

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción a las cenizas volantes

La *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define puzolana como un material silíceo o silíceo-aluminoso que posee en sí mismo una pequeña proporción o no posee propiedades cementicias, pero que en una mezcla reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) para formar compuestos con propiedades cementicias.

Las cenizas volantes son un residuo producido por la combustión de carbón en las centrales térmicas que se recogen en precipitadores electrostáticos que luego se llevan a grandes silos para su posterior transporte.

2.2. Tipos de cenizas volantes

2.2.1. Clase F

Se puede obtener en grandes cantidades. Se produce en la combustión de antracita o lignito. Generalmente contiene pequeñas cantidades de cal (normalmente inferior al 15%) y una superior combinación de sílice, aluminio y hierro que la clase C.

Modera eficientemente el calor de hidratación del hormigón durante el curado y, por lo tanto, se considera como un material cementicio para el hormigón en masa y para mezclas de alta resistencia. Por este motivo, se trata de la solución para un amplio rango de problemas de hormigonado durante el verano. Además proporciona una gran resistencia a los sulfatos y, por ello, se recomienda para usos donde el hormigón estará expuesto a iones de sulfato en suelos y a aguas subterráneas.

2.2.2. Clase C

Proviene de la combustión de lignito, que es aquel tipo de carbón que produce cenizas volantes con una cantidad superior de cal (normalmente superior al 15%, y a menudo hasta un 30%).

Se utiliza en aquellos casos en los que se requiera altas resistencias iniciales, como por ejemplo en hormigón pretensado. También se prefiere en estabilización de suelos, ya que la clase C puede no requerir a adición de cal.

2.3. Comparación química entre las cenizas volantes y el cemento Pórtland

La composición química entre las cenizas volantes es muy similar a la del cemento Pórtland. Esto se puede ver a partir de los valores de la tabla 1 donde se representa los análisis realizados a los dos tipos básicos de cenizas volantes respecto al cemento Pórtland habitual.

Tabla 1. Composición química cenizas volantes-cemento

Componente químico	Cenizas volantes (clase F)	Cenizas volantes (clase C)	Cemento Portland
SiO	54.90	39.90	22.60
Al ₂ O ₃	25.80	16.70	4.30
Fe ₂ O ₃	6.90	5.80	2.40
CaO	8.70	24.30	64.40
MgO	1.80	4.60	2.10
SO ₃	0.60	3.30	2.30
Na ₂ O & K ₂ O	0.60	1.30	0.60

En esta tabla se puede ver que:

- ✓ Existen los mismos componentes en las cenizas volantes que en el cemento Pórtland, pero se distinguen en que, mientras en las cenizas volantes son amorfos (debido a un rápido enfriamiento), en el cemento son cristalinos (debido a un más lento enfriamiento).
- ✓ La diferencia principal es la cantidad relativa de cada uno de sus componentes. Mientras el cemento Pórtland es rico en cal, las cenizas volantes no lo son tanto. Por el contrario, las cenizas volantes contiene altas cantidades de silicatos reactivos que en el cemento son pequeñas.

Una mezcla entre ambos componentes provoca un mejor producto de hormigón realizando las propiedades de ambos.

La reacción que se produce se puede ver en las figuras 2, 3 y 4, obtenidas de Sear [1] que se muestran a continuación:

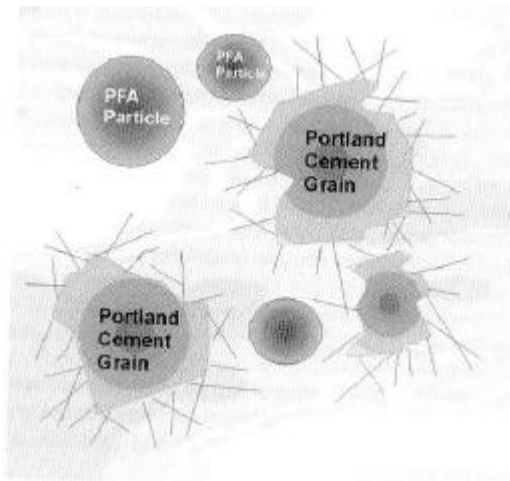


Figura 2. Proceso de hidratación cemento + cenizas (1)

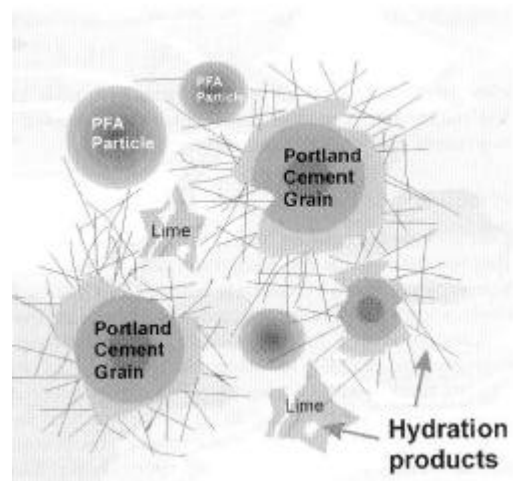


Figura 3. Proceso de hidratación cemento + cenizas (2)

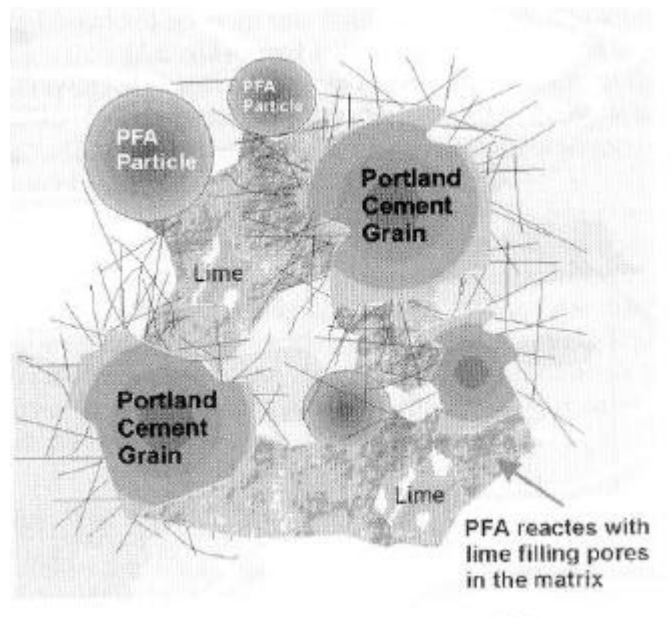
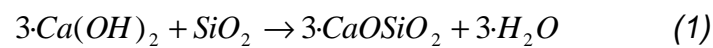


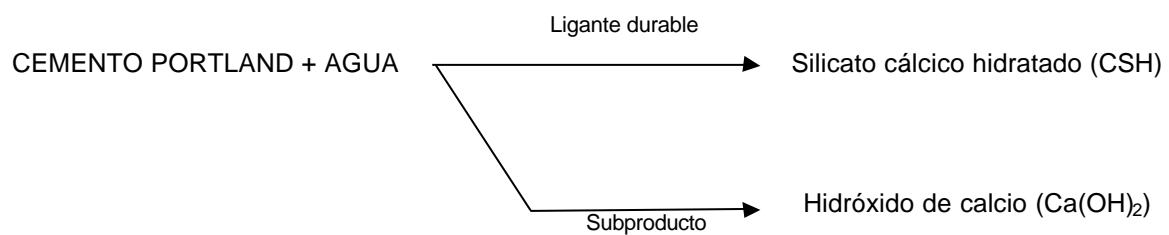
Figura 4. Proceso de hidratación cemento + cenizas (3)

Y la reacción que gobierna este comportamiento es la siguiente:

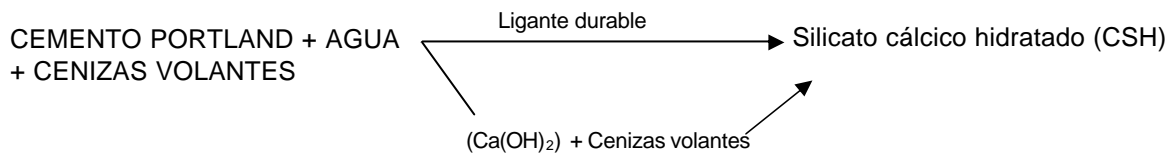


Hidratación de diferentes ligantes cementicios:

Cemento Pórtland:



Cemento Pórtland con cenizas volantes:



Así pues, mediante la actividad puzolánica, las cenizas volantes se combinan con la cal para producir los mismos componentes cementicios que se forman con la hidratación del cemento Pórtland.

2.4. Propiedades de las mezclas cementicias con cenizas

La incorporación de cenizas volantes reduce en general la demanda de agua, mejora la trabajabilidad y reduce la segregación. Los beneficios asociados a las cenizas volantes pueden propiciar la reducción de la relación agua/cemento manteniendo la trabajabilidad según Malhotra et al. [3].

2.5. Resistencia de mezclas con cenizas volantes

2.5.1. Resistencia a compresión

La resistencia obtenida por el cemento Pórtland se consigue rápidamente en edades tempranas (hasta los 7 días), después de los cuales, se reduce notablemente. Por otro lado, la resistencia conseguida por las cenizas volantes se consigue como consecuencia de la actividad puzolánica que provoca la combinación de las cenizas volantes con el hidróxido cálcico generado por la hidratación del cemento, como apunta Chindaprasirt et al. [2].

El hormigón fabricado con cenizas volantes del tipo C consigue mayores resistencias iniciales porque contiene su propia cal, que permite que la actividad puzolánica pueda empezar antes. Con el paso del tiempo, el comportamiento de ambos tipos de cenizas volantes es muy semejante produciendo mayores resistencias que el hormigón convencional para edades de 56 y 90 días, según Malhotra et al. [3].

Uno de los factores que más inciden en la resistencia a compresión del hormigón con cenizas volantes es la granulometría de las cenizas. Así, una granulometría gruesa de cenizas desarrolla la resistencia a edades más avanzadas que una granulometría fina. También se ha demostrado en numerosos estudios [4], [5], [6] y [7] que la resistencia a compresión depende del tamaño de partícula medio de manera que a medida que éste aumenta, la resistencia disminuye.

2.5.2. Resistencia a flexotracción

En general, existe una relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexotracción en el hormigón, por este motivo, aquel hormigón que posea una mayor resistencia a compresión, tendrá consecuentemente una mayor resistencia a flexotracción. A pesar de ello, en muchas ocasiones, la resistencia a flexotracción del hormigón con cenizas volantes ha presentado mayores valores que el hormigón convencional aún y tener la misma resistencia a compresión [8].

2.6. Hormigón de alta resistencia

Después de añadir una cierta cantidad de cemento a una mezcla, la adición de cenizas volantes provoca normalmente un aumento de la resistencia superior a la misma cantidad de adición de cemento [8].

2.7. Uniformidad

El uso de las cenizas volantes provoca generalmente una variabilidad de resultados inferior. Esto genera una reducción en el sobredimensionamiento, hecho que supone un ahorro directo para la producción de hormigón [8].

2.8. Dosificación en hormigón con cenizas volantes

A pesar de que las cenizas volantes es un material cementicio que beneficia al hormigón, su dosificación requiere unos ciertos ajustes debido a las propiedades físicas de las cenizas. Microscópicamente, se trata de partículas de forma esférica, consecuentemente y debido a otras propiedades de las cenizas, podemos esperar lo siguiente [2]:

- ✓ Su forma esférica ayuda a la trabajabilidad del hormigón. Esto permite reducir la cantidad de arena, manteniendo la trabajabilidad.
- ✓ Por el mismo motivo se puede reducir la cantidad de agua para conseguir el mismo descenso. Normalmente se reduce de un 5 a un 10% respecto al hormigón convencional.
- ✓ El peso específico de las cenizas volantes es muy inferior al del cemento, y consecuentemente, el volumen de las cenizas volantes es superior al del mismo peso de cemento. Esto se traduce en que en el hormigón con cenizas volantes el volumen del material cementicio es mayor, mejorando el proceso de acabado.

2.9. Determinación de la cantidad de cenizas volantes

Existen diferentes métodos para la determinación de la cantidad de cenizas volantes [8] y [9]:

2.9.1. Especificación

Las especificaciones de un determinado proyecto pueden definir la cantidad de cenizas volantes, desde un 10 a un 50 o 60% dependiendo de la intención del proyectista. Normalmente está limitado a un 25% en la mayoría de aplicaciones del hormigón.

2.9.2. Curvas de cantidad óptima de cenizas

Se trata de fabricar mezclas con diferentes cantidades de cenizas y representar los resultados de las diferentes resistencias. Así, en el eje X, se representa la cantidad de cemento y su correspondiente resistencia en el eje Y. Se representa una curva diferente para cada edad del ensayo. La determinación de la dosificación óptima se obtendrá a partir de estas curvas donde se podrá observar qué porcentaje de cenizas proporciona mayor resistencia que una mezcla de control.

2.9.3. Curvas de relación agua-material cementicio

El objetivo de este método es fabricar una familia de curvas representadas conjuntamente donde cada curva indica un porcentaje de cenizas volantes sobre el peso total de material cementicio.

Una variante de este método es el llamado *Método del valor K* en el cual se supone que el uso de cenizas volantes es “k” veces tan efectivo como la misma masa de cemento en cuanto al desarrollo de la resistencia, propiedades ingenieriles y la durabilidad. La cantidad efectiva de cemento para utilizar en el cálculo del mínimo contenido de “cemento” y la máxima relación agua/cemento se calculará a partir de $c + k \cdot f$, donde c es la cantidad de cemento y f es la cantidad de cenizas. Se puede utilizar cualquier tipo de cemento, pero el concepto del valor k no es aplicable cuando las cenizas volantes es una parte del cemento. En el caso anterior se estaba considerando un valor de k de 1.0.

Los valores de k se pueden calcular para muchos aspectos del funcionamiento pero es habitual utilizarlos para la resistencia. Estos valores para la resistencia oscilan entre 0 y 0.8 (Smith 1967; Wesche et al., 1984; Schiessl and Härdtl, 1991; INTRON, 1992; Dhir et al., 2000), en función de la finura, la pérdida por ignición y el contenido en la mezcla. Según la EHE este valor no debe ser superior a 0.3, aunque en edificación se puede adoptar un valor de 0.4 o incluso superior si se acompaña de un estudio que lo justifica.

Este método es muy fácil de utilizar, pero es cuestionable un único valor de 0.3 de k utilizable para la mayoría de cenizas volantes. Además, los valores de k basados en la resistencia no serán necesariamente los mismos que para la mayoría de aspectos de durabilidad.

2.9.4. Método de sustitución

Este método parte del uso de una mezcla convencional que ha demostrado un buen funcionamiento. Los ensayos de sustitución se hacen a partir de series de mezclas con cenizas volantes desde un 10 a un 30% o más. Para obtener las mismas resistencias a 28 días que la mezcla inicial, será necesario sustituir el cemento excediendo la relación 1:1. Esto se puede obtener experimentando con mezclas diseñadas con relaciones de sustitución de 1:1, 1:1.1, 1:1.2, etc.

Según los estudios recogidos por Oner et al. [9], se ha demostrado que para conseguir la misma resistencia en hormigones de entre 3 y 28 días de edad, la cantidad de cenizas volantes añadidas debe ser superior a la del cemento sustituido. En este estudio se obtiene la cantidad de cenizas volantes óptima de otra manera. Se basa en las ecuaciones de Bolomey y Feret de resistencia para obtener la cantidad de cemento equivalente para la cantidad óptima de cenizas.

Este estudio, concluye con la tesis que la resistencia aumenta a partir del aumento de la cantidad de cenizas volantes hasta un valor óptimo, a partir del cual, la resistencia empieza a descender. El valor óptimo de las cenizas volantes, a partir de los ensayos realizados, se encuentra cerca del 40% de cemento y que uno de los factores determinantes para la eficiencia de las cenizas volantes es la relación cenizas/cemento.

2.10. Mejora de la trabajabilidad

Los defectos en el hormigón, llamados coqueras, son indicadores de un hormigón sin suficiente trabajabilidad, aunque la consistencia medida sea aceptable. Las coqueras indican una separación de la pasta respecto el árido grueso en la mezcla del hormigón. El hormigón debe mantener su homogeneidad y evitar la segregación. Las cenizas volantes son capaces de dar esta propiedad sin ningún coste adicional [2].

2.10.1. Reducción del agua de conveniencia

Según Abdón-Nur [10], se necesitan aproximadamente 25 litros de agua para hidratar 100kg de cemento. Una mezcla normal de hormigón tendrá generalmente el doble de la cantidad de agua para hidratar el cemento para facilitar la trabajabilidad y colocación del hormigón. Esta agua "extra" se llama agua de conveniencia y aumenta el descenso del cono de Abrams a costa de una disminución de la adhesividad. El agua de conveniencia se reduce gracias a la adición de cenizas volantes porque su acción plastificante reduce de un 2 a un 10% la cantidad de agua necesaria para producir el mismo descenso que el hormigón convencional.

El peso específico de las cenizas volantes es inferior al del cemento. Esto se traduce en que la adición de cenizas volantes produce en el hormigón un mayor volumen de materiales cementicios que, en sí mismo, mejora la adhesividad y la trabajabilidad.

2.10.2. Mezcla económica

No existe ningún otro material sólido que mejore la trabajabilidad, resistencia y otras propiedades de la mezcla como las cenizas volantes, resultando las mezclas más económicas.

De acuerdo con los resultados de Chindaprasirt [2], la demanda de agua disminuye con el aumento del contenido de cenizas volantes. La incorporación de las cenizas a la mezcla de mortero también reduce el tiempo de endurecimiento, lo que puede ser especialmente beneficioso en los climas tropicales cálidos.

Además también se puede observar la existencia de una relación lineal entre la relación agua/cemento y la fluidez en los morteros analizados. Así, en función del objetivo del mortero, se puede obtener directamente la cantidad de agua necesaria. Consecuentemente a este estudio, se puede decir que la adición de cenizas volantes de tipo F puede producir un mortero de albañilería ya que se reduce la cantidad de agua necesaria y se mejora la trabajabilidad además de reducir la cantidad de agua retenida.

2.11. Reducción de la permeabilidad

Las cenizas volantes aumentan los componentes cementicios, minimizan la demanda de agua y reducen los poros, cosa que permite aumentar la densidad del hormigón [6]. Estos factores producen un hormigón de baja permeabilidad y con pocos huecos internos. También se aumenta la durabilidad, favoreciendo la resistencia al hielo-deshielo y la desintegración del ataque de los ácidos, sales o sulfatos.

Las cenizas volantes ayudan a la permeabilidad y a la durabilidad en cinco sentidos:

- ✓ Por medio de la actividad puzolánica, las cenizas volantes se combinan químicamente con agua y la cal formando componentes cementicios adicionales que producen un hormigón más denso y con mayor resistencia.
- ✓ La conversión de la cal soluble en componentes cementicios reduce la cantidad de poros de entrada de agua.
- ✓ Al mismo tiempo, la reacción química reduce la cantidad de cal susceptible de ser atacada por ácidos débiles, sales o sulfatos.
- ✓ La densidad del hormigón se aumenta por las pequeñas y finas partículas de cenizas volantes que actúan como micro-áridos que se pueden colocar en los más pequeños huecos del hormigón.

- ✓ Las cenizas volantes provocan un efecto lubricante que reduce la cantidad de agua demandada (del 2 al 10%). Esta reducción disminuye la cantidad de huecos internos.

2.12. Durabilidad

La influencia de las cenizas volantes en las propiedades de durabilidad del hormigón se produce en los siguientes aspectos [8]:

2.12.1. Aumento de la resistencia a los sulfatos

El ataque por sulfatos es un proceso que se produce en 2 fases:

- a) Los sulfatos se combinan con la cal generada durante la hidratación para formar silicato cálcico. El volumen de este compuesto es mayor que la suma de sus componentes causando presiones internas y expansiones que fracturan el hormigón.
- b) Los compuestos de aluminio del cemento Pórtland reaccionan químicamente con los sulfatos y el calcio para formar un compuesto llamado etringita que destruye el hormigón de la misma manera que en la fase anterior.

Las cenizas volantes reducen efectivamente este deterioro por sulfatos de tres maneras:

- a) Las cenizas volantes se unen a la cal para formar compuestos cementicios que no son susceptibles de la reacción de los sulfatos.
- b) La actividad de las cenizas volantes reduce la permeabilidad del hormigón, dificultando la penetración de los sulfatos.
- c) Sustituyendo una parte del cemento Pórtland con cenizas volantes se reduce la cantidad de aluminatos reactivos necesarios para la reacción con los sulfatos.

La Pórtland Cement Association (PCA) concluye que el uso de cenizas volantes del tipo F mejora la resistencia a los sulfatos mientras que la Clase C son menos efectivas y pueden incluso acelerar el deterioro.

2.12.2. Reducción de la reacción álcali-árido

La presencia de sílice reactiva en los áridos, reaccionará con los álcalis solubles presentes en el hormigón causando una lenta expansión.

Para evitar esto se ha normalizado el uso de cemento bajo en álcalis a pesar de no haberse mostrado efectivo con el paso del tiempo.

Incluyendo las cenizas volantes de clase F se reduce esta reacción protegiendo el hormigón del deterioro que sigue a la expansión. Para controlar dicha expansión se requerirían mayores cantidades de cenizas del tipo C.

La reducción de la reacción álcali-árido es debida al hecho que las cenizas de clase F reaccionan químicamente y absorben los álcalis del cemento haciendo que no puedan reaccionar luego con el árido reactivo.

2.12.3. Aumento de la resistencia al hielo-deshielo

El deterioro debido al hielo-deshielo empieza cuando el agua entra por los poros en el hormigón. Lixiviando la cal se produce la hidratación del cemento Pórtland, provocando mayores huecos que el agua puede ocupar. Cuando se congela, el agua se expande en volumen un 9%, generando altas presiones.

Esta altísima presión excede la capacidad de resistencia del hormigón deteriorándolo y creando más caminos por donde el agua pueda entrar resultando en una mayor desintegración con el paso de los ciclos hielo-deshielo.

Las cenizas volantes aumentan la resistencia al hielo-deshielo en 5 sentidos:

- 1) Las cenizas volantes se combinan con la cal para producir componentes cementicios adicionales, reduciendo la cantidad de cal que puede ser lixiviada del hormigón. Esta lixiviación es la que produce los huecos del hormigón que pueden acelerar el deterioro del hielo-deshielo. Consecuentemente la permeabilidad y la porosidad también se reducirán.
- 2) Las cenizas volantes pueden llenar los minúsculos vacíos que ninguna otra parte de la mezcla puede llenar, creando un hormigón más denso y menos absorbente.
- 3) Las cenizas volantes reducen la cantidad de agua demandada debido a la forma esférica de sus partículas que reducen los canales y los huecos, dificultando así la entrada de agua.
- 4) Las cenizas volantes mantienen una suave distribución del aire entrado a través del efecto plastificante producido.
- 5) Las cenizas volantes producen resistencias a compresión superiores a largo plazo que hace que puedan resistir las fuerzas debidas al hielo-deshielo.

2.12.4. Entrada de cloruros

El uso de cenizas volantes mejora el comportamiento del hormigón en ambientes con cloruros. Para una misma resistencia el hormigón de cenizas volantes no presenta ningún efecto destacable de finura o pérdida por ignición en la resistencia a la entrada de cloruros. En consecuencia, todos los productos con cenizas volantes pueden ser expuestos a ambientes con cloruros.

2.12.5. Carbonatación

A partir de recientes estudios con diferentes hormigones con diferentes cantidades de cenizas, se ha demostrado que la pérdida por ignición y la finura de las cenizas volantes no influyen en la carbonatación del hormigón.

2.12.6. Resistencia a la abrasión

Algunos estudios han indicado que el correcto curado del hormigón con cenizas volantes finas (3.5-13.5% retenido en el tamiz de 45µm) produce una mejora menor a la resistencia a la abrasión que aquél conseguido utilizando cenizas volantes más gruesas (35% retenido).

2.13. Hormigón bombeado

El hormigón bombeado debe estar diseñado para pueda ser fácilmente conducido bajo presión a través de una tubería rígida o flexible y descargarla directamente hasta el lugar deseado. Gracias a las propiedades de las cenizas volantes, se puede conseguir un hormigón bombeable manteniendo sus propiedades y controlando los costes [8].

2.14. Material de relleno de densidad controlada

El material de relleno de densidad controlada es un material de relleno diseñado ingenierilmente autonivelante y autocompactable. Se trata de un material que se puede colocar en prácticamente cualquier lugar y que se puede obtener en prácticamente cualquier lugar.

Los materiales necesarios para la producción de este material son los mismos utilizados que en la producción del hormigón con cemento Pórtland:

Cemento Pórtland ? necesario para producir la acción cementicia a la mezcla.

Cenizas volantes ? la clase F se utiliza como agente para producir mezclas que puedan fluir grandes distancias sin segregación.

Árido ? el mismo que se pueda utilizar en otras mezclas.

Adiciones ? normalmente restringido a los aireantes, pero se puede incluir algún reductor de agua.

2.15. Pavimentos de hormigón

Los romanos ya utilizaban habitualmente las cenizas de los volcanes del monte Vesubio para unir las piedras del pavimento en sus caminos. Algunos de ellos todavía se pueden ver.

Las ventajas principales de utilizar cenizas volantes para los pavimentos de hormigón son las siguientes:

- ✓ Utilizando las cenizas volantes se obtiene un hormigón más denso, aumentando la resistencia y la durabilidad.
- ✓ Se mejora la resistencia a ataque por sulfatos

- ✓ Se mejora la resistencia a las sales de la carretera y a la acción hielo-deshielo y reduciendo de la misma manera la reacción álcali-árido
- ✓ En muchas regiones, se puede equiparar el coste inicial del pavimento de hormigón a los pavimentos de asfalto.

2.16. Beneficios medioambientales

La electricidad es el combustible en la “Era de la Información” y las plantas térmicas que queman carbón producen más de la mitad de la energía que se produce en Estados Unidos. Durante los últimos 30 años, compañías especializadas han incrementado la cantidad de productos provenientes de la combustión del carbón que son reciclados. Estos productos se convierten en ingredientes del hormigón, morteros, estucados, ladrillos, pinturas y una variedad de otros materiales del mundo de la construcción. También se utilizan en la estabilización de suelos o residuos, y pueden ser utilizados como relleno estructural o materiales de capa base en carreteras. Se utilizan incluso por granjeros para mejorar la producción de cacahuetes. En la última década se ha incrementado en más de un 50% el uso de los residuos obtenidos en la combustión del carbón.

Las cenizas volantes, juntamente con el cemento, producen mezclas con menor necesidad de cemento, hecho que produce una menor necesidad de producción de cemento, que es uno de los principales consumidores de energía a la vez que es fuente de emisiones de gases que producen el efecto invernadero. Por cada tonelada de cemento generado, se produce alrededor de una tonelada de dióxido de carbono. Se estima que la producción de cemento supone el 7% de las emisiones de dióxido de carbono humanas. Si todas las cenizas generadas cada año se utilizaran en la producción de cemento, la reducción de dióxido de carbono debida a la producción de cemento sería equivalente a la eliminación del 25% de los vehículos del mundo.

También debe considerarse la preservación del espacio de relleno. Cada tonelada que se utiliza para la construcción, es una tonelada que no se deposita en un vertedero. El hormigón es un buen material de construcción por sí mismo. Las carreteras y edificios construidos con hormigón duran más y requieren menos mantenimiento que otros materiales. Su uso en autovías puede suponer menor consumo de gasolina. Además, debido a que refleja la luz, se necesita menos energía para iluminar la vía. El hormigón es reciclable, ya que desde un 45 a un 80% del hormigón triturado se utiliza como árido en nuevas construcciones.