene un poder considerable de adsorción sobre los agentes aireantes del hormigón, lo que obliga a tener que aumentar sensiblemente la dosificación de éstos, con objeto de conseguir un determinado contenido de aire ocluido. El control se hace muy difícil al pasar de una pérdida al fuego superior al 7 por ciento.

Se debe prestar especial atención a la demanda de agua de los morteros y hormigones fabricados con cenizas volantes. Esta demanda puede variar entre el 85 y el 115 % respecto de la del mortero u hormigón de control, y guarda relación con el contenido en carbón. Todos los factores que tienden a aumentar la demanda de agua de las cenizas volantes son contraproducentes.

ASTM, en su especificación C 350, incluye el siguiente requisito sobre uniformidad de las cenizas volantes: La superficie específica no deberá variar más del 15 %, ni el peso específico más del 5 %, de la media de las diez muestras precedentes, o de todos los ensayos anteriores si son menos de diez.

Las especificaciones y normas ASTM relativas a cenizas volantes, para su uso en hormigón, son las siguientes:

ASTM Designación C 350: «Especificaciones para las cenizas volantes utilizadas como aditivo del hormigón de cemento portland».

ASTM Designación C 311: «Método de toma de muestras y de ensayo de las cenizas volantes utilizadas como aditivo del hormigón de cemento portland».

TABLA III.—Especificaciones de cenizas volantes para su uso en hormigón.

	ASTM	Bureau Reclam.	British Standard	New York	Chicago	Mackinac Bridge Prepaht
SiO ₂ , mín. (%)			—	35,0	42,0	40,0
Al ₂ O ₃ , mín. (%)	70,0	75,0	—	15,0	15,0	15,0
Fe ₂ O ₃ , mín. (%)			—	—	—	—
MgO, máx. (%)	5,0	5,0	—	3,0	3,0	3,0
SO ₃ , máx. (%)	5,0	4,0	2,5	3,0	6,0	3,0
Alcalis (Na ₂ O), máx. (%)	1,5	2,0	—	—	—	—
Humedad, máx. (%)	3,0	3,0	1,5	—	1,0	2,0
Pérd. fuego, máx. (%)	12,0	5,0	7,0	12,0	6,0	4,5
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	—	3.000	—	3.000	3.000	2.800
Tamaño medio partícula, micras, máx.	9,0 (a)	—	—	—	—	—
Retenido en tamiz n.º 325, máx. (0,044 mm) (%)	—	15,0	—	—	12,0	—
Peso específico mín.	—	—	—	—	—	2,3
Resistencia en mortero (%) control	100	85	—	—	—	—
Retracción por secado (%)	0,03	0,04	—	—	—	—
Expansión autoclave, máx. (%)	0,05	—	—	—	—	—
Actividad cemento puzolánico, control, mín. (%)	85	85	—	—	—	—
Actividad puzolana-cal, psi, mín.	800	900	—	—	—	—
Demanda de agua del control, máx. (%)	105	103	—	—	—	103

Nota (a): Este tamaño medio de partícula corresponde a una superficie específica de 2.800 cm²/g.

Las especificaciones ASTM para los cementos puzolánicos fabricados con cenizas volantes como constituyente puzolánico, figuran en la norma ASTM Designación C 340: «Especificaciones para cemento puzolánico (Tipo IP)». En ellas, entre otras condiciones, se prescribe lo siguiente: El fabricante deberá comunicar por escrito, a petición del comprador, el origen, proporción y composición de la puzolana utilizada en la fabricación del cemento. También se especifican límites para la uniformidad de composición, que se controla mediante la variación del contenido en SiO_2 , Al_2O_3 y CaO , del cemento puzolánico.

Otras normas ASTM sobre productos, en los que se admite el uso de cenizas volantes, son las siguientes:

- Designación C 90: «Especificaciones para bloques huecos de carga»
- Designación C 94: «Especificaciones sobre hormigón premezclado»
- Designación C 270: «Especificaciones para morteros de albañilería»
- Designación C 387: «Especificaciones sobre los materiales y el envasado, para morteros y hormigones secos premezclados»
- Designación C 593: «Especificaciones para cenizas volantes y otras puzolanas para su uso mezcladas con cal.»

FABRICACION DE CENIZAS VOLANTES EN LA CENTRAL TERMICA DE KANAWHA

La composición química, las propiedades físicas y la uniformidad de las cenizas volantes producidas en una central térmica dada dependen, principalmente, de los siguientes factores: Clase de carbón quemado, equipo de pulverización, tipo de caldera, velocidad de combustión, relación aire/carbón, y tipo de los colectores. Afortunadamente, cuanto mejor es el rendimiento de la combustión, mejor es también la calidad de las cenizas volantes.

Cualquier variación en las condiciones de combustión se traduce en un cambio en las propiedades de las cenizas volantes, de donde se deduce la importancia de mantener condiciones uniformes, que desafortunadamente, en ocasiones, no es posible conseguir, debido a las fluctuaciones de la demanda de energía eléctrica. En general, una disminución de la carga se traduce en un aumento en el contenido en carbón de las cenizas volantes. Para resolver esta situación se precisa de un control continuo, que permita realizar rápidamente las correcciones necesarias y separar, si se considera preciso, las cenizas volantes producidas en estos períodos, del producto normal (1).

Se resumen, a continuación, las medidas adoptadas en la central térmica de Kanawha (Glasgow, West Virginia), de la «American Electric Power Co.», para obtener cenizas volantes de calidad uniforme, que cumplen con las especificaciones ASTM Designación C 350 y «U. S. Army Corps of Engineers, especificación CRD-C-262».

El equipo consta de dos calderas Babcock & Wilcox, con una producción por caldera de 1.400.000 lb/h (635.000 kg/h), y una presión de 2.000 psi (140 kg/cm²). Cada caldera está provista de ocho pulverizadores B & W EL 70 y 16 quemadores. El carbón proviene de dos fuentes distintas y es mezclado en proporciones iguales. La mezcla tiene una capacidad calorífica de 12.800 BTU/lb (7.100 kcal/kg) y un contenido en cenizas del 12 %. Los colectores de polvo son

(1) R. F. Stewart y W. L. Farrior, en su comunicación «Nuclear measurement of carbon in fly ash», describen un sistema para la medida y el control continuos del contenido en carbón de las cenizas volantes. La precisión es del 0,5 % en muestras con un contenido en carbón del 2 al 16 por ciento.

mecánicos y electrostáticos. Los colectores mecánicos son de tipo multiciclón y están proyectados para recoger el 85 % de las cenizas volantes; el precipitador electrostático recoge un 10 % más.

La Central producía en un principio cenizas volantes con las siguientes características: La pérdida al fuego oscilaba entre 0,6 y 4,9 %; la superficie específica Blaine, entre 1.800 y 2.000 cm²/g, y la suma de sílice, alúmina y óxido férrico, entre 93,8 y 95,2 %. El peso específico era próximo a 2,20.

Primeramente se aumentó la finura del carbón del 70 al 85 %, referido a los granos que pasan por el tamiz n.º 200 (0,074 mm). Esta medida redujo la pérdida al fuego de las cenizas, pero no alteró la finura Blaine. El siguiente paso fue establecer un programa de ensayos de rutina sobre el comportamiento de los pulverizadores en relación con el flujo de aire primario. Estos ensayos sirvieron para mantener equilibrados los fuegos, y permitieron conseguir una nueva reducción en la pérdida al fuego. Se observó que los cambios en las condiciones de combustión eran acusados fielmente por el color de las cenizas volantes. Sin embargo, las muestras tomadas de los silos colectores no acusaban los pequeños cambios y, por otra parte, era preciso vaciarles en cada toma de muestras. Debido a esto se proyectaron tomamuestras especiales. Cada 2 horas se toma una muestra, una pequeña porción de la cual se guarda en un frasco, que se coloca en un panel pintado de gris cuyo tono representa 2 % de pérdida al fuego. El panel con todas las muestras del día está en el cuarto de control y los operadores pueden hacer comparaciones periódicas de las condiciones de combustión y efectuar las correcciones necesarias.

Si las muestras tienen un contenido satisfactorio en carbón, las cenizas volantes contenidas en los silos colectores se trasladan a un silo determinado. Por el contrario, si el contenido en carbón es elevado, se arrastran con agua al lugar destinado al efecto. Con estas medidas se consiguió que las variaciones en la pérdida al fuego del producto terminado estuvieran comprendidas entre 0,5 y 1,3 %. Sin embargo, la superficie específica seguía siendo baja. El problema se ha resuelto moliendo las cenizas volantes en un molino de bolas hasta la finura deseada. Con esto se ha conseguido obtener un producto uniforme, de peso específico 2,45, finura Blaine comprendida entre 2.800 y 3.000 cm²/g y bajo contenido en carbono, que cumple con las especificaciones. La actividad puzolánica se aumentó de 45 — 53 kg/cm² a 7 días a 87—110 kg/cm².

La fábrica dispone de silos de 900 y 150 t de capacidad. Se pueden cargar gabarras, vagones, camiones-cisterna, y funciona una estación de ensacado.

UTILIZACION DE CENIZAS VOLANTES EN EL HORMIGON

La industria del hormigón constituye un mercado potencial de grandes posibilidades para el consumo de cenizas volantes, siempre que éstas cumplan con los requisitos de calidad y uniformidad. Este producto puede mezclarse en fábrica con el cemento, o puede ser añadido directamente a la hormigonera.

La industria cementera puede consumir cenizas volantes de las tres formas siguientes:

- a** en la preparación de los crudos de cemento portland;
- b** añadiéndolas con el clínker en el molino (donde pueden actuar mejorando el rendimiento de la molienda);
- c** mezclándolas con el cemento portland terminado.

En estos dos últimos casos, las cenizas volantes actúan como puzolana y confieren a la mezcla las propiedades de los cementos puzolánicos.

Las principales propiedades que las cenizas volantes de buena calidad confieren al hormigón son: Economía, mayor docilidad, mayor impermeabilidad y resistencia química, y menor calor de fraguado y endurecimiento.

La economía proviene del precio de las cenizas volantes, que es de tres a cuatro veces menor que el cemento portland. La mayor resistencia química frente a las aguas agresivas se debe principalmente a la reacción puzolánica, que fija el hidróxido cálcico procedente de las reacciones de hidratación del cemento, o de la cal libre.

La sustitución de cemento portland por cenizas volantes en el hormigón varía, en general, entre el 15 y el 35 %, en peso. El desarrollo de las resistencias mecánicas es más lento que en los hormigones correspondientes sin sustitución, pero, para las dosificaciones usuales y temperaturas templadas de curado, las resistencias son del mismo orden a la edad de 1 a 3 meses. Esta circunstancia, que es una ventaja en las obras masivas de hormigón, al disminuir y regular el calor de fraguado, es un inconveniente en los hormigones estructurales en tiempo frío. Lo que puede obligar al empleo de acelerantes, o a suprimir la adición de cenizas volantes en esta época.

El manejo de las cenizas volantes es más difícil que el del cemento portland, debido a su finura y menor peso específico. Asimismo, debido a su contenido en carbón, se precisa un mayor consumo de agentes aireantes y un mayor control.

Hormigón en masa

Las cenizas volantes se utilizan en el hormigón en masa principalmente por economía y para disminuir el calor de fraguado. Al mismo tiempo, las cenizas volantes de buena calidad mejoran la docilidad del hormigón y disminuyen la demanda de agua de amasado, lo que origina menor retracción por desecación y menor fisuración.

En Estados Unidos las primeras presas en las que se utilizaron cenizas volantes fueron las de «Hungry Horse» y «Canyon Ferry», construidas en 1948 y 1953 por el U. S. Bureau of Reclamation. Después, el «Corps of Engineers» construyó la presa Sutton en 1957. Actualmente este organismo consume puzolana prácticamente en todos sus proyectos con un volumen superior a 38.000 m³ de hormigón, y obtiene economías anuales superiores a los 2.000.000 de dólares.

La sustitución de cemento portland por cenizas volantes puede ser de 35 % en el interior de la presa y de 25 % en el hormigón expuesto.

El «Corps of Engineers» exige una pérdida al fuego inferior al 6 % en las cenizas volantes, con objeto de facilitar el control del aire ocluido en el hormigón. Asimismo, las cenizas volantes han de permanecer ensiladas en el lugar de origen hasta que se hayan completado los ensayos de 7 días.

b *Hormigón premezclado*

Al igual que en el hormigón en masa, la industria del hormigón premezclado, es decir, dosificado en estación y entregado preparado en las obras, puede consumir grandes cantidades de cenizas volantes, siempre que reúnan las características adecuadas. La característica de uniformidad es fundamental, aun en tono de color.

Las principales ventajas de la utilización de cenizas volantes, como sustitución de parte del cemento portland, son: Economía y docilidad.

Actualmente, en Estados Unidos se vende el hormigón por resistencia, y no por dosificación. Esto puede significar un beneficio económico para las empresas técnicamente bien preparadas. La docilidad es también, en ocasiones, un factor determinante.

Una sustitución de 60 kg/m³ de cemento portland por 60 kg/m³ de cenizas volantes de calidad adecuada, supone al fabricante un ahorro de 55 ptas./m³, y al comprador, una mayor docilidad y más fácil acabado. Esta propiedad es tanto más acusada cuanto más reducida en cemento es la dosificación del hormigón.

A igualdad de consistencia en el cono de Abrams, y contenido en material cementante, los hormigones con cenizas volantes son más dóciles que los correspondientes de cemento portland sin sustitución.

Las sustituciones de cemento portland por cenizas volantes en este tipo de hormigones pueden ser hasta del 25 %. Esta sustitución origina un retraso del fraguado que es beneficioso en verano, pero perjudicial en invierno. Se ha utilizado como acelerante, con alguna crítica, el cloruro cálcico en dosis de hasta el 2 % del material conglomerante.

Merece citarse la construcción, con hormigón premezclado, de la estructura del «Radiation Research Laboratory» de la Universidad de Pittsburgh, que tiene un espesor de hormigón de 1,5 m. Se requería que la estructura impidiera el paso de las radiaciones, que estuviera exenta de grietas, y que el hormigón tuviera una resistencia de 350 kg/cm². El hormigón empleado fue de 410 kg/m³ de material conglomerante, formado por 76 % de cemento portland y 26 % de cenizas volantes. Se utilizó un plastificante y hielo. El hormigón fue bombeado y se mantuvo un curado de niebla durante un período mínimo de 12 horas.

c *Bloques prefabricados*

Las cenizas volantes han sido muy bien acogidas por los fabricantes de bloques prefabricados, por economía, mayor docilidad de las mezclas, mejor acabado de los bloques y menor retracción.

La sustitución de cemento portland por cenizas volantes es usualmente del 24 %, obteniéndose las mismas resistencias que sin sustitución, para curados a temperaturas superiores a 71° C.

Durante el transporte y manejo de las cenizas volantes se ha de evitar su segregación. Las partículas de carbón suelen ser las más gruesas y tienen tendencia a separarse del resto. Se ha observado en algún caso una segregación excesiva, empleando cenizas volantes con pérdida al fuego superior al 5 por ciento.

Los fabricantes de bloques han insistido en que las cenizas volantes deben cumplir con las especificaciones ASTM D-350-64T, y con los criterios de uniformidad de las características físicas, químicas y de color.

d *Hormigón de árido precolocado*

Las cenizas volantes fueron utilizadas, por primera vez en la construcción en 1938, por la empresa «Intrusion-Prepakt Inc.», que las empleó como componente de su mortero de inyección de árido precolocado.

Esta técnica, de especial interés en los hormigonados bajo agua, consiste en la inyección con un mortero fino, sin apenas retracción, de grava limpia previamente colocada in situ. La grava tiene un tamaño mínimo de 13 a 19 mm, y la arena empleada en el mortero, un tamaño máximo de 1,2 mm (tamiz ASTM # 10).

Para evitar en lo posible la retracción del mortero, y por lo tanto beneficiar la adherencia y la impermeabilidad, se requiere utilizar una dosis pequeña de agua, compatible con una perfecta penetrabilidad del mortero en los huecos de la grava. Las cenizas volantes son un componente fundamental del mortero, por las propiedades reológicas que confiere al sistema y por sus propiedades puzolánicas. Se utiliza, además, un plastificante, un agente que provoque una ligera presión de expansión mientras el mortero está aún fresco, y un retardador.

Por su importancia merece citarse la cimentación del puente Mackinac (1957), a profundidades en ocasiones superiores a los 60 m. Se emplearon cerca de 350.000 m³ de hormigón de grava precolocada.

La composición del mortero de inyección fue la siguiente:

- cemento portland, tipo I: 2,5 partes en peso;
- cenizas volantes : 1,0 » » » ;
- arena fina : 4,2 » » » .

Además, se añadió un plastificante, un retardador, un agente de expansión, y el agua necesaria para formar un «pastol» espeso. La dosificación en materiales conglomerantes (cemento portland más cenizas volantes) fue próxima a 240 kg/m³ de hormigón. La resistencia mínima del hormigón a los 90 días resultó de 210 kg/cm².

Las cenizas volantes contribuyen apreciablemente en las siguientes propiedades en los hormigones de árido precolocado: Resistencia, docilidad, impermeabilidad y economía.

e *Inyección de pozos petrolíferos*

Desde el año 1949 las cenizas volantes se están empleando en los pastoles de inyección de los pozos de petróleo. Las inyecciones se ejecutan en ocasiones a más de 7.000 m de profundidad, con presiones de inyección superiores a 1.000 kg/cm². Las temperaturas pueden alcanzar los 370° C.

En general, no se precisan resistencias elevadas; una resistencia de 35 kg/cm² es suficiente para la sujeción de los tubos de revestimiento. La variable más crítica es el tiempo de espesamiento. La operación se proyecta para un tiempo de inyección inferior a 90 minutos; pero con el fin de cubrir imprevistos, el tiempo de espesamiento debe ser de 3 a 4 horas. Por otra parte, la mezcla debe alcanzar en un tiempo inferior a 24 horas la resistencia necesaria para poder continuar la perforación. Se comprende que, según las condiciones, en unos casos será preciso utilizar un retardador y en otros un acelerante. La densidad del pastol es también una característica importante, en la que juega un papel esencial la dosificación en cenizas volantes.

Una relación típica cemento portland/cenizas volantes es la 1 : 1 en volumen absoluto (volumen de sólidos). Se suele añadir un 2 % de bentonita para dar una ligera cohesión a la mezcla, lo que dificulta la segregación y facilita la inyección. La resistencia está muy influenciada por la edad, la presión y la temperatura.

Otro sistema conglomerante utilizado en la inyección de pozos a gran profundidad es la mezcla de cenizas volantes y cal apagada, con la adición de un activador químico. Con esta mezcla se consiguen las resistencias necesarias en el tiempo deseado; se utiliza cuando las temperaturas son superiores a 60° C. El activador se suprime cuando las temperaturas son superiores a 145° C. Para profundidades mayores de 2.000 m se suele adicionar un retardador.

El calor de reacción es inferior al de los sistemas con cemento portland; pero, es suficiente para poder ser detectado el frente de avance de la columna de inyección mediante termómetros apropiados. Una mezcla típica consiste en 6,7 partes, en peso, de cenizas volantes y 1 parte, en peso, de cal apagada. El activador suele entrar en la proporción del 2-4 por ciento.

Quizás la propiedad más interesante de las cenizas volantes en los pastoles de inyección es su economía. La cantidad de cenizas volantes utilizadas con este fin en 1965 fue superior a 120.000 toneladas.

HORMIGÓN DE CENIZAS VOLANTES-CAL EN CARRETERAS

Recientemente se está utilizando en Estados Unidos hormigón de cenizas volantes-cal, de consistencia de tierra húmeda compactado, como base de pavimentos semiflexibles de carreteras, autopistas, pistas de aterrizaje y aparcamientos.

Los materiales utilizados son: Cenizas volantes, cal apagada, áridos y agua. La proporción de cenizas volantes en la mezcla seca suele variar entre 10 y 15 %. La relación cal/cenizas volantes está generalmente comprendida entre 1 : 3 y 1 : 6. La composición y la humedad óptima debe ser determinada en cada caso.

Suponiendo un contenido en cenizas volantes de 15 % en el hormigón, con 1×10^6 t de este subproducto se podrían preparar 7×10^6 t de hormigón puzolánico, cantidad suficiente para construir 2.100 km de base estructural de carretera, con un espesor de «base» de 20 centímetros.

El hormigón puzolánico se mezcla con amasadora en una estación dosificadora y se transporta a la obra en camiones convencionales. El hormigón, que debe tener una humedad próxima a la óptima de compactación, se coloca y compacta con el equipo normalmente empleado en la ejecución de bases de carretera de pavimento flexible. (*)

En el año 1956, se inició en la Universidad de Illinois, con la ayuda de la «Illinois Division of Highways», un programa de investigación sobre mezclas de cenizas volantes, cal apagada, áridos y agua. A partir de 1959, con la colaboración de varias organizaciones y asociaciones, se han realizado estudios comparativos entre pavimentos de hormigón puzolánico y de piedra de macha-

(*) Según información conseguida en la visita a varias obras, el hormigón puede permanecer algunos días en el tajo sin colocar, sin que por ello pierda sus propiedades, si al compactar tiene la humedad necesaria. A continuación puede colocarse el hormigón asfáltico, y la carretera puede entrar inmediatamente en servicio. La compactación usualmente requerida es el 95 % del "Proctor modificado", AASHO Designación T - 180 - 57, method C.

queo; se han determinado las características básicas que permiten conocer la conducta de dichos pavimentos bajo carga, y se ha elaborado un método para proyectar pavimentos de hormigón puzolánico (2), (3) y (4). Otros estudios adicionales se han llevado a cabo en las Universidades de Villanova y Iowa, y por diversas organizaciones privadas.

A continuación, se resumen algunas de las propiedades de los hormigones compactados de cenizas volantes-cal y de los pavimentos fabricados con ellos.

Resistencia

En la figura 2 se representan dos curvas típicas «resistencia a compresión-deformación unitaria», de dos hormigones de cenizas volantes-cal. El árido utilizado en uno de ellos es grava y en el otro escoria.

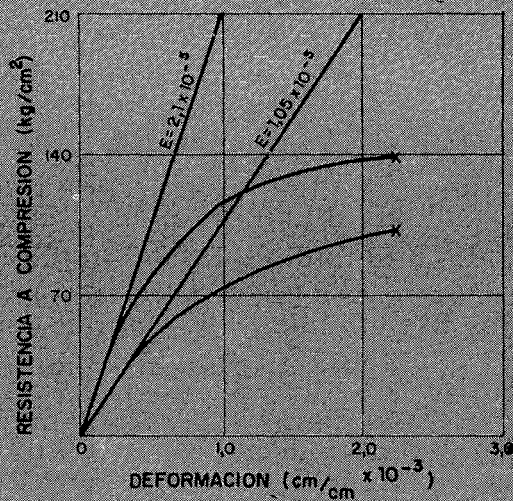


Figura 2.—Curvas típicas «resistencia a compresión-deformación», de dos hormigones endurecidos de cenizas volantes-cal.

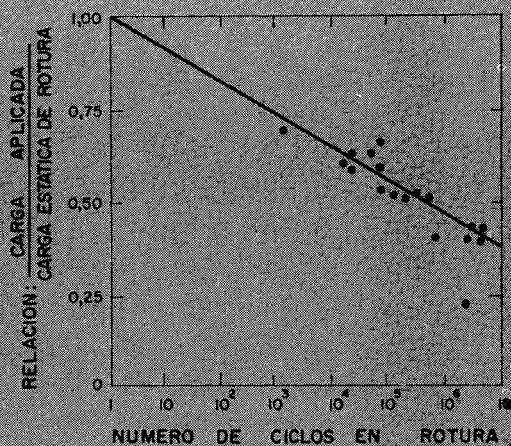


Figura 3.—Curva de fatiga de un hormigón puzolánico de cenizas volantes-cal.

La resistencia a flexo-tracción es, generalmente, del 20 al 25 % de la resistencia a compresión, y la resistencia a tracción, aproximadamente, el 10 %. La relación módulo de elasticidad/resistencia a compresión es del orden de 1.500. El módulo de Poisson suele ser próximo a 0,10.

(2) H. L. Ahlberg and E. J. Barenberg. «Pozzolanic Pavements». Bulletin 473, Engineering Experiment Station. College of Engineering University of Illinois, Urbana, Ill.

(3) E. J. Barenberg. «Behavior of Pozzolanic Pavements under load». Highway Research Record n.º 112, 1966.

(4) E. J. Barenberg. «The behavior and Performance of Asphalt Pavements with Lime-Fly Ash Aggregate Bases». Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan; 1967.

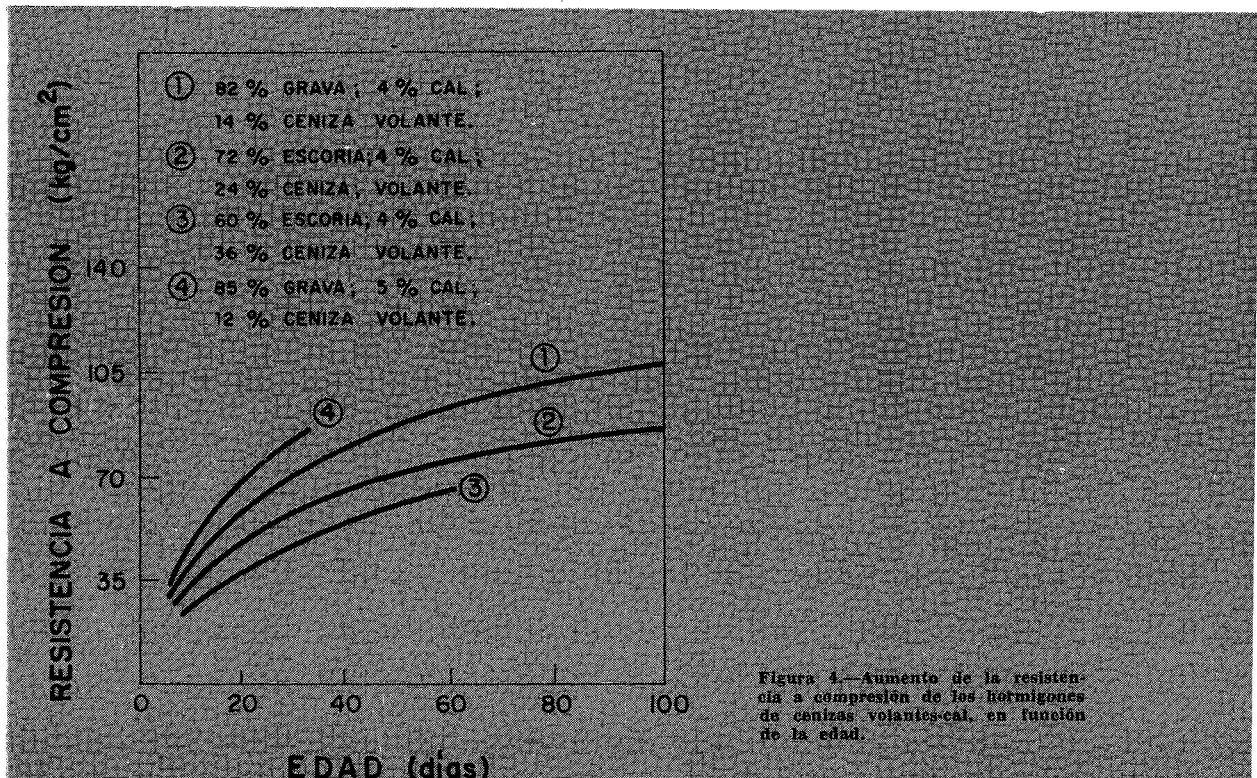
Los hormigones son susceptibles de rotura progresiva, si se les somete repetidamente a tensiones inferiores a su resistencia máxima. En la figura 3 se ha representado una curva típica de fatiga de un hormigón puzolánico.

La conducta frente a las cargas repetidas de los hormigones de cenizas volantes-cal es similar a la de los hormigones de cemento portland, si se hacen las correcciones debidas al aumento de resistencia producido durante el ensayo. Una disminución de la relación carga aplicada/carga máxima de rotura, va acompañada de un aumento logarítmico del número de ciclos de carga hasta rotura. Si el aumento de la resistencia con la edad es mayor que un cierto valor crítico, el hormigón probablemente no romperá nunca por fatiga.

Factores que influyen en la resistencia de los hormigones de cenizas volantes-cal

Los factores que más influyen en la resistencia de los hormigones de cenizas volantes-cal, a igualdad de composición, son: la edad, la temperatura y la densidad relativa.

En la figura 4 se ha representado una curva típica del aumento de resistencia de estos hormigones con la edad.



El aumento de la resistencia de los hormigones puzolánicos con el tiempo, es decir, la velocidad de los procesos de fraguado y endurecimiento, está muy influenciado por la temperatura. Así, se puede estimar que un aumento de la temperatura de curado de 15° a 25° C, o sea, 10° C de diferencia, supone un aumento de la resistencia a compresión a 7 días de 70 a 100 %. Una circunstancia fundamental es que las reacciones citadas casi se paralizan a una temperatura inferior a 5° - 10° C.

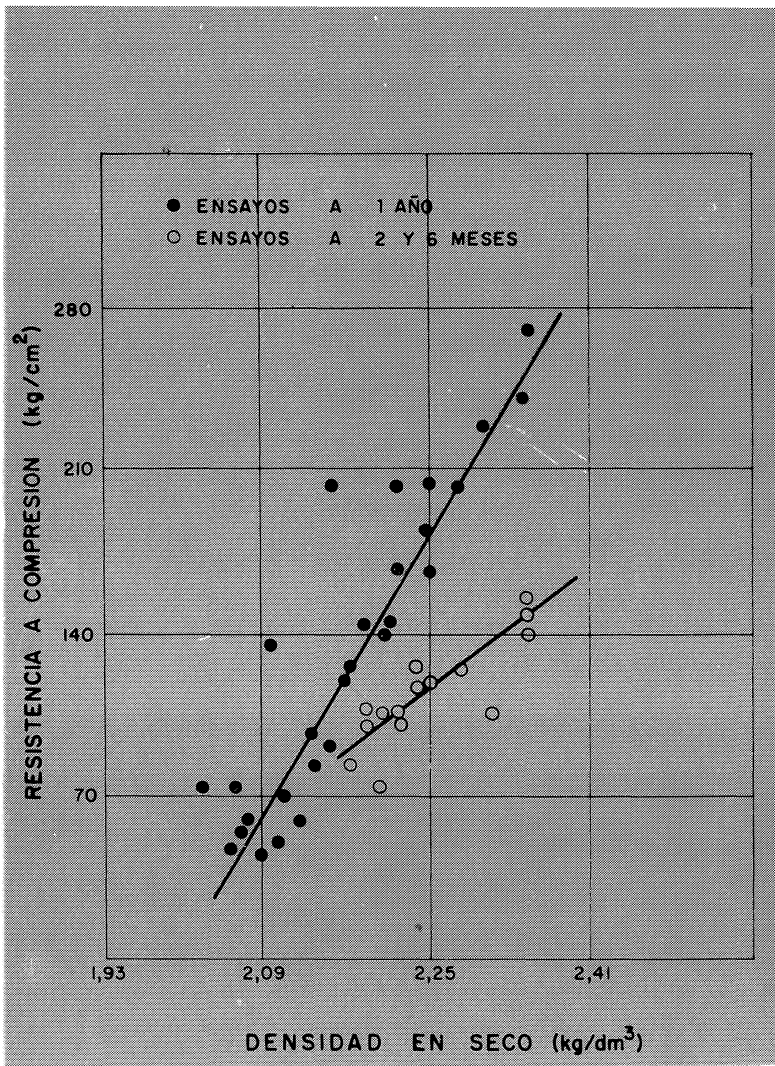


Figura 5.—Influencia de la densidad relativa sobre la resistencia a compresión de testigos de «bases» de pavimentos de hormigón de cenizas volantes-cal.

Un factor decisivo en la resistencia y calidad de estos hormigones es su densidad relativa. Esta influencia puede apreciarse en la figura 5.

La figura anterior muestra que, si se adopta como referencia una densidad media de 137 pcf (2,20 kg/l), una variación en la densidad relativa de sólo 5% supone una variación en la resistencia algo superior al 100%; es decir: obtener una resistencia algo superior al doble si la variación de densidad es positiva, o inferior a la mitad si la variación de densidad es negativa.

Durabilidad y cambios de volumen

La resistencia a compresión de las probetas o testigos de hormigón de cenizas volantes-cal en estado seco, es, en general, superior en más del 50 % a la del hormigón correspondiente en estado saturado. Dado que estos hormigones están, en general, en estado húmedo en el pavimento, su resistencia debe ser determinada en condiciones saturadas (*). Se ha comprobado que la acción de los ciclos «humedad-sequedad» no disminuye la resistencia de las probetas de estos hormigones.

(*) Las resistencias citadas hasta ahora, se refieren a hormigones puzolánicos en estado saturado.

Los hormigones de cenizas volantes-cal, correctamente proyectados, resisten satisfactoriamente a los ciclos «hielo-deshielo» y cumplen con las normas de durabilidad para los materiales de pavimentos (AASHO 1-136). Los factores que más influencia tienen sobre la durabilidad de estos hormigones son la edad y la temperatura de curado —antes de someter al hormigón al primer ciclo—, la densidad relativa y la dosificación de los componentes. La proporción de árido grueso no debe ser excesiva, con el fin de que no se toquen sus superficies e impidan la compactación de la matriz.

Los cambios de humedad y de temperatura, especialmente los primeros, son los factores que más importancia tienen en relación con los cambios de volumen de los hormigones de cenizas volantes-cal. La retracción por desecación produce grietas en los pavimentos; sin embargo, el entumecimiento por imbibición no parece tener efecto negativo.

Características de los pavimentos de hormigón de cenizas volantes-cal

Las losas de hormigón distribuyen las cargas sobre áreas extensas del terreno natural, con lo que se disminuyen considerablemente las tensiones máximas transmitidas y las deformaciones bajo carga.

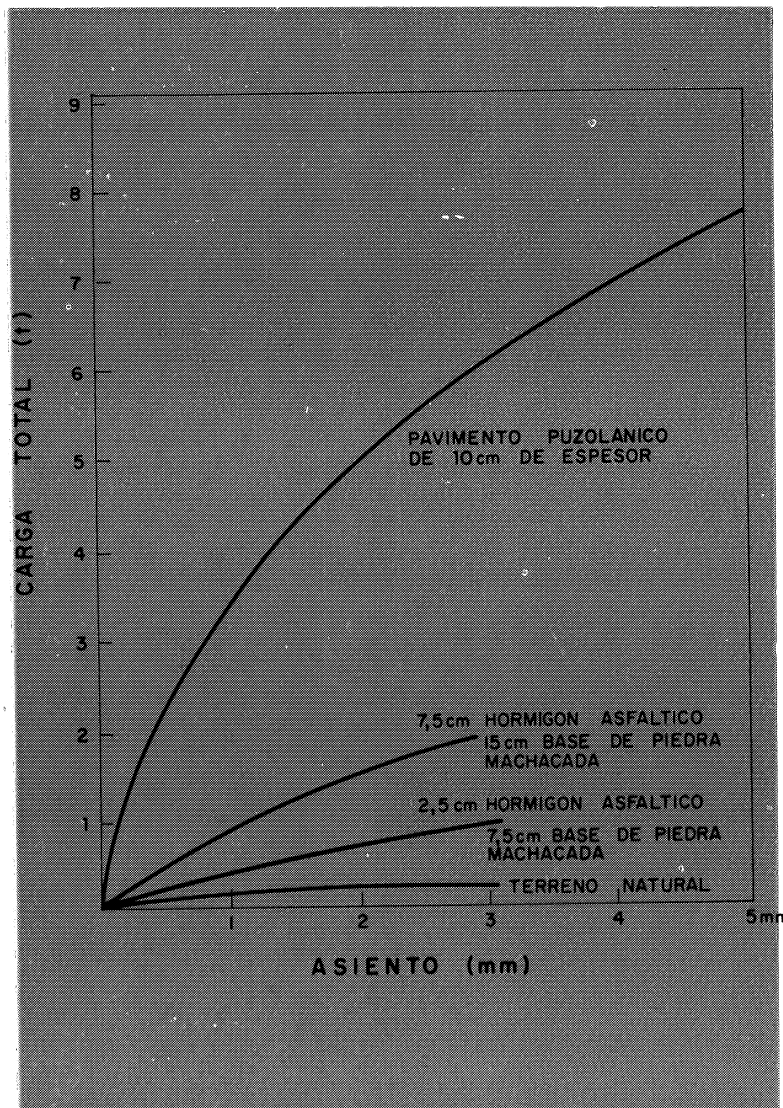


Figura 6.—Deformación bajo carga de diferentes pavimentos. Carga aplicada sobre un disco rígido de 7 pulgadas (17,7 cm) de diámetro.

En la figura 6 se han representado las deformaciones producidas por cargas estáticas aplicadas:

- sobre el terreno natural;
- sobre un pavimento de piedra machacada y capa superficial de hormigón asfáltico;
- sobre una losa de hormigón de cenizas volantes-cal.

Se puede apreciar que la deformación producida por una carga de 2.000 lb (910 kg) aplicada a través de un disco rígido de 7 pulgadas (17,7 cm) de diámetro, fue veinte veces mayor en el pavimento de piedra de machaqueo y hormigón asfáltico que en el hormigón de igual espesor de hormigón puzolánico. Asimismo, la carga precisa para producir una deformación de 0,05 pulgadas (1,27 mm), resultó ocho veces mayor en este último caso que en el primero.

La resistencia a la fatiga de los pavimentos de hormigón de cenizas volantes-cal está en relación con la resistencia máxima de la losa y con el comportamiento del material al ser sometido al ensayo de fatiga en el laboratorio. La resistencia máxima de la losa depende de la resistencia a la flexión del hormigón. En la figura 7 se ha representado la resistencia máxima de losas de hormigón puzolánico de 4 pulgadas (10,1 cm) de espesor, en función de la resistencia a la flexión, y se la compara con la resistencia teórica.

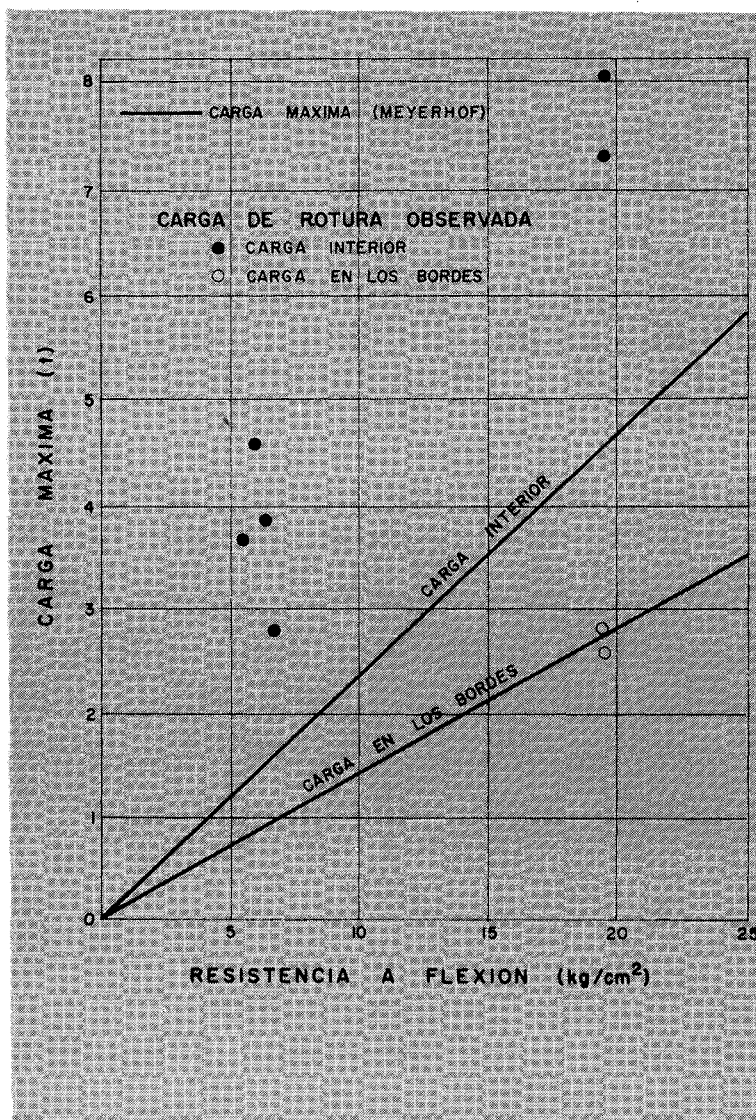


Figura 7.—Resistencia máxima, teórica y real, de losas de hormigón de cenizas volantes-cal de 4 pulgadas (10,1 cm) de espesor, en función de la resistencia a la flexión.

La resistencia máxima de la «base» de los pavimentos de hormigón puzolánico aumenta casi linealmente con la resistencia a la flexión del hormigón y con el cuadrado del espesor de la losa.

Con un hormigón de 200 psi (14 kg/cm²) de resistencia a la flexión y un espesor de «base» de 8 pulgadas (20 cm), la resistencia máxima del pavimento sería de 15.000 a 16.000 lb (6,8 a 7,3 t) por rueda. Si se aplica un coeficiente de seguridad de 2 se obtiene que el pavimento podría soportar probablemente un número ilimitado de cargas de 12.000 a 18.000 lb (5,4 a 8,2 t) por eje, sin rotura por fatiga del hormigón.

Un análisis de los pavimentos que se han construido con hormigón de cenizas volantes-cal, muestra que se han comportado generalmente bien en servicio. Los pocos casos en los que se ha resentido la estructura, debido a la aplicación de cargas pesadas sobre un pavimento de espesor inadecuado, se han producido a temprana edad y el deterioro no ha progresado con ulteriores aplicaciones de carga.

IAS CENIZAS VOLANTES EN LA FABRICACION DE LADRILLOS

La utilización de cenizas volantes en la fabricación de ladrillos tiene particular interés en las zonas próximas a los centros productores de este subproducto, en las cuales escasean las arcillas o sus reservas no sean muy considerables.

La fabricación puede realizarse con o sin adición de arcilla. En este último caso se precisa añadir un componente aglomerante como el silicato sódico. No se requieren especiales características físicas o químicas para las cenizas volantes, que pueden proceder de carbones bituminosos o de lignitos.

En Inglaterra se consumen anualmente unas 30.000 t de cenizas volantes en la fabricación de ladrillos, con adición de arcilla. La proporción de cenizas volantes en la mezcla puede alcanzar el 85 %, en volumen. La resistencia de los ladrillos oscila entre 140 y 315 kg/cm². El aspecto es semejante al de los ladrillos usuales de arcilla. Los mejores resultados se obtienen con arcillas plásticas poco cargadas de limo.

En Estados Unidos, el «U.S. Department of the Interior Office of Coal Research», y la Universidad de West Virginia, están realizando un programa de investigación para la utilización de cenizas volantes en la fabricación de ladrillos sin adición de arcilla.

La mezcla, referida a base seca, se compone aproximadamente de 74 % de cenizas volantes, 23 % de un árido más grueso, y de 2,5 a 3,0 % de silicato sódico. Como árido se puede emplear escoria, que generalmente se obtiene de la misma Central Térmica que produce las cenizas volantes. En este caso, los ladrillos se componen de 97% de escoria. La dosificación en agua de la mezcla es próxima al 9 %; sin embargo, si se usan cenizas volantes procedentes de lignitos, de alto contenido en cal, la dosis sube al 11 %. La presión en la galletera es de 210 kg/cm².

La mezcla de cenizas, silicato sódico y agua se deseca a 99°—105° C. Seguidamente, se sube la temperatura a unos 540° C, y se la mantiene durante 2 ó 3 horas, hasta quemar el carbón presente. Después se eleva la temperatura a razón de 40° a 80° C por hora, hasta 1.090° a 1.150° C. El tiempo total de cocido, incluido el período de enfriamiento, varía de 12 a 40 horas, según las características de las materias primas.

En el control de calidad la variable principal es el coeficiente de saturación (relación entre la absorción después de 24 horas en agua fría y la absorción después de 5 horas en agua hirviendo). Algunas características de los ladrillos obtenidos son las siguientes:

- coeficiente de saturación: 0,76-0,86;
- absorción, 5 horas en agua hirviendo: 12 a 22 %;
- porosidad: 22 a 35 %;
- resistencia: 210 a 1.400 kg/cm²;
- aspecto: Análogo al de los ladrillos de arcilla.

El precio de coste del millar de ladrillos se calcula en 22,22 dólares.

UTILIZACION DE CENIZAS VOLANTES EN LA FABRICACION DE ARIDO LIGERO

El empleo de cenizas volantes en la fabricación de árido ligero, constituye un campo que puede absorber cantidades importantes de este subproducto. La utilización de árido ligero en el hormigón estructural y en bloques prefabricados disminuye considerablemente el peso muerto de los edificios, sin disminuir la resistencia del hormigón, ni su durabilidad, a igualdad de dosificación en cemento. Esto supone una economía sustancial en acero y en cimentación, y permite ganar superficie útil, lo que tiene indudable interés en los edificios altos.

En un edificio de 30 pisos y sección cuadrada de 100 pies (30,5 m) de lado, con los precios de Nueva York, se ha calculado en 100.000 dólares el ahorro producido por la utilización de árido ligero en el hormigón.

La densidad aparente de los áridos ligeros, obtenidos a partir de cenizas volantes, es de 42 a 50 pcf (670 a 800 kg/m³), frente a 110 pcf (1.760 kg/m³) del árido de machaqueo. La densidad media del hormigón de árido ligero es de 110 pcf (1.760 kg/m³), frente a 147 pcf (2.350 kg/m³) del hormigón de árido normal.

El árido ligero se produce por sinterización de las cenizas volantes, que ya en el horno de la Central Térmica han experimentado una temperatura de 3.000°-3.200° F (1.650°-1.760° C). Las cenizas volantes, con un contenido en carbón controlado (se ha citado la dosis 7,0 a 7,5 % como óptima), se mezclan con una cantidad determinada de agua y se las da forma de bolas, que se someten a sinterización. Durante este proceso, que tiene lugar a una temperatura de 2.000° a 2.300° F (1.100° a 1.260° C), se sueldan las partículas sólidas, conservándose la porosidad.

El producto terminado está constituido por unidades de forma esférica, cuyo diámetro está comprendido entre $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{4}$ de pulgada, con las que se obtiene un hormigón de buena docilidad. A las fábricas de bloques prefabricados se les suministra el árido ligero machacado, con un tamaño comprendido entre $\frac{1}{4}$ de pulgada y el tamiz ASTM n.º 200 (una pequeña fracción pasa por este tamiz de 0,074 mm de luz de malla).

Las cenizas volantes empleadas en la fabricación deben ser de composición uniforme, especialmente en carbón, para lo que es preciso, en general, mezclar cenizas volantes de dos silos.

La Compañía «Cons. Edison Co.» de Nueva York, puso en funcionamiento en 1963 una fábrica de árido ligero con capacidad de 300.000 yardas cúbicas (230.000 m³) al año. En Inglaterra, la empresa Lytag Ltd. ha construido en 1966 dos fábricas con una capacidad de producción de 200.000 t al año, y tiene en proyecto otras tres.

UTILIZACION DE CENIZAS VOLANTES EN AGRICULTURA

Las cenizas volantes han sido utilizadas, con éxito, como correctores y acondicionadores de determinados suelos de cultivo. Las propiedades de las cenizas volantes de más interés agrícola son las siguientes: Disponibilidad en grandes cantidades, pH adecuado para neutralizar suelos ácidos, contenido en elementos-traza superior al de los suelos naturales, retentividad de humedad disponible superior al de muchos suelos naturales, y conferir a los suelos cohesivos friabilidad y trabajabilidad.

Las cenizas volantes son consideradas en Alemania como una fuente valiosa de potasio y calcio. Estudios realizados en Estados Unidos por la «Tennessee Valley Authority», han demostrado la utilidad de emplear en algunos suelos para el cultivo del maíz hasta 200 t por acre (450 t/ha) de dicho subproducto. Con proporciones superiores se han observado efectos tóxicos. Experiencias realizadas por la empresa «Ohio Power Co.», han mostrado una mayor producción y una mejor calidad en el cultivo de patatas en algunos suelos adicionados de cenizas volantes.

La aplicación agrícola más interesante de las cenizas volantes ha sido en la corrección de suelos ácidos. Con este abjeto han sido utilizadas en polvo, y sinterizadas. La sinterización disminuye la superficie de las cenizas volantes y reduce la velocidad de cesión de los elementos solubles. Se han obtenido buenos resultados en el cultivo de centeno y alfalfa, con un suelo formado por la mezcla de 3 partes de cenizas volantes y 1 parte de suelo ácido.

Mediante el empleo de cenizas volantes en polvo se ha conseguido hacer cultivables terrenos de zonas mineras acidificados por productos residuales. La dosificación que dio mejores resultados fue de 600 t por acre (1.350 t/ha) de cenizas volantes mezcladas con el terreno hasta una profundidad de 30 cm. Este tratamiento produjo los siguientes cambios en la composición química del terreno:

	Valor inicial	Valor actual
pH	3,5	5,1
Nitrógeno	Muy bajo	Medio
Fósforo	Muy bajo	Medio
Potasio	Muy bajo	Medio
Capacidad de cambio de cationes	12 meq/100 g	19 meq/100 g

El resultado obtenido ha sido muy satisfactorio. Se observó que en las zonas donde el pH era inferior a 5,0 o donde las raíces de las plantas entraban en contacto con el suelo inferior ácido, el desarrollo de las plantas fue deficiente. En ocasiones se han obtenido resultados desfavorables con la adición de cenizas volantes a los suelos de cultivo, por lo cual su utilización únicamente debe ser llevada a cabo después de realizar ensayos adecuados.

SUGERENCIA SOBRE POSIBLES APLICACIONES DE LAS CENIZAS VOLANTES EN ESPAÑA

En España, dado que el aprovechamiento de las reservas hidroeléctricas potenciales estará próximamente cerca de la saturación, la instalación de centrales térmicas de carbón y, por lo tanto, la producción de cenizas volantes, seguirá a ritmo creciente aunque se instalen algunas centrales de combustible atómico. Es, por lo tanto, evidente el interés de dar aplicación industrial a las cenizas volantes.

Mientras no se consiga la calidad y uniformidad requeridas para el uso de las cenizas volantes en la fabricación de cemento y hormigones, se sugieren como posibles campos de aplicación los siguientes:

- en la Industria Cerámica;
- en la Agricultura;
- en Carreteras.

La industria cerámica podría consumir este subproducto principalmente en la fabricación de ladrillos, con o sin adición de arcilla.

En la Agricultura podrían utilizarse las cenizas volantes en la corrección de suelos ácidos y en la elaboración de suelo artificial de cultivo, por ejemplo mediante su mezcla con suelos turbosos.

Dadas las favorables temperaturas medias de España, es atrayente la utilización del sistema áridos-cenizas volantes-cal apagada-agua en la construcción de la base estructural de carreteras y autopistas, especialmente en las zonas próximas a los centros productores, y donde escaseen los áridos de buena calidad. Al igual que las cenizas volantes podrían utilizarse con este objeto las puzolanas naturales, en aquellas regiones donde abundan. La resistencia del conglomerante puzolana-cal puede mejorarse considerablemente mediante aditivos químicos (5) y (6); sin embargo, una resistencia a la flexotracción excesiva no es recomendable en este tipo de pavimentos semiflexibles.

Otra aplicación de las cenizas volantes en carreteras podría ser como polvo de relleno en los hormigones asfálticos.

(5) M. Mateos and D. T. Davidson. Further evaluation of promising chemical additives for accelerating the hardening of soil-lime-fly Ash mixtures. Highway research board bulletin, 1961.

(6) A. López Ruiz. Posibilidades del empleo de las arcillas en la fabricación de aglomerantes económicos. Publicación n.º 84 del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción. Madrid, 1955.