

## los empleos de las cenizas volantes en construcción

### les utilisations des cendres volantes dans la construction

M. A. JARRIGE

(«Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics»,  
año 12, núm. 138, junio 1959, pág. 521.)

(Continuación)

#### LOS CEMENTOS DE CENIZAS

Actualmente, en el mercado francés hay dos tipos de cementos que contienen cenizas volantes: los cementos puzolano-metalúrgicos Fouilloux y los cementos portland con 20 % de cenizas, cuya normalización está en curso.

El apoyo en favor de los cementos portland con 20 % de cenizas se dirige en el sentido de aumentar la producción de cemento sin consumir carbón suplementario. Al mismo tiempo que se autoriza y recomienda el aumento de las dosificaciones de escorias en el C. P. B. y en el C. H. F., los Poderes Públicos admiten la sustitución de las escorias, en proporciones iguales, por cenizas volantes, cuyas cualidades puzolánicas hayan sido reconocidas en los laboratorios. Para las fábricas de cemento esta fórmula tiene la ventaja de permitir economías y dar flexibilidad a la producción.

En 1957 se utilizaron alrededor de 90.000 toneladas de cenizas volantes para la fabricación de cemento conteniendo del 10 al 20 % de cenizas, en 1958 se alcanzaron las 250.000 toneladas, y, actualmente, se puede valorar en más de tres

millones de toneladas. La aprobación y adopción oficial de la norma C. P. A. C. acentuará este consumo progresivo.

Francia es el único país en el que la explotación comercial de las propiedades puzolánicas de las cenizas volantes se hace a través de los cementeros. En otros países, las mezclas de cenizas y cemento se efectúan únicamente en las obras bajo el control de los constructores o los fabricantes de productos prefabricados; algunas personas comienzan ya a interesarse también por los cementos de cenizas.

Existe cierta reserva en el mercado de estos cementos por parte de personas que no están correctamente informadas del problema, o que prefieren esperar a que las novedades que se les proponen hayan superado todas las pruebas. Hoy ya no parece justificada tal posición a la vista de las pruebas y ensayos realizados, así como de la experiencia obtenida sobre este particular. Como conclusión clara puede confiarse en los cementos de cenizas *para todos los usos corrientes*.

Naturalmente, no es cosa de imponer a los constructores el empleo de estos cementos ni obligar a todos los cementeros

a que los fabriquen. Ningún temor puede haber sobre este punto. Hay fábricas de cemento alejadas de las centrales térmicas y otras situadas cerca de las siderúrgicas y que trabajan desde hace mucho con escorias, para las cuales la adición de ceniza no interesa.

#### Definición del C. P. A. C.

Hemos visto que, según el origen del combustible quemado en las calderas, podemos distinguir:

*Las cenizas volantes de hulla*, constituidas en su mayor parte de sílice y alúmina, con una ligera proporción de cal, que poseen propiedades puzolánicas.

*Las cenizas volantes de ciertos lignitos*, con una proporción elevada de cal, que poseen propiedades hidráulicas.

Recordemos la definición de *propiedades puzolánicas*: es la aptitud de un producto, que sin tener propiedades hidráulicas, es capaz de fijar la cal a cierta temperatura y en presencia del agua (en particular la cal liberada por hidratación del clínker de portland) para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

*El poder hidráulico* es la aptitud de fraguar y endurecer en presencia del agua.

Estos fenómenos se producen tanto bajo el agua como en el aire.

Las propiedades puzolánicas de las cenizas permiten reemplazar, en los morteros y hormigones, una parte del cemento portland que sería necesaria para obtener la resistencia final deseada. En el caso en que el cemento portland no contenga materias puzolánicas, el endurecimiento del hormigón se produce por la hidratación del clínker y la formación de un entramado de cristales y geles de silicatos y aluminatos que rodean los áridos; la cal que queda libre no continúa sus reacciones, salvo en las zonas superficiales donde puede ponerse en contacto con el CO<sub>2</sub> del aire, transformándose en carbonato, sin desaparecer el riesgo de una disolución

progresiva por las aguas de lluvia o por aquéllas en las que se encuentra sumergido el hormigón.

Cuando se trata de un cemento de cenizas, el fenómeno que acabamos de describir representa sólo la primera parte, después de la cual, y con el transcurso del tiempo, la cal queda fijada por los elementos puzolánicos de las cenizas dando lugar a una segunda red de cristalización asociada a agrupamientos de partículas coloidales. Al desarrollarse este segundo sistema se provoca un aumento de las resistencias mecánicas del hormigón y se sitúa la cal liberada al abrigo de influencias nocivas.

Las propiedades puzolánicas de las cenizas pueden ser explotadas, bien mezclando las cenizas al cemento en el momento de su empleo, o bien agregándolas durante la molienda en la propia fábrica.

A pie de obra se pueden hacer las dosificaciones a voluntad, según el empleo particular del mortero u hormigón; siempre después de realizados los ensayos pertinentes, pensando que en general se han de emplear las cenizas tal como se reciben, lo que puede presentar inconvenientes. No olvidemos que la molienda de las cenizas facilita su actividad puzolánica y esta molienda no puede realizarse más que en la fábrica, salvo en los casos de obras de mucho volumen. Con todo, la calidad de la mezcla realizada en fábrica ofrece más garantías.

El retraso en manifestarse el efecto puzolánico, obliga a veces a tomar ciertas medidas en las fábricas para cumplir las exigencias de obra durante las primeras edades del hormigón.

Los ensayos de laboratorio han demostrado que los cementos que contienen hasta un 35 ó 40 % de cenizas dan, después de un tiempo más o menos largo, resistencias superiores o iguales a las obtenidas con cemento puro.

Esta proporción sería la que permitiese explotar al máximo las propiedades de las cenizas. En la práctica, las obras necesitan alcanzar unas resistencias mínimas

durante los primeros días. Por otra parte, la normalización impone ensayos de resistencia a siete y veintiocho días, que son muy difíciles de respetar con estos porcentajes, sin finuras costosas o adición de otras materias. Es por esto por lo que, partiendo del 15 %, la norma AFNOR ha propuesto como definitivo un contenido del 20 % de cenizas volantes para el cemento portland de cenizas C. P. A. C.

#### Garantías que presentan las cenizas volantes.

La introducción de cenizas volantes en los cementos ha planteado un cierto número de problemas por parte de los cementeros; otros, por parte de los constructores llamados a utilizar los cementos de cenizas, así como de los laboratorios encargados por éstos de comprobar la calidad de los productos.

Los problemas de los cementeros eran:

- la comprobación de la actividad de las cenizas puras.

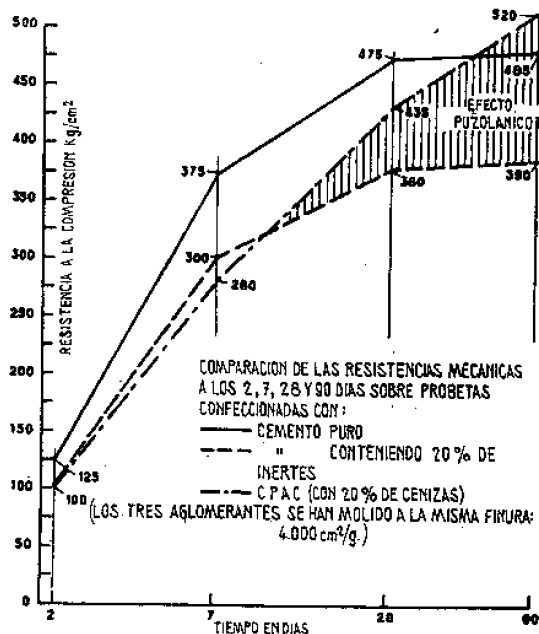


Fig. 2.—Manifestación del efecto puzolánico de las cenizas volantes.

- la garantía de su regularidad desde el punto de vista de la finura y composición química, en particular lo que concierne a la limitación de su contenido en inquemados.

Los problemas planteados a los laboratorios eran:

- la posibilidad de verificar el contenido en cenizas de un cemento.
- y la posibilidad de comprobar la actividad puzolánica de las cenizas contenidas en la mezcla.

Las Empresas se preocupan de saber si el empleo de estos cementos exige precauciones particulares.

El examen de estos diferentes puntos permitirá responder a las personas que se interesan por el papel que desempeñan las cenizas en los cementos.

Para comprobar la actividad puzolánica de las cenizas puras, han sido propuestos varios métodos:

a) El procedimiento que se empleó primero, y que es el único capaz de dar la referencia de base a la cual hay que referir finalmente todos los casos, consiste en comparar, por el método normalizado y dentro de los límites habituales, las resistencias de un cemento de cenizas volantes con las de un cemento portland puro de la misma finura, o con las de un aglomerante que resulte de la mezcla de portland con el mismo porcentaje de un producto conocido como inerte (fig. 2).

Se pueden traducir los resultados obtenidos calculando el coeficiente K de Feret, que es dado por:

$$Kf = Rf \left( 1 + \frac{e}{c} \right)^2$$

Estos ensayos son demostrativos, pero exigen largos plazos.

b) La norma americana y la antigua norma italiana, que llevan consigo pruebas mecánicas a siete y veintiocho días, tienen el mismo inconveniente y no dan la misma referencia de base, por lo que

se separan de las condiciones reales de empleo.

c) Una prueba más rápida ha sido propuesta por M. Chapelle: *medida de la cantidad de cal fijada al cabo de dieciséis horas* de ebullición de un gramo de cenizas y un gramo de cal en agua. Hay que tomar algunas precauciones para proteger la cal contra el carbónico del aire. Este ensayo es satisfactorio desde el punto de vista cualitativo y da valores que oscilan del 18 al 30 %. La única objeción en contra es que no ha sido admitido oficialmente.

d) La aplicación a las cenizas del método descrito en la norma P 15-301 para la *determinación de insolubles* en los cementos (tratamiento por CIH en caliente después de la fusión de los residuos con  $\text{CO}_2\text{Na}_2$ ) permite poner en evidencia rápidamente que las cenizas no son inertes.

Puede también emplearse la determinación de los insolubles en sosa caliente, prevista por la nueva norma A. S. T. M.

#### Garantía de regularidad.

Una vez reconocida la calidad de una muestra, los cementeros se preocupan de recibir regularmente las cenizas que respondan a las mismas características.

A petición de los fabricantes que utilizan las cenizas aprovechando su acción puzolánica, los americanos han tratado de definir las especificaciones que deben respetar los productos. Los diversos organismos americanos interesados no están de acuerdo a este respecto. Se encuentran cifras poco concordantes entre ellos mismos: fijan los límites inferiores del total de sílice + alúmina en 50-60 %; los límites superiores de contenido en cal 6 % y los contenidos en magnesia y azufre inferiores al 3 %. En estas especificaciones figuran un límite inferior de finura y de peso específico.

En lo que respecta a los inquemados, los americanos prevén, según los casos, menos del 12 % o menos del 7 %. Será

conveniente precisar algunos puntos a este respecto:

— los inquemados son absolutamente inertes;

— dan un cemento de color más oscuro;

— contribuyen a aumentar ligeramente el agua necesaria para el mortero de consistencia normal; si se toma la dosificación en volumen en lugar de la de en peso, este aumento es más notorio.

— Se ha emitido la hipótesis de que podían tener una acción nociva sobre el hormigón. Teóricamente no se explica fácilmente y en la práctica no se ha observado nunca. Y puesto que hemos tomado a los romanos como guías sobre el efecto puzolánico, podríamos también inspirarnos en su experiencia sobre este tema; según parece, al mismo tiempo que utilizaban la puzolana o el ladrillo molido, amasaban su argamasa con sangre de los cautivos y harina de cereales; estas materias orgánicas no parecen haber tenido influencias nefastas sobre la durabilidad de las edificaciones.

— Los americanos que han hecho uso de las cenizas declaran que prefieren tener de 10 a 12 kg de inertes de más por metro cúbico de hormigón, siempre que queden de 100 a 140 kg de cal soluble de menos.

— En resumen, sólo con el fin de evitar los inertes es por lo que los cementeros tienen preferencia por las cenizas con menos del 5 % de inquemados.

Gracias a las experiencias obtenidas desde algunos años a esta parte, se admite la estabilidad de la composición de las cenizas suministradas por una misma central o por centrales que consuman carbones de una misma cuenca hullera. Prácticamente, las cenizas de centrales diferentes pertenecientes a la misma cuenca se comportan de manera extremadamente análoga. Las diferencias entre los cementos de cenizas provienen, en gran parte, de las disposiciones particulares adoptadas por las fábricas de cemento en lo que se refiere a la fabricación

del clinker, molturación de los constituyentes principales y adiciones especiales.

**Identidad del comportamiento de las cenizas volantes de orígenes vecinos con diversos clinker.**

De los ensayos realizados, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

— Todas las cenizas se comportan de un modo muy parecido con cada clinker; en particular, no son apreciables las diferencias entre cenizas cuyos contenidos en inquemados están comprendidos entre 0,5 y 3,5 %.

— *El cemento, que da en estado puro las menores resistencias, parece ser el más indicado para aprovechar la acción de las cenizas.*

— Para las mezclas de dos clinker distintos con las mismas cenizas, se obtienen resistencias muy superiores a la norma, lo que indica que no es necesario llevar la finura hasta los 4.000 Blaines y puede bastar con 3.000.

— *La acción de las cenizas comienza a manifestarse de un modo claro a partir de los veintiocho días.*

Se había planteado otra cuestión: la de la garantía de una producción reciente. Los ensayos comparativos que se realizaron a este respecto no han manifestado ninguna variación.

**Lo que depende de los cementeros.**

Todos los resultados de experiencias publicados por los laboratorios oficiales o privados, las indicaciones dadas por los que explotan centrales sobre las características medias o límites de sus productos y la normalización del cemento portland C. P. A. C., no dispensan a los cementeros de tomar ciertas disposiciones particulares en la fabricación de los cementos de cenizas. Los problemas que deben resolverse son:

— *La elección de los productos, el siste-*

ma de comprobación de las características estimadas como importantes.

— *Las dosificaciones* adoptadas para las cenizas, los clinker y, en todo caso, de otros constituyentes.

— *La finura de la mezcla* o las finuras particulares del clinker y de las cenizas, si el molido se hace por separado, y la manera de conseguir la intimidad de la mezcla.

Las decisiones adoptadas dependen de las características del clinker que habitualmente se produce en la fábrica.

Todo esto demuestra que la puesta en marcha de la producción de cemento de cenizas en fábrica de cemento, exige una preparación. Por otra parte, hay otras cuestiones materiales importantes que deben ser tratadas: hay que adquirir nuevos equipos y aportar ciertos accesorios a las instalaciones existentes. Será necesario:

— Comprar o alquilar camiones-cisternas para el transporte de las cenizas (pueden servir los camiones destinados al transporte del cemento a granel).

— Construir silos para el almacenaje de las cenizas y del nuevo cemento.

— Instalar dispositivos de alimentación, dosificación y molienda.

La adaptación de las fábricas se hará progresivamente; en general, en la medida que la demanda lo exija. Es decir, que el desarrollo del cemento de cenizas irá unido muy de cerca al desarrollo de la economía del país.

*La información de los clientes* está asegurada normalmente por las indicaciones impresas en los sacos; no obstante, puede ser útil acompañarlas por algunos comentarios transmitidos por el representante de la fábrica de cemento al suministrar el nuevo producto, aunque no sea más que para explicar el diferente color del cemento. Cada uno trata de saber dónde va. Cuando en una operación corriente se introduce un factor nuevo, puede resultar necesario aportar también algunas modificaciones en las condiciones accesorias de

la puesta en obra, y es muy razonable que el usuario pida instrucciones precisas sobre el caso.

Desde el punto de vista práctico, el usuario del cemento de cenizas tiene *necesidad de conocer* los siguientes puntos:

— Hay un *problema de color*: el color gris es apreciado algunas veces, pero no se puede cambiar de cemento en medio de una fachada.

— Los cementos de cenizas son de *endurecimiento más lento* que los portland normales de la misma granulometría. En la mayoría de los casos, salvo en presencia de otras materias minerales, el efecto puzolánico no se hace sentir en los siete primeros días. Según la finura, comienza a manifestarse entre los siete y noventa días; para 3.000 a 4.000 Blaines, alrededor de los veintiocho días. Para respetar la condición de resistencia a siete días exigido por las normas, los cementos de cenizas fabricados con ciertos clínkeres son molidos más finos que los cementos portland ordinarios; para otros, que tienen de por sí un margen inicial suficiente, no es necesario porque el retraso inicial es recuperado, es decir, el crecimiento de las resistencias es más rápido que para el portland normal. En una obra es la resistencia final la que cuenta; se tiene la costumbre de apreciar los cementos portland según sus condiciones corrientes de evolución. Con los cementos de cenizas será necesario adquirir nuevos hábitos y saber que a partir de las resistencias observadas a siete y veintiocho días se pueden esperar más a noventa y doscientos días que lo que se obtendría para las mismas cifras con el cemento portland artificial.

Las resistencias a dos y siete días tienen importancia para el constructor que desea un desencofrado rápido sin riesgo de accidentes; pero, sin embargo, es bastante raro que se haga en las primeras horas y el volver a alcanzar el 20 % de las resistencias a los dos días es cuestión de horas. El efecto de una pequeña diferencia de temperatura puede ser mucho más importante.

Se hacen también cementos de altas re-

sistencias iniciales (H. R. I.) de cenizas: todo es cuestión de finura y dosificación.

— Al ser un *poco más ligeros*, ocupan mayor volumen a medida que aumenta el porcentaje de cenizas.

— Los cementos de cenizas tienen tendencia, incluso molidos muy finos, a dar una *retracción más baja* que los cementos ordinarios fabricados con el mismo clínker. Los ensayos realizados por el CERILH dieron resultados muy claros, pero las medidas sobre los cementos comerciales son todavía poco numerosas. Estos ensayos demuestran de una manera regular que un cemento de cenizas, aun molido finamente, no hace temer un aumento de retracción, sino que, por el contrario, da una retracción inferior a la del portland fabricado con el mismo clínker. No obstante, algunos cementos de cenizas pueden dar retracción superior a la de cementos puros procedentes de otros clínkeres.

— Al contener menos cal susceptible de ser disuelta, en los casos de obras expuestas a las aguas agresivas, la presencia de las cenizas aporta una *garantía de durabilidad* mayor que el portland normal (C. P. A.). Parece que esta ventaja puede hacerse extensiva a las atmósferas agresivas de las regiones industriales.

Sin embargo, el cemento con el 20 % de cenizas no contiene suficientes elementos puzolánicos para fijar la totalidad de la cal; por eso, no da seguridad plena en presencia de aguas agresivas. Es necesario llegar al 35 % para absorber toda la cal. No obstante, el cemento de cenizas (C. P. A. C.) representa, desde este punto de vista, un progreso con relación al portland normal (C. P. A.) o al cemento de escorias (C. P. A. L.).

— Al tener un calor de hidratación relativamente bajo, los cementos de cenizas *son más sensibles a efecto de aceleración de endurecimiento por el calor*; en particular, la resistencia a la tracción resulta muy mejorada.

Sobre la resistencia a las heladas se han realizado algunos ensayos con los cementos de cenizas; al principio, es decir, has-

ta que se manifiesta el efecto puzolánico, se comportan como los cementos que contienen inertes y, por lo tanto, son algo más sensibles que los cementos portland normales. Al llegar a alcanzar de uno a tres meses de edad, la resistencia a los hielos mejora notablemente y sobrepasa la de los cementos ordinarios.

Con el tiempo, todas estas indicaciones entran en el dominio de los conocimientos corrientes que poseen los usuarios del cemento.

#### Comprobación de las dosificaciones.

Los laboratorios se han preocupado de la posibilidad de comprobar sobre los cementos comerciales la cantidad de cenizas incorporadas y la calidad puzolánica del producto de adición, con el fin de poder advertir a los encargados de obra.

— El laboratorio de la Villa de París propuso soluciones elegantes para los dos problemas:

a) *La medida de los insolubles permite una dosificación aproximada, siempre que las cenizas empleadas posean características análogas a las que conocemos actualmente.*

b) *La comparación de los insolubles, antes y después de la cocción de la muestra de cemento a 1.000°C durante una hora, demuestra la actividad del constituyente secundario.*

— Se puede también aplicar la medida de los insolubles, *de una parte, según la norma y, de otra parte, prolongando la acción del CIH en caliente durante una hora.* Si se obtienen cifras notablemente diferentes, se llega a la conclusión de que el producto de adición contenido en el cemento es muy activo químicamente.

— La aplicación de la *nueva norma italiana* permite también juzgar si al cemento propuesto se le ha agregado, o no, puzolana. El método consiste en representar sobre un gráfico los contenidos en cal y en álcalis de una solución obtenida manteniendo en estufa a 40°C durante siete

días una muestra del cemento a ensayar en suspensión acuosa. Esta norma proporciona la ocasión de hacer observaciones interesantes, resaltando el carácter particular de las mezclas de 35-40 % de cenizas.

#### Perspectivas para el porvenir.

Las pruebas realizadas hasta hoy demuestran que los cementos C. P. A. C. son de calidad satisfactoria, y de empleo corriente sin historia. Al menos no ha sobrevenido, según los conocimientos del autor, ningún contratiempo en su puesta en obra, salvo, en un pequeño número de casos, en lo que concierne a las variaciones de color.

Admitiendo que el C. P. A. C. es equivalente al C. P. A., en lo que concierne a su puesta en obra, hay que considerar que su fabricación va unida solamente a problemas de oportunidad, la cual cesaría si desapareciesen las razones de su puesta en el mercado.

El autor cree que, por el contrario, a medida que su empleo se hiciese más corriente se encontrarían más razones para crecer en su estima.

Se podrían hacer reproches sobre las cualidades atribuidas a los cementos de cenizas de ser teóricas o, sobre todo, estar basadas en resultados de laboratorio. Es bien sabido que las condiciones de puesta en obra y de envejecimiento de los materiales en el laboratorio y en la obra no son nunca idénticas; lo que nos interesa, en último término, son los resultados que corresponden a los trabajos realizados en las condiciones reales. Desgraciadamente, las obras están dotadas rara vez de medios de observación científica y de medida—en todo caso sus comprobaciones no se publican con frecuencia—y, no parece que, hasta ahora, los centros de ensayos de la construcción se hayan ocupado en experiencias sistemáticas de larga duración sobre los comportamientos comparados de hormigones ejecutados con diferentes clases de aglomerantes o áridos sometidos a condiciones de exposición variadas: intemperie, agua del mar, atmósfe-

ras de regiones industriales, etc. Estos ensayos, que darían indicaciones muy útiles, valdría la pena que se emprendieran. Es posible que, en el porvenir, otros aglomerantes hidráulicos, además de los cementos puzolano-metalúrgicos Fouilleux y los cementos portland con el 20 % de cenizas, exploten el poder puzolánico de las cenizas con variación en las dosificaciones, finuras de molido y adiciones complementarias. El autor piensa en particular en los cementos de 35 % de cenizas. Están actualmente en curso estudios sobre este tema.

La idea de utilizar gérmenes de cementos hidratados para acelerar el endurecimiento de los cementos de cenizas, en particular de los cementos de alto contenido en cenizas, fué emitida por M. Duriez; esta idea parece interesante, pero es demasiado pronto para poder juzgar sobre su aplicación.

#### OBSERVACIONES Y CONCLUSION

Muchas indicaciones que contiene esta exposición habrían extrañado si hubieran sido publicadas hace tres o cuatro años. La construcción es una de las ramas de la técnica que posee tradiciones consagradas por la prueba del tiempo; las novedades se acogen con desconfianza y deben de sufrir períodos de prueba.

Gracias a las experiencias realizadas con éxito, las cenizas han comenzado a ser admitidas gradualmente como un desecho con posibles utilidades.

El autor hace recordar que los resultados obtenidos hasta hoy en Francia para la utilización de las cenizas volantes, constituyen el fin de numerosos esfuerzos convergentes: en primer lugar, la documentación y ejemplos del extranjero—aunque en materia de cementos de cenizas se encuentren hoy más avanzados que ellos—; después, las investigaciones y ensayos

realizados en los laboratorios franceses públicos y privados, cuyos directores y personal merecen que se les reconozca su contribución. Asimismo, deben ser felicitados los miembros de los Organismos administrativos, que han confiado en las demostraciones de los técnicos y los han apoyado; y las Empresas, que han aceptado con buena voluntad hacer las primeras aplicaciones.

La explotación de las propiedades químicas de las cenizas volantes como adición al clinker del portland, permanecerá en el futuro como su empleo más noble. Es posible que no será un campo suficiente para absorber la totalidad de cenizas disponibles, pero es de esperar que, al conocer mejor sus propiedades físicas, se empleen cantidades crecientes, asociadas con arenas, gravas y aglomerantes hidrocarbonados, en trabajos de carreteras y fábricas de hormigón prefabricado.

Adición, sustitución, asociación, son palabras que señalan la vocación de las cenizas volantes al intervenir en una mezcla. Que actúen en forma de aglomerante, árido o filler, siempre tienen el carácter de material complementario, del que se puede disponer para mejorar, corregir o reemplazar económicamente, en proporciones variables, a los elementos tradicionales.

Dada la gran evolución de métodos y materiales que ha surgido en las industrias de la construcción, parece razonable pensar que las cenizas volantes encontrarán un sitio adecuado, sobre todo en las cercanías de las centrales eléctricas donde las ventajas suplementarias de un recurso local justifican algunos esfuerzos de adaptación.

Las aplicaciones de las cenizas volantes no se extienden a altas consideraciones científicas, corresponden más bien a problemas prácticos.

F. S. S.